

# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

## FACULTAD DE INFORMÁTICA

Localización de Vehículos en Entornos Urbanos mediante GPS y Mapas 3D

Dña. Carolina de los Ángeles Piñana Díaz 2017

### Resumen

Los avances tecnológicos están acelerando su desarrollo en vehículos de carreteras de tal manera que ya muy pocos investigadores dudan de que el coche privado autónomo será una realidad en un plazo de tiempo relativamente corto. Estos cambios se ven lanzados más que nunca gracias a la mejora en las telecomunicaciones móviles y un cambio en el modelo económico, por el que el coche pasará a ser una plataforma de provisión de servicios a bordo, más que un mero medio de transporte. Muchos de estos servicios, además de una red de comunicaciones rápida, fiable y con ancho de manda, demandan posicionamiento de calidad, bien en términos de exactitud de la posición, bien en cuanto a la garantía del valor ofrecido.

Al tratarse de un sistema esencial en servicios y aplicaciones a bordo, el posicionamiento para vehículos ha captado la atención de muchos investigadores. Hoy en día, La tecnología clave de posicionamiento de vehículos son los denominados Sistemas de posicionamiento por satélite (GNSS, o *Global Navigation Satellite Systems*). Los sistemas GNSS ofrecen una solución global al problema de posicionamiento a un coste relativamente bajo. Para ello, esencialmente, los receptores emplean las medidas de pseudodistancia entre los satélites y la antena, y resuelven la posición de la antena por triangulación. Sin embargo, la naturaleza de la tecnología hace que haya problemas con la recepción de las señales procedentes de los satélites en ciertos entornos, desde la pérdida total de cobertura, hasta difracciones o distorsiones de dicha señales. Por esta razón, para mejorar la prestación de la navegación por satélite, es común emplear los sistemas GNSS en filtros de fusión que los combinan con información sobre el movimiento del vehículo y/o datos procedentes de otros sensores, como son los sensores inerciales o la odometría.

Una de las líneas más prometedoras de los últimos años es el empleo de mapas digitales en la mejora del posicionamiento. Los mapas son necesarios, en cualquier caso, para referenciar la posición absoluta ofrecida por los GNSS. La manera habitual de emplear los mapas en posicionamiento es mediante el *matching* de la posición ofrecida por el sistema de posicionamiento con el segmento de carretera más probable, según el resultado del algoritmo de *map-matching* empleado. En este proceso, posicionamiento y referencia en el mapa son dos fases distintas de la solución. La posición absoluta se emplea en la fase de *map-matching* para dar con la solución final, referenciada localmente en el mapa disponible. Sin embargo, es posible emplear la información almacenada en los mapas dentro del cálculo del posicionamiento. La fusión de ambas fases, posicionamiento y *map-matching*, permite que el cálculo de la posición se beneficie de la información del mapa a priori, de manera más completa. Por ejemplo, es posible simplificar el cálculo de las coordenadas XYZ del vehículo sabiendo que está posado sobre una carretera de altitud conocida, o podemos añadir condiciones de contorno a la solución dada por el GNSS asumiendo que el vehículo se encuentra dentro de los límites de la red vial, entre otros ejemplos.

La tesis propuesta emplea este paradigma para, gracias al uso de la información provista en mapas digitales, mejorar la fiabilidad del posicionamiento por satélite, con especial atención a los entornos urbanos. En particular, se centra en el problema del uso de medidas erróneas, procedentes de señales reflejadas en el entorno del receptor GNSS, en el cálculo de la posición de la antena receptora. Cuando esto ocurre, los receptores no siempre son capaces de eliminar dichas señales, lo que causa errores muy relevantes en la estimación de la posición.

La propuesta de esta tesis es emplear mapas digitales de elevación que permitan calcular cómo el entorno del vehículo enmascara la visibilidad de los satélites. Para ello, se ha creado un modelo de mapa digital de carreteras y edificios. En base a ese modelo, la tesis también propone una metodología para mapear calles y edificios. Se han generado mapas 3D de entornos urbanos de varios países, que han sido comparados con otras soluciones más complejas y costosas, mostrando resultados positivos.

A continuación, el mapa 3D se emplea para determinar si un satélite debería ser visible o no, según la línea directa entre el satélite y la antena del vehículo está bloqueada por algún edificio. En caso de obstrucción, el algoritmo de posicionamiento no considerará la medida de pseudodistancia de este satélite para el cálculo de la posición GNSS, ya que únicamente puede haber llegado al receptor reflejada en algún elemento del entorno.

Como se verá a lo largo de la tesis, el empleo de esta técnica permitirá mejorar la calidad de la solución propuesta por el sistema de navegación, al disminuir los errores cometidos en el cálculo del posicionamiento.

### Agradecimientos

Aún recuerdo como si fuera ayer el día en que recibí la noticia de que se iba a publicar mi primer artículo. Sentí, que todo el esfuerzo durante tanto tiempo había por fin merecido la pena. Ahora, después de algunos años, culmina el trabajo que con tanta ilusión comencé de la mano de Antonio y Rafa.

Quería pues agradecerte, en primer lugar, Antonio, la confianza depositada en mí. Valoro enormemente la oportunidad que me diste de poder trabajar con vosotros y formar parte del fantástico equipo que conformáis el Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia. Aquellos años con vosotros me sirvieron para aprender mucho y para intensificar mi interés por la investigación.

A ti, Rafa, gracias por TODO. Gracias por transmitirme tus conocimientos, por creer en este proyecto, por animarme a seguir adelante y por estar siempre ahí a pesar de los kilómetros a los que te encuentres. Gracias por permitirme aprender a tu lado y por esas palabras de aliento en momentos difíciles. Ha sido un verdadero placer trabajar contigo.

También quisiera agradecer a David Bétaille y a François Peyret su participación en los experimentos realizados. *Je vous remercie énormément de votre collaboration et votre participation à ce projet.* 

A ti, Mamá. Gracias por la educación que me has dado, por enseñarme el valor de la cosas e inculcarme desde pequeña valores como esfuerzo, superación y perseverancia. Gracias por tus consejos, por tus palabras y abrazos en momentos difíciles y por no dejarme nunca tirar la toalla. Todo lo que hoy soy es gracias a ti. Gracias por haber luchado como lo has hecho. Mis logros siempre serán los tuyos.

A mi abuela, porque a pesar de no estar aquí, siempre me acompaña y me da fuerzas para seguir adelante.

A mis hermanas Belén y Dolores por los ánimos durante estos años de trabajo y por ser siempre un ejemplo para mí.

A mi tío Santiago, por ser mucho más que eso.

A Pepa y Pedro Juan, por ayudarme en la recta final.

A mis amigas Rosa y Sonia, por estar siempre a mi lado a pesar de la distancia. Los años compartidos con vosotras en la carrera fueron inolvidables.

A mi hija Sofía, por enseñarme lo que es el amor incondicional y darme fuerzas para afrontar cada día con ilusión.

Finalmente a ti Alberto. Eres mi amigo, mi compañero y mi todo. Gracias por tu apoyo incondicional y por sentirte siempre orgulloso de mí. Sin tu ayuda no habría podido culminar este trabajo. Gracias por ayudarme a levantarme después de cada tropiezo, por hacer que todo sea tan fácil y por ser mi otra mitad. Sabes que juntos somos capaces de todo y que gran parte de este trabajo es tuyo también.

En definitiva, gracias a todos los que habéis contribuido a que esto hoy sea posible.

"The future belongs to those who believe in the beauty of their dreams."

Eleanor Roosevelt

# Índice general

	Indice de Figuras	V
	Indice de Tablas	V11
	Acronimos	1X
1.	Introducción y Objetivos	3
	1.1. Introducción	3
	1.2 Objetivos	5
	1.3 Aportaciones de la tesis	6
	1.4. Estructura de la tesis.	
n	Sistemas de Nevegezión neu Satólite	0
Ζ.	Sistemas de Navegación por Satente	9
	2.1. Introducción	9
	2.2. Fundamentos de la navegación por satélite.	10
	2.3. Cálculo de la posición con satélites	11
	2.3.1. Trilateración Satelital.	
	2.3.2. Algoritmo de mínimos cuadrados.	15
	2.3.3. Algoritmo de Bancroft.	15
	2.4. Errores de posicionamiento GNSS.	
	2.5. Dilución de precisión.	17
	2.6. Disponibilidad, integridad y continuidad.	
	2.6.1. Disponibilidad.	
	2.6.2. Continuidad.	
	2.0.5. Integridad	
	2.7. Sistemas de aumentación y OFS uncrencial.	
3.	Mapas Digitales	25
	3.1. Introducción	
	3.2. Mapas raster y mapas vectoriales.	25
	3.2.1. Mapas raster	
	3.2.2. Mapas vectoriales.	
	3.3. Mapas digitales para la carretera.	29
	3.3.1. Mapas comerciales.	30
	3.4. Mapas 3D	33

4.	EMaps y EEMaps: Mapas Realzados Digitales	37
	4.1. Introducción	37
	4.1.1. EMaps	37
	4.1.2. EEMaps.	39
	4.2. Propuesta de EEMap.	40
	4.2.1. Capa de carretera.	41
	4.2.2. Capa de elevación	43
	4.3. Modelado de los EEMaps	45
	4.3.1. Capa de carretera.	45
	4.3.2. Capa de elevación	45
	4.4. Validación de la propuesta de EEMap	48
	4.5.1. Precisión	48
	4.5.2. Uso de memoria	52
	4.5. Conclusiones	55
5.	Algoritmo de Detección NLOS	57
	5.1. Introducción	57
	5.1.1. Detección NLOS basada en mapas digitales.	57
	5.1.2. Otras técnicas de detección de multitrayecto.	59
	5.2. Definición de los ángulos de acimut y elevación.	60
	5.3. Descripción del proceso de posicionamiento.	63
	5.3.1. Algoritmo de detección NLOS.	63
	5.3.2. Algoritmo de cálculo de la posición	67
	5.4. Validación del algoritmo de detección NLOS	68
	5.4.1. Descripción del método BATI-3D.	68
	5.4.2. Presentación de los equipos utilizados en las pruebas experimentales.	69
	5.4.3. Aplicación de ambos métodos y comparación de resultados en términos de	
	detección NLOS.	70
	5.5. Conclusiones	75
6.	Mejoras en el Posicionamiento con Algoritmos GNSS/Detección NL	. <b>OS</b> 77
	6.1. Introducción	77
	6.2. Pruebas realizadas en España.	78
	6.2.1. Descripción de las pruebas.	78
	6.2.2. Equipos de pruebas	79
	6.2.3. Resultados	80
	6.3. Pruebas realizadas en Francia	82
	6.3.1. Descripción de las pruebas.	82
	6.3.2. Equipos de pruebas	82
	6.3.3.1. Caracterización del error GPS en las pseudodistancias	83
	6.3.3.2. Resultados	84
7.	Conclusiones	91
	7.1. Conclusiones	91

	7.2. Trabajos futuros	93
8.	Publicaciones	95
	8.1. Introducción	95
	8.2. Revistas	95
	8.2. Congresos internacionales.	96
9.	Bibliografía Anexo I: Algoritmo de Mínimos Cuadrados	97 105
	Anexo II: Algoritmo de Bancroft	107
	Anexo III: Pseudocódigo del algoritmo DOP (Dilution of Precision	) 109
	Anexo IV: Algoritmo de detección de bordes	
	Anexo V: Publicaciones	113

# Índice de Figuras

1.	Segmento espacial. Fuente: http://www.gps.gov	11
2.	Estaciones de control y de seguimiento. Fuente: Earthmap: NASA;	
	http://visibleearth.nasa.gov/	11
3.	Segmento usuario: receptor GPS Novatel	12
4.	Distancia del satélite al receptor.	13
5.	Solución con dos satélites	14
6.	Solución con tres satélites.	14
7.	Solución con cuatro satélites.	15
8.	Propagación de las señales GNSS.	18
9.	Geometría de los satélites y Dilución de la precisión	19
10.	Escenario con multitrayecto NLOS.	24
11.	Ampliación de una imagen raster Fuente: www.osi.ie	26
12.	Mapa raster. Fuente: <u>www.osi.es</u>	27
13.	Elementos base de un mapa vectorial: nodos, polilíneas y polígonos	28
14.	Mapa vectorial. Fuente: www.osi.es	29
15.	Mapa digital de Here. Fuente: <u>www.here.com</u>	30
16.	Mapa digital de TomTom. Fuente: <u>www.tomtom.com</u>	31
17.	Mapa digital de Openstreet Maps. Fuente: www.openstreetmap.org	32
18.	Mapa digital de Google Maps. Fuente: <u>www.google.es/maps</u>	32
19.	Interfaz de Google Earth.	34
20.	Concepto de EEMap con ángulos relevantes para el algoritmo de detección	/1
21	Superposición de algunas figuras de un EEMan (en verde azul, rojo y amarill	41
21.	sobre carreteras de la ciudad de Murcia.	42
22.	Figuras que representan las carreteras en un EEMap con los descriptores.	
	Trapecio (Figura 17 a), sector circular (Figura 17 b), punta de flecha (Figura 1	7
	c) y triángulo (Figura 17 d).	44
23.	Vista aérea de un escenario urbano con modelado de edificios en Murcia	45
24.	Vista de la herramienta web desarrollada para crear la capa de carreteras de ur	ı
	EEMap. A la derecha, la barra de herramientas y el asistente de dibujo; a la	
	izquierda, el dibujo de mapas superponiendo la imagen aérea de un área urban	a
	de Murcia.	46
25.	Esquema de coordenadas ECEF	46
26.	a) Vista frontal de un edificio cuyas características se desean extraer. b) Image	en
	de intensidad de bordes después de aplicar el algoritmo de Canny	48
27.	(a) Superior:. Vista aérea del escenario en estudio con EEMap superpuesto	(en
	azul); Inferior: Inexactitudes del mapa basado en polilíneas con un EEM	lap

superpuesto (en azul). (b) Negro: línea central del mapa basado en polilír	neas.
Rojo: Imprecisiones cometidas en el supuesto de un carril de ancho fijo j	unto
con la imprecisión de la mitad de carril. Líneas de trazos negras: límite de	e los
carriles. Verde: EEMap superpuesto.	50
28. Error relativo entre las alturas de 5 edificios calculadas por el método basado	en
imagenes de edificios y el basado en plantas.	51
29. Error relativo entre las alturas obtenidas mediante el metodo basado en imáganas y al modelo IGN Patiman francás	52
20 a) situación dondo al uso del EEMan conduce a un aumento en los requisite	32 vs. do
so. a) situación donde el uso del EEMap conduce a un aumento en los requisito memoria. Imagen de la izquierda: mana hasada en politíneas danda las qui	is de
negros indican nodos: Imagen de la derecha: EEMan de la misma zona	(h)
Fiemplo de una zona de rotonda basada en EEMan en la cual se utiliza un m	enor
número de figuras que en el mana basado en politíneas. Imagen de la izquie	erda.
mana basado en politíneas con ravas negras que senaran las líneas en los no	dos:
Imagen de la derecha: EEMan de la misma área que utiliza menos parámetro	uos, s 53
31 Número de descriptores totales necesarios para describir la imagen de la Figu	3.35 1ra
23 a) con politíneas y con EFMan	11a 54
32 Número de descriptores totales necesarios para describir la imagen de la Figu	54 1ra
23 h) con politineas y con EFMan	11a 54
33 Representación del ángulo de acimut de un satélite	57
34 Representación del ángulo de elevación de un satélite	02
35 Etanas del proceso de posicionamiento	02
36 Esquema de fluio del proceso de posicionamiento	65
37 Concepto de FEMan para detección NLOS	
38. Esquema del algoritmo de Detección NLOS	05
39. Imagen producida por la cámara virtual	
40. Vehículo VERT del IESTTAR de Nantes	70
41. Imagen del escenario de pruebas Calle Fouré Nantes	70
42. Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D® v	
basado en EEMaps) durante el primer test (mañana)	73
43. Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D® y	
basado en EEMaps) durante el segundo test (tarde)	73
44. Escenario de pruebas en España. Fuente: www.google.es/maps	78
45. Vista aérea del escenario de pruebas en España	79
46. Equipo empleado como estación móvil. Fuente: www.novatel.com	80
47. Estación terrestre empleada para calcular la posición de referencia.	80
48. Error de Posicionamiento Horizontal durante 4 segundos.	81
49. Vista aérea de Cours Olivier de Clisson	82
50. Histograma del error en las pseudodistancias a lo largo del test libre de	
multitrayecto	84
51. Valores del error en las pseudodistancias a lo largo del test libre de	
multitrayecto	85
52. Valor absoluto del error en las pseudodistancias en función del tiempo	86
53. Resultados del algoritmo de detección NLOS en función del tiempo	86
54. Escenario con multritrayecto NLOS.	88
55. Media y desviación típica del HPE cometido por el receptor GPS y por el	
algoritmo de Bancroft tras la aplicación de los algoritmos desarrollados en es	sta
tesis	90

# Índice de Tablas

1.	Rango de errores de posicionamiento GPS.	17
2.	Geometría de los satélites según los valores de DOP	21
3.	Parámetros de Modelos de Edificios.	44
4.	Comparación de Estimaciones de las Alturas entre el método basado	en
	imágenes de edificios y el método basado en plantas.	51
5.	Comparación de Estimaciones de las Alturas con el modelo IGN Batim	nap
	francés	51
6.	Comparación del número de parámetros necesarios para describir la imagen	de
	la Figura 23 a) con polilíneas y con EEMap.	53
7.	Comparación del número de parámetros necesarios para describir la imagen	de
	la Figura 23 b) con polilíneas y con EEMap.	53
8.	Características de las pruebas de validación	72
9.	Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D®	) y
	basado en EEMaps)	72
10	. Matrices de confusión	72
11	. Disconformidad entre ambos algoritmos	74
12	. Resultados del algoritmo de detección NLOS	89
13	. Error de Posicionamiento Horizontal (m).	89

### Acrónimos

ADAS Advanced Driving Assistance Applications AJAX Asynchronous JavaScript And XML **DGPS** Differential GPS **DOP** Dilution Of Precision **DTM** Digital Terrain Model **DR** Dead Reckoning **CAN** Controller Area Network **CMR** Correct Match Rate **ECEF** Earth Centered Earth Fixed **ECMR** Enhanced Correct Match Rate **EDMAPS** Enhanced Digital maps EGNOS European Gesostacionary Navigation Overlay System **EMAP** *Elevation Map* **EEMAP** Elevation Enhanced Map **EKF** *Extended Kalman Filter* FAR False Alarma Rate **FDE** Fault Detection and Exclusion **GBAS** Ground Based Augmentation Systems **GDOP** Geometric Dilution of Precision **GIS** Geographic Information System **GLONASS** Global Navigation Satellite System **GNSS** Global Navigation Satellite System **GPS** Global Positioning System **HDOP** Horizontal Dilution of Precision **HPE** Horizontal Positioning Error HSDPA High Speed Downlink Packet Access

ICAO Internacional Civil Aviation Organization **IFSTTAR** Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux **IGN** Instituto Geográfico Nacional IMU Inertial Measurement Unit **INS** Inertial Navigation System **ITS** Intelligent Transportation System **KML** Keyhole Markup Language LIDAR Laser Imaging Detection and Ranging LOS Line Of Sight LSQ Least Squares **MCS** Master Control Station **MDR** *Misdetection Rate* MRT Measurement of Reference Trajectory **NAVSTAR-GPS** Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System **NLOS** Non Line Of Sight **OCDR** Overall Correct Detection Rate **OSM** OpenStreetMap **PDOP** Position Geometric Dilution of Precision **PF** Particle Filter **PRN** Pseudo Random Noise **RAIM** Receiver Autonomous Integrity Monitoring **RTK** Real Time Kinematics **SBAS** Satellite Based Augmentation System **SDK** Software Development Kit **SNR** Signal to Noise Ratio **TDOP** Time Dilution of Precision **TOA** Time of Arrival **UHF** Ultra High Frequency **UTM** Universal Transverse Mercator **VDOP** Vertical Dilution of Precision **VHF** Very High Frequency **VRML** Virtual Reality modelling Language WAAS Wide Area Augmentation System WGS World Geodesic System WARTK Wide Area Real Time Kinematics



# **UNIVERSIDAD DE MURCIA**

## FACULTAD DE INFORMÁTICA

Localización de Vehículos en Entornos Urbanos mediante GPS y Mapas 3D

Dña. Carolina de los Ángeles Piñana Díaz 2017

### Capítulo 1

### Introducción y Objetivos

#### 1.1. Introducción.

En la actualidad y cada vez más, son numerosas las aplicaciones basadas en Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS) que requieren un posicionamiento fiable del receptor. Los campos de aplicación de los sistemas de posicionamiento en ITS se suelen clasificar en:

- Para la seguridad, permitiendo el desarrollo de *Advance Driver Assistance Systems* (ADAS) que permitan evitar colisiones o mitigar sus consecuencias.
- Para la eficiencia, mejorando los tiempos de navegación, consumo de combustible, el uso eficiente de las infraestructuras de carretera, con un impacto positivo en el tráfico.
- Para el confort, siendo esencial para la viabilidad de servicios basados en la localización (LBS o *Location Based Services*). Algunos ejemplos de LBS son los sistemas de navegación vehiculares, sistema de control de velocidad, Find my Friends, etc.

Actualmente, la tecnología más destacada para posicionamiento es GNSS (*Global Navigation Satellite System*). En 2017, hay dos constelaciones operativas: El estadounidense GPS (*Global Positioning System*), y el ruso GLONASS. Galileo, el sistema de posicionamiento de la Unión Europea, comenzó ofreciendo sus primeros servicios en diciembre de 2016 (denominados *Early Operational Capability*) y se espera que pueda ofrecer su capacidad total en 2019, aunque la constelación completa no estará en órbita hasta 2020. Por su parte, China está creando su propio sistema GNSS denominado COMPASS/Beidou, que ofrecerá cobertura global pero de más calidad sobre China. Al igual que el sistema estadounidense, Beidou se reserva la posibilidad de emplear el sistema con mayor exactitud para fines militares.

A pesar de sus bondades, los sistemas basados en posicionamiento por satélite también sufren errores de relevancia, no ofreciendo soluciones adecuadas en determinados escenarios tales como túneles, aparcamientos cubiertos y cañones urbanos. Típicamente, en estos espacios el receptor experimenta temporalmente una ausencia parcial o total de cobertura o bien las señales procedentes de los satélites no llegan apropiadamente, lo que implica falta de exactitud y de integridad en la solución debida a errores no modelados.

De entre los errores del posicionamiento por GNSS en escenarios con problemas de cobertura, posiblemente el más complejo de modelar y compensar es el denominado error de multitrayecto. En él, la estimación de la posición mediante el uso de receptores de Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) puede verse afectada significativamente debido a las reflexiones de las señales de los satélites en superficies planas, generalmente edificios. Este fenómeno ocasiona sobreestimaciones de las distancias entre los satélites y la antena receptora, lo que introduce errores que pueden ser de gran relevancia en los cálculos de la posición.

El problema del multitrayecto se puede resolver de manera más sencilla cuando, para un cierto satélite, tanto la señal directa como la señal rebotada llegan hasta el receptor. En estos casos, los receptores con capaces de descartar la señal rebotada, que tendrá peor relación señal/ruido.

Pero en entornos urbanos, es frecuente que la única señal que llega al receptor sea la reflejada, y por tanto el receptor no será capaz de descartarla.

Otras técnicas previstas para evitar errores multitrayecto son las llamadas de FDE (*Fault Detection and Exclusion*), como el método RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*). Esencialmente, RAIM consiste en calcular distintas combinaciones de soluciones con todos los satélites disponibles, y aquellos satélites que impliquen soluciones no consistentes con el resto son descartados. Sin embargo, RAIM necesita redundancia de satélites para poder funcionar (lo que normalmente no es realista en cañones urbanos), y además asume que la solución solo incluye un error a la vez, lo que no es cierto en la mayoría de las situaciones donde el multitrayecto está presente.

En conclusión, los receptores no siempre tienen suficiente información para distinguir las señales directas de los efectos del multitrayecto en zonas urbanas, dando lugar a errores GPS no modelados.

La tesis "Localización de vehículos en entornos urbanos mediante GPS y mapas 3D" surge ante la necesidad de investigar y mitigar los efectos del multitrayecto en cañones urbanos. Las investigaciones realizadas en ella tienen su origen en el marco de los trabajos desarrollados por el grupo de Investigación de Sistemas Inteligentes del Departamento de Ingeniería de la Información y las Comunicaciones de la Universidad de Murcia.

Dado que la mayor parte de los efectos del multitrayecto son causados por estas reflexiones, en esta tesis se describe un método para distinguir las señales que proceden de los satélites de forma directa de aquéllas que llegan como resultado de rebotes en las superficies de los edificios colindantes. Para poder decidir si un satélite está en situación de LOS (*Line Of Sight*) o no, se propone emplear un mapa digital que contenga información relevante del escenario que se pretender modelar. En este trabajo se

desarrolla la construcción de dicho mapa de visibilidad, conocido como EEMap (*Elevation Enhanced Map*).

Un EEMap almacenará información relevante en 3D de los edificios cercanos al móvil que se pretende posicionar y servirá como herramienta para determinar la visibilidad de un satélite mediante el algoritmo de detección NLOS. En el proceso de construcción de los mapas se utilizan herramientas de cartografía para determinar las coordenadas de las esquinas, y una imagen digital del edificio a la que se le aplica un algoritmo detector para determinar sus bordes. Con la imagen de bordes obtenida y a partir de unos sencillos cálculos, se estima entonces la altura de dicho edificio. La posición y altura del edificio relativa a la posición de la antena GNSS, se emplearán para calcular qué satélites GNSS estarán ocultos tras él.

Una vez construido el mapa de visibilidad y, con objeto de diferenciar las señales procedentes de los satélites mediante rayo directo (LOS) de las reflejadas (NLOS), se desarrolla lo que se ha denominado en los siguientes capítulos el algoritmo NLOS. Haciendo uso del EEMap, este algoritmo se encarga de descartar aquéllas señales afectadas por el multitrayecto y emplear las provenientes de forma directa para resolver analíticamente el problema de posicionamiento GNSS. Para ello, se implementan dos algoritmos: el Algoritmo de Mínimos Cuadrados y el Algoritmo de Bancroft. Ambos permiten calcular la posición del receptor en un instante determinado a partir de las coordenadas y las pseudodistancias de cada satélite disponible en dicho instante.

Finalmente, se ha implementado un algoritmo de cálculo del parámetro DOP (*Dilution of Precision*) que permite evaluar la calidad de la geometría resultante tras descartar los satélites NLOS antes de calcular la posición.

Como veremos durante la tesis, la disposición geométrica de los satélites empleados en resolver el problema de posicionamiento será esencial para la bondad de la solución dada.

Se han realizado pruebas experimentales en ciudades de España y de Francia que demuestran la validez de los conceptos presentados en esta tesis. Diversas medidas estadísticas y tablas comparativas con otros algoritmos demuestran la efectividad de los algoritmos desarrollados y su potencial utilidad en aplicaciones GNSS.

### 1.2. Objetivos.

La tesis ofrece una solución a un problema complejo, como es el del error multitrayecto en el posicionamiento por GNSS en entornos urbanos. Para ello, además de desarrollar nuevas técnicas, también se han implementado soluciones ya propuestas en la literatura del campo, como parte del proceso necesario para poder validar las propuestas realizadas.

El principal objetivo de la tesis es demostrar la bondad de un nuevo modelo de mapa digital que describe el entorno urbano de una manera apropiada para asistir la navegación por GNSS en el problema del multitrayecto, y de un algoritmo que se basa en dicho modelo, capaz de clasificar en tiempo real los satélites cuya señal sufre multitrayecto.

Este objetivo primario se divide en los siguientes objetivos específicos:

- 1. Proponer un modelo de mapa eficiente, desde el punto de visto de los datos archivados y su volumen, orientado a apoyar la navegación por satélite. Este mapa deberá poder generarse de manera sencilla.
- 2. Validar el modelo de mapa EEMap y su implementación.
- 3. Desarrollar un algoritmo de detección de satélites en condición de NLOS que sea computacionalmente viable para posicionamiento en tiempo real, esto es, que se pueda ejecutar en el mismo ciclo de posicionamiento, a medida que los nuevos datos llegan a su frecuencia habitual de medida.
- 4. Desarrollar algoritmos de resolución del problema de posicionamiento por triangulación GNSS para poder incluir el algoritmo de detección de NLOS dentro de los mismos. Para poder descartar posibles sensibilidades del algoritmo NLOS por una u otra solución, se implementan dos técnicas distintas de solución del problema de posicionamiento por GNSS, lo que permite validar la bondad independientemente del algoritmo GNSS empleado.
- 5. Implementar algoritmos de cálculo de factores DOP que permitan que el sistema de posicionamiento los ofrezca actualizados después de haber descartado satélites por encontrarse en NLOS.
- 6. Validar el concepto de uso de EEMap y detección de NLOS en un caso real de posicionamiento de vehículo en carretera por GNSS.
- 7. Extender la validación con distintos datasets, caracterizando la solución ofrecida.

Por un lado, los objetivos 1 y 2 se abordan en el capítulo 4 de esta tesis. Una vez construido y validado el modelo de EEMap, el capítulo 5 se centra en la consecución de los objetivos 3, 4 y 5. Finalmente, los objetivos restantes se plantean a lo largo del capítulo 6. El capítulo 7 resume los resultados obtenidos y explica la consecución de todos los objetivos planteados.

#### 1.3. Aportaciones de la tesis.

Relacionadas con los objetivos presentados en la sección anterior, las principales aportaciones del presente trabajo de tesis doctoral a este campo de investigación son:

- Un nuevo modelo de mapa EEMap, fácil de generar y de emplear, y útil para mejorar el posicionamiento por GNSS. El modelo de mapa ha sido validado frente a modelos de referencia, mostrando tanto la valía del modelo, como del procedimiento de extracción de datos y generación de mapas.
- Un algoritmo de detección de satélites en NLOS que puede ser empleado fácilmente dentro del lazo de posicionamiento por GNSS, o un sistema híbrido GNSS con una arquitectura fuertemente acoplada. El algoritmo es perfectamente

compatible con el uso de otras técnicas de *Fault Detection and Exclusion* (FDE), mejorando la capacidad de detectar fallos y el nivel de confianza en su clasificación. Dicho algoritmo de detección de NLOS ha sido validado en experimentos reales.

Publicaciones científicas en revistas de alto impacto y en congresos de prestigio en el ámbito del posicionamiento de vehículos avalan dichas aportaciones. El capítulo 8 presentará un listado completo de las publicaciones y comunicaciones a congresos realizadas en el marco del trabajo de esta tesis, siendo las más destacadas:

 A Two-Layers Based Approach of an Enhanced-Map for Urban Positioning Support. Carolina Piñana-Díaz, Rafael Toledo-Moreo, F. Javier Toledo-Moreo and Antonio Skarmeta. Sensors (Basel). 2012; 12(11): 14508–14524. doi: 10.3390/s121114508 Factor de impacto: 2,033 (Q1 en 2012).

Este artículo presenta el concepto de EEMap, tanto la capa de carretera, como la de elevación, incluyendo detalles sobre la metodología, análisis de exactitud del mapa, ocupación de memoria, e idoneidad para uso posterior en algoritmos de posicionamiento.

 GNSS Autonomous Localization: NLOS Satellite Detection Based on 3-D Maps. Francois Peyret; David Bétaille; <u>Carolina Piñana</u>; Rafael Toledo-Moreo; Antonio F. Gómez-Skarmeta; Miguel Ortiz IEEE Robotics & Automation Magazine. 2014, Volumen: 21, Issue: 1, pp: 57 - 63, DOI: 10.1109/MRA.2013.2295944. Factor de impacto: 1,82 (OI en 2014)

En este artículo se presenta un análisis de los beneficios de la solución EEMap propuesta en la tesis doctoral, comparada con otro concepto de mapa y otra metodología de detección de situación NLOS.

#### 1.4. Estructura de la tesis.

La presente tesis comienza con el **capítulo 1**. Éste contiene una pequeña introducción en la cual se describe el problema objeto de estudio y su importancia en la actualidad. A continuación, se especifican los objetivos que se definieron previamente a la realización de ésta y, finalmente las aportaciones obtenidas tras el desarrollo y conclusión de la misma.

El **capítulo 2** describe algunos conceptos fundamentales en el campo de los sistemas de navegación por satélite. Estos conceptos son importantes para comprender el desarrollo de los algoritmos presentados, las necesidades que se pretenden cubrir y los logros alcanzados. En él, también se explica cómo calcular la posición de un receptor GPS a partir de las señales procedentes de los distintos satélites y se define el parámetro DOP.

En el **capítulo 3** se proporciona una visión general sobre los tipos de mapas existentes. Más concretamente, se detallan los mapas digitales para carreteras y los mapas 3D. A lo largo de todo el capítulo se hace un recorrido por el actual estado del arte en este campo.

El **capítulo 4** describe los mapas realzados (EMaps) e introduce el concepto de EEMaps. A continuación, contiene una descripción detallada de la construcción de los mapas propuestos en la presente tesis. Finalmente, se incluye una validación de los conceptos presentados mediante medidas y estudios reales.

Una vez conocido el método de construcción del EEMap, el **capítulo 5** describe un algoritmo de detección de los satélites no visibles, basado en el uso de dichos mapas. En él se incluye también una revisión de las técnicas actuales para reducir el efecto del multitrayecto en entornos urbanos. Al igual que en el capítulo anterior, se presentan los resultados de las pruebas de campo realizadas para validar dicho algoritmo.

En el **capítulo 6**, se detallan los experimentos llevados a cabo para validar la solución global propuesta en esta tesis con la finalidad de mitigar los efectos del multitrayecto. En él, no sólo se muestran los resultados de dichas pruebas, también se proporciona una caracterización del error obtenido en el posicionamiento y un estudio de diversos parámetros estadísticos.

El **capítulo 7** resume las conclusiones obtenidas a partir de la realización de esta tesis doctoral y las líneas a seguir en investigaciones futuras sobre este campo.

Por último, el **capítulo 8** recoge las publicaciones en revistas y comunicaciones a congresos realizadas a lo largo del proceso de desarrollo del presente trabajo.

Adicionalmente, se proporcionan los siguientes anexos:

- **Anexo I:** En él se detalla el algoritmo de cálculo de posicionamiento por Mínimos Cuadrados.
- Anexo II: Éste incluye las ecuaciones para el cálculo del posicionamiento siguiendo el Algoritmo de Bancroft.
- **Anexo III:** En este anexo se define el pseudocódigo del algoritmo de cálculo del DOP.
- **Anexo IV:** En él se detalla el pseudocódigo del algoritmo de detección de bordes, basado en un Detector de Canny.
- **Anexo V:** Finalmente, este anexo recoge todas las publicaciones científicas realizadas a lo largo del desarrollo de la tesis.

### Capítulo 2

### Sistemas de Navegación por Satélite

#### 2.1. Introducción.

El término Sistema de Navegación Global por Satélite (en inglés *Global Navigation Satellite System*) fue creado por la ICAO (del inglés *Internacional Civil Aviation Organization* – Organización Internacional para la Aviación Civil), una de las instituciones que forman parte de las Naciones Unidas que lo definió de la siguiente forma [1]:

"GNSS es un sistema de cobertura global para determinar la posición y el tiempo, que puede estar formado por una o más constelaciones de satélites, por receptores aeronáuticos, por un sistema de monitoreo de la integridad de la señal y complementado con los sistemas de aumentación necesarios para dar soporte a las diferentes operaciones y maniobras que habitualmente se realizan en la navegación aérea."

En la actualidad, para hacer referencia a los sistemas GNSS se utiliza con frecuencia el término GPS (del inglés *Global Positioning System* – Sistema de Posicionamiento Global).

El sistema GPS fue desarrollado y mantenido por el ejército de EE.UU para proveer de señal de posicionamiento de alta precisión y de señal de tiempo a los efectivos militares americanos desplegados en cualquier parte del mundo, sin embargo, en el año 2007, la Casa Blanca decidió eliminar de los futuros satélites GPS la posibilidad de degradar la señal de navegación en beneficio de todos los usuarios civiles del sistema y de la industria GNSS. Si bien la aplicación del GPS como navegador para coche fue de las primeras en introducirse en el mercado de consumo, actualmente es cada vez más frecuente que los teléfonos inteligentes y las tabletas incluyan, integrado en su interior, un receptor GPS que permite disponer de posicionamiento instantáneo y de precisión sobre una cartografía digital que se puede descargar en tiempo real desde un proveedor de servicios de navegación, como por ejemplo Google Maps, a través de la conexión de telefonía móvil de alta capacidad (3G, HSDPA...) que también está integrada en dicho teléfono o tableta.

Dentro de los sistemas GNSS destacan GLONASS, Galileo o Beidou como sistemas de posicionamiento global ruso, europeo y chino respectivamente. El sistema ruso GLONASS (del inglés *Global Navigation Satellite System*) fue diseñado el 8 de diciembre de 2011 y completó su constelación con los 29 satélites de los cuales 24 funcionan constantemente permaneciendo el resto de reserva. El sistema europeo Galileo puso en órbita 4 satélites, dos el 21 de octubre de 2011 y dos más el 12 de octubre del 2012, que sirvieron para validar el sistema y pasar a la fase inicial de operación del sistema, prevista para 2019, previo lanzamiento de 14 satélites más. Por último, el sistema chino, operativo desde el año 2000, de momento da servicio tan sólo a China y a sus países cercanos. Éste utiliza satélites en órbitas geoestacionarias, frente a los satélites en órbitas bajas de GLONASS y GALILEO, lo que le permite no necesitar una gran constelación de 35 satélites operativos que ofrezcan una cobertura mundial y se conviertan en una alternativa al GPS.

#### 2.2. Fundamentos de la navegación por satélite.

Los sistemas GNSS utilizan el concepto de TOA (*Time Of Arrival*) para determinar la posición del usuario. Este parámetro es el tiempo que tarda una señal procedente de un emisor cuya localización es conocida, en alcanzar un sólo receptor.

Este tiempo, también denominado *tiempo de propagación de la señal*, es multiplicado por la velocidad de la luz para, posteriormente determinar la distancia entre el receptor y el emisor. El proceso en el cual se calcula la posición del receptor a partir de la señal procedente de los satélites se denomina *trilateración* y se detalla posteriormente.

El sistema GPS está compuesto por tres segmentos: el segmento espacial, el segmento de control y el segmento usuario. A continuación se detalla cada uno de ellos.

- a) Segmento espacial: Es la constelación de satélites a partir de la cual lo usuarios realizan las medidas de la distancias. Los satélites transmiten dos señales de radio de baja potencia, denominadas *L1* y *L2*. Cada una de ellas, contiene tres componentes de información: un código de ruido pseudoaleatorio (PRN), los datos de efemérides de los satélites y datos de almanaque. El código PRN identifica al satélite que transmite dicha señal, los datos de efemérides proporcionan información sobre la ubicación del mismo en un determinado instante y, los datos de almanaque contienen información sobre el estado del satélite y la fecha y la hora actuales.
- **b)** Segmento de control: Este segmento es el responsable del mantenimiento y el correcto funcionamiento de los satélites. Está formado por una serie de estaciones, distribuidas en la superficie terrestre que se encargan de monitorizar el estado de funcionamiento de los satélites y de actualizar el reloj, las efemérides y el almanaque de cada uno de ellos, al menos, una vez al día.

El segmento de control está comprendido por tres componentes distintos: la estación principal de control (MCS, *Master Control Station*), las estaciones de seguimiento y las antenas terrestres.



Figura 1. Segmento espacial. Fuente: <u>http://www.gps.gov</u>



Figura 2. Estaciones de control y de seguimiento. Fuente: Earthmap: NASA; http://visibleearth.nasa.gov/

c) **Segmento usuario:** Lo comprenden los equipos receptores GPS que, procesan la señal transmitida por los satélites, para posteriormente calcular su posición a partir de las pseudodistancias entre ambos.

### 2.3. Cálculo de la posición con satélites.

El sistema de posicionamiento global por satélite, se basa en la medición de distancias a partir de señales de radio transmitidas por un grupo de satélites artificiales cuya órbita se conoce con precisión y captadas y decodificadas por receptores ubicados en los

puntos cuya posición se desea determinar.



Figura 3. Segmento usuario: receptor GPS Novatel

Es posible determinar geométricamente por trilateración la localización de un receptor GPS simplemente conociendo la posición exacta de tres satélites diferentes y sus pseudodistancias.

Para cada uno de los satélites, el receptor calcula el tiempo que tarda la señal procedente del satélite en alcanzarlo de la siguiente forma:

*Tiempo de propagación = Tiempo que tarda la señal en llegar al receptor – Tiempo desde que la señal salió del satélite.* 

Multiplicando este tiempo de propagación por la velocidad de la luz, se obtiene la distancia desde el receptor al satélite.

Debido a que los satélites retransmiten las efemérides de sus órbitas, el receptor sabe

dónde se encontraba cada uno de los satélites en el instante de transmisión y determina la distancia a cada uno de ellos en esa posición.

### 2.3.1. Trilateración Satelital.

Los satélites del sistema de posicionamiento global se encuentran girando alrededor de la Tierra en órbitas predefinidas a una altura aproximada de 20.200 kilómetros, siendo posible conocer con exactitud la ubicación de un satélite en un instante de tiempo dado, convirtiéndose por lo tanto los satélites en puntos de referencia en el espacio.

Supongamos que un receptor en la Tierra capta la señal de un primer satélite determinando la distancia entre ambos. Esto solamente nos indica que el receptor puede estar ubicado en un punto cualquiera dentro de la superficie de una esfera de radio R1 tal y como se muestra en la Figura 4.



Figura 4. Distancia del satélite al receptor.

Si medimos la distancia de un segundo satélite al mismo receptor se generará una superficie esférica de radio R2, que al intersecarse con la primera esfera formará un círculo en cuyo perímetro pudiera estar ubicado el punto a medir (Figura 5).

Si agregamos una tercera medición, la intersección de la nueva esfera con las dos anteriores se reduce a dos puntos sobre el perímetro del círculo descrito (Figura 6).

Matemáticamente es necesario determinar una cuarta medición a un diferente satélite a fin de poder calcular las cuatro incógnitas x, y, z y tiempo (Figura 7).

En este trabajo se ha resuelto analíticamente el problema GPS utilizando la técnica anterior. Se han desarrollado dos aproximaciones diferentes: el algoritmo de Mínimos Cuadrados (LSQ, *Least Squares*) y la aproximación de Bancroft. El uso de dos

algoritmos de posicionamiento distintos ayuda a evitar la posible influencia de las particularidades de un algoritmo concreto en los resultados.



Figura 5. Solución con dos satélites.



Figura 6. Solución con tres satélites.



Figura 7. Solución con cuatro satélites.

#### 2.3.2. Algoritmo de mínimos cuadrados.

Dado que la ecuación de observación es no lineal, antes de aplicar el algoritmo de Mínimos Cuadrados es necesario linealizarla. En este trabajo, el proceso de linealización se lleva acabo de acuerdo con el procedimiento descrito en [2].

Aplicando las ecuaciones detalladas en el Anexo I y suponiendo que la pseudodistancia medida con el receptor GPS  $P_{observed}$ , es la suma de una observación modelada,  $P_{model} = P_{x,y,z,\tau}$ , más un término de error, es posible aplicar el teorema de Taylor y definir la observación residual como la diferencia entre la observación actual y la observación calculada. A continuación. se procede a calcular una solución en la que la suma de los cuadrados de los residuos sea mínima.

### 2.3.3. Algoritmo de Bancroft.

La versión directa del algoritmo de Bancroft [3] proporciona una solución algebraica no iterativa a las ecuaciones de observación sin necesidad de poseer ningún conocimiento a priori de la localización del receptor.

Este algoritmo consiste en resolver las ecuaciones de posición de los satélites de manera matricial tal y como se detalla en el Anexo II.

#### 2.4. Errores de posicionamiento GNSS.

A pesar de que los sistemas de navegación por satélite actuales son bastante precisos, no están libres de errores.

Son varias las fuentes de error que degradan la precisión en la medida de las distancias a los satélites, pero todas ellas están acotadas y, en gran medida, pueden ser corregidas. Las más importantes son:

- Errores en los relojes de los satélites: El Sistema de Posicionamiento Global permite determinar la ubicación de un receptor ubicado en la superficie de la Tierra basado en el tiempo que tarda la señal en llegar al mismo. Por esta razón los satélites están equipados con relojes atómicos de gran exactitud. Sin embargo los relojes no son perfectos y generan pequeños errores en la medición del tiempo. Un error en el reloj atómico del satélite de una billonésima de segundo (un nanosegundo) equivale a un error de 30 cm en la medición de la distancia al satélite. Los relojes atómicos acumulan un error de 1 billonésima de segundo cada tres años.

Las derivas de los relojes atómicos pueden producir errores significativos, sin embargo, el sistema transmite a los usuarios datos que permiten su corrección hasta reducirlos a unos o dos metros.

- Errores en la estimación de la posición de los satélites: Otro aspecto importante es la posición o ubicación de los satélites en el espacio; ya que es el punto de inicio para los cálculos que permiten en última instancia determinar la posición del receptor en la Tierra. Los satélites se ubican en órbitas circulares a aproximadamente 26560 Km de la superficie de la Tierra para evitar que la atmosfera o la gravedad desestabilicen sus órbitas. Sin embargo las órbitas no son perfectas y la posición de la constelación de satélites cambia con el tiempo.

Con los modelos empleados en la medida y predicción de las órbitas este error se traduce en pocos metros en la estimación de las distancias.

- Errores por propagación en la troposfera e ionosfera: Los satélites del sistema NAVSTAR-GPS (*Navigation Satellite Timing and Ranging Global Positioning System*) transmiten su código a los receptores utilizando señales de radio que deben viajar a través de la ionosfera (50Km) y de la troposfera (200Km) de la Tierra. A su paso por la atmósfera la velocidad de la señal cambia y por lo tanto se genera un error en la estimación de la distancia al satélite. Las señales de radio viajan a la velocidad de la luz, sin embargo su velocidad es constante solo cuando viaja en el vacío. En el mundo real su velocidad no es constante y depende del medio por el cual se desplace. La señal de radio reduce su velocidad al pasar por la sección de partículas cargadas de la ionósfera y luego al entrar en contacto con el vapor de agua de la tropósfera. Dado que el receptor asume que la señal viaja a una velocidad constante esto introduce otra fuente de error en el cálculo de la ubicación.

Especialmente el efecto de la ionosfera produce errores en torno a la decena de metros que pueden ser reducidos en un orden de magnitud si se hacen las medidas de distancias con dos frecuencias simultáneamente.

- Errores instrumentales: Los receptores están equipados con relojes de cuarzo para medir el tiempo. Debido a su precio y tamaño, estos relojes no son atómicos y por lo

tanto no tienen la exactitud de los relojes que se encuentran en los satélites. Ésta es otra fuente de error en el cálculo de la posición que realiza el receptor. La calidad del receptor dependerá de su precio y sus especificaciones técnicas.

- Efecto del multitrayecto: El efecto del multitrayecto consiste en la llegada de la señal de los satélites al receptor de manera reflejada. Estas señales reflejadas poseen cierto retraso respecto a las señales que llegan de manera directa y, si tienen suficiente fuerza, pueden interferir en la señal deseada. En los sucesivos capítulos se profundizará en este tipo de errores.

En total, el error cometido en la medida de las distancias a los satélites, para usuarios civiles está entre 15 y 20 metros y es inferior a 5 metros para los militares.

FUENTE DE ERROR	RANGO DE EROR
Reloj de los satélites	±2 m
Órbitas de los satélites	±2.5 m
Ionosfera	±5 m
Troposfera	±0.5 m
Ruido en el receptor	±0.3 m
Multitrayecto	Hasta decenas de metros

Tabla 1. Rango de errores de posicionamiento GPS.

### 2.5. Dilución de precisión.

Los receptores suelen proporcionar una estimación de la bondad de la solución GPS basada en la geometría del conjunto de satélites empleados para calcular la posición de la antena. Este parámetro se denomina Dilución de la Posición (DOP, *Dilution Of Position*).

El factor DOP, refleja la configuración geométrica de los satélites, como coeficiente entre la incertidumbre de precisión a priori y la incertidumbre de precisión a posteriori. Una mala distribución de satélites ocasiona una alta incertidumbre en la posición. Cuando los satélites están bien distribuidos, la incertidumbre en la determinación de la posición es menor. Si los satélites están muy cerca unos de otros, se incrementa también la incertidumbre en la posición.

La dilución de precisión puede expresarse a través uno o varios de los siguientes componentes:

#### - Dilución de precisión geométrica (GDOP)

La dilución de precisión geométrica indica el efecto de la geometría de los satélites en el error de posicionamiento. El GDOP puede interpretarse como la razón entre el error de posicionamiento y el error de medición de distancia al satélite. Si los 4 satélites requeridos para determinar la posición de un punto forman un tetraedro, conforme aumenta el volumen del tetraedro se reducirá el valor del GDOP. Esto explica porqué mejora la calidad de posición al aumentar el número de satélites.



Figura 8. Propagación de las señales GNSS.

#### -Dilución de precisión en posicionamiento (PDOP).

Aunque el área de cobertura de un sistema GPS comprende toda la superficie terrestre, es necesario considerar el llamado *ángulo de máscara*. Este ángulo es el ángulo de elevación en el horizonte a partir del cual los satélites se consideran visibles para el receptor GPS. El parámetro PDOP integra el error esperado en posición tanto en latitud como en elevación.

#### - Dilución de precisión en tiempo (TDOP).

Mide el error asociado a la lectura de tiempo, es decir, la incertidumbre en el reloj. Un valor alto del parámetro TDOP puede causar errores en el reloj del receptor que, finalmente pueden derivar en un aumento del error en la posición.

#### -Dilución de precisión horizontal (HDOP).

Mide el error asociado a la posición en dos dimensiones, generalmente en términos de latitud y longitud.
#### - Dilución de precisión vertical (VDOP).

Mide el error asociado a la lectura proporcionada por el receptor GPS en función del ángulo de elevación.

El valor DOP más útil es el GDOP, ya que es una combinación de todos los factores. Sin embargo, algunos receptores calculan el PDOP o HDOP, valores que no toman en consideración la componente temporal del parámetro DOP.



Figura 9. Geometría de los satélites y Dilución de la precisión.

Dado que la eliminación de un satélite de la solución genera una nueva geometría, los valores de DOP dados por el receptor deben ser actualizados después de detectar y eliminar los satélites en NLOS. Por este motivo, en el presente trabajo se desarrolla un algoritmo de cálculo del DOP con objeto de decidir si la geometría resultante tras eliminar los satélites en situación NLOS es fiable para llevar a cabo el cálculo del posicionamiento.

El cálculo de dicho parámetro se realiza como se detalla a continuación:

En primer lugar se define la matriz A como:

$$\boldsymbol{A} = \begin{pmatrix} \frac{(x_1 - x)}{R_1} & \frac{(y_1 - y)}{R_1} & \frac{(z_1 - z)}{R_1} & -1 \\ \frac{(x_2 - x)}{R_2} & \frac{(y_2 - y)}{R_2} & \frac{(y_2 - y)}{R_2} & -1 \\ \frac{(x_3 - x)}{R_3} & \frac{(x_3 - x)}{R_3} & \frac{(z_3 - z)}{R_3} & -1 \\ \frac{(x_4 - x)}{R_4} & \frac{(y_4 - y)}{R_4} & \frac{(z_4 - z)}{R_4} \cdots & -1 \end{pmatrix}$$
(1)

donde,

$$R_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}, \quad R_i: \{1 \le i \le 4\}$$

Siendo  $(x_i, y_i, z_i)$  la posición del satélite i-ésimo y (x,y,z) la posición del receptor.

Una vez obtenida A se calcula la matriz Q como:

$$\boldsymbol{Q} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A})^{-1} \tag{2}$$

Los elementos obtenidos se representan de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{Q} = \begin{pmatrix} d_x^2 & d_{xy}^2 & d_{xz}^2 & d_{xt}^2 \\ d_{xy}^2 & d_y^2 & d_{yz}^2 & d_{yt}^2 \\ d_{xz}^2 & d_{yz}^2 & d_z^2 & d_{zt}^2 \\ d_{t}^2 & d_{yt}^2 & d_{zt}^2 & d_t^2 \end{pmatrix}$$
(3)

Finalmente:

$$DOP = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}$$
(4)

Un valor umbral habitual de DOP es 10 (este parámetro no tiene dimensiones y por tanto no se necesitan unidades). Cuanto menor son los valores mejor será la geometría y al aumentar el valor del DOP la geometría es más pobre. Esta prueba extra servirá para determinar si los satélites visibles resultantes se encuentran correctamente situados en el cielo para proporcionar una buena solución. Tal y como se demostrará posteriormente, este paso será de gran importancia para obtener resultados satisfactorios. Se pueden consultar más detalles sobre cálculo de DOP en [5].

#### 2.6. Disponibilidad, integridad y continuidad.

Al utilizar un sistema de navegación por satélite es habitual pensar que el mejor receptor GPS es aquel que nos proporciona más precisión. Sin embargo, la precisión no es el único ni el más importante parámetro en el cual se debe prestar especial atención. Para poder evaluar el comportamiento de un sistema de navegación por satélite es necesario conocer otros parámetros tales como la disponibilidad, la integridad y la continuidad.

#### 2.6.1. Disponibilidad.

Se define disponibilidad de un sistema de navegación como el porcentaje de tiempo durante el cual los servicios del sistema son utilizables. La disponibilidad es un indicador de la capacidad del sistema para proporcionar un servicio de navegación que cumpla unos requisitos mínimos (por ejemplo en precisión) dentro de un área de cobertura determinada. Este parámetro es función tanto de las características físicas del entorno como de las capacidades técnicas de los transmisores.

Uno de los requisitos típicos que se suele establecer en cuestiones de disponibilidad es, por ejemplo, que el usuario obtenga un valor del parámetro PDOP menor o igual a 6.

VALOR DEL DOP	GEOMETRÍA	DESCRIPCIÓN
<1	Ideal	Nivel de confianza más alto. Adecuado para aplicaciones que exigen la máxima precisión en todo momento.
1-2	Excelente	En este nivel las mediciones se consideran lo suficientemente precisas para la mayoría de aplicaciones, exceptuando las más sensibles.
2-5	Bueno	Adecuado para hacer sugerencias fiables de navegación en ruta.
5-10	Moderado	En este nivel se podrían usar las mediciones proporcionadas por los satélites, aunque la calidad de los resultados es mejorable.
10-20	Regular	Representa un bajo nivel de confianza en las mediciones. En este caso, éstas deben descartarse o bien emplearse para realizar una estimación aproximada de la ubicación.
>20	Pobre	En este nivel, las medidas son demasiado inexactas (pueden equivocarse incluso hasta 300 metros) y, por tanto deben desecharse.

Tabla 2. Geometría de los satélites según los valores de DOP

## 2.6.2. Continuidad.

Se define continuidad de un sistema de navegación respecto a una operación, como la probabilidad de que dicho sistema alcance unos requisitos mínimos de forma continua a lo largo de dicha operación. Estos requisitos pueden venir igualmente dados en términos de PDOP u otros.

Este parámetro está relacionado con fallos no planificados en los satélites, de manera que no es habitual una falta de continuidad en los sistemas de navegación.

## 2.6.3. Integridad.

Además de proporcionar su posición, un sistema de posicionamiento global debería avisar de aquellos casos en los cuales el sistema no debería de ser usado, bien porque no está operativo o bien porque contiene errores. Esta capacidad se denomina integridad del sistema y constituye una medida de la confianza que se puede tener en el mismo.

Los receptores GPS no proporcionan en sí ningún mecanismo de integridad aunque sí pueden suceder a menudo errores en ellos que degradan la solución. Existen aplicaciones en las cuales la integridad se convierte en un parámetro crítico (por ejemplo en navegación aérea), por lo cual es necesario contar con técnicas o mecanismos que la proporcionen.

Algunas de ellas son las técnicas basadas en sistemas de aumentación y GPS diferencial.

## 2.7. Sistemas de aumentación y GPS diferencial.

Los sistemas de aumentación tienen su origen en la necesidad de disponer de mejores prestaciones de las señales de navegación GNSS (GPS en su origen) en una determinada área o región. Se trata de sistemas que corrigen las señales GNSS para mejorar tanto el posicionamiento 2D como 3D, ofreciendo además información de la integridad y de la calidad de la señal de navegación. Si bien en un principio se desarrollaron para su uso en la navegación aérea, su uso actual se ha generalizado a cualquier aplicación que necesite de un posicionamiento preciso y fiable. El funcionamiento de los sistemas de aumentación se basa en la corrección de las señales GNSS que se realiza en una red de estaciones terrestres de referencia, las cuales conocen su posición con gran exactitud y miden el error al obtener su posición con la señal GNSS que reciben de los satélites GNSS. Estos errores los provoca, en su mayor parte, el retardo que provoca la ionosfera a la señal GNSS al atravesarla. Las estaciones de referencia calculan dichos errores y los transmiten al resto de los receptores GNSS para que corrijan su posición teniendo en cuenta el error calculado.

Hay tres tipos de sistemas de aumentación, en función de las infraestructuras en las que se basa para transmitir las correcciones de posicionamiento:

- Sistema de aumentación basado en satélites, SBAS (*Satellite Based Augmentation System*): Son sistemas de aumentación que utilizan satélites geoestacionarios para mejorar la calidad del posicionamiento en un área o región muy extensa. Dentro de este tipo de sistemas se encuentra el sistema Europeo EGNOS.

- Sistema de aumentación basado en tierra, GBAS (*Ground Based Augmentation Systems*): Son sistemas de aumentación que utilizan un conjunto de infraestructuras terrestres de telecomunicación en la banda UHF y VHF para transmitir los datos al receptor GNSS. Cubren un área muy pequeña, si bien proporcionan una mayor precisión que los sistemas SBAS.

- GNSS diferencial, (*Differential GNSS*): consiste en una mejora de la información procedente de la constelación GNSS primaria mediante el uso de una red de estaciones de referencia terrestres que, permiten la difusión de información diferencial para el usuario - también llamado rover – con la finalidad de mejorar la precisión de su

posición aunque la integridad no está asegurada. La forma más común de uso de GPS Diferencial (DGPS), consiste en determinar los efectos combinados tanto de los errores de los relojes de los satélites como los de las efemérides incluidos en el mensaje de navegación en una estación de referencia, la cual transmite en tiempo real las correcciones en las pseudodistancias al receptor. Éste, una vez recibidas dichas correcciones las aplica para el cálculo de la posición. Existen varias técnicas GNSS diferenciales, como la DGNSS clásica (o DGPS), la RTK (*Real Time Kinematics*) y la WARTK (*Wide Area RTK*).

## 2.8. Problema del multitrayecto.

La continua mejora y modernización de los sistemas GNSS están contribuyendo, de manera significativa, a la reducción de algunos tipos de errores GPS. No obstante, el multitrayecto sigue siendo en la actualidad, el error no modelado más relevante en términos de cálculo de posicionamiento [4].

Tal y como se ha mencionado anteriormente, el multitrayecto consiste en la recepción de réplicas reflejadas y/o difractadas de las señales que se desean recibir. Dado que la trayectoria recorrida por una señal reflejada siempre es más larga que la trayectoria recorrida por una señal directa, las señales afectadas por el multitrayecto llegan retardadas con respecto a las señales directas. Cuando este retardo es muy grande, el receptor suele detectar el problema del multitrayecto y, por tanto, no emplear la señal reflejada para el cálculo del posicionamiento. Sin embargo, si las reflexiones se producen en objetos cercanos (típicamente edificios colindantes) suelen llegar al receptor sufriendo un retardo mínimo. En estos casos el receptor no suele distinguir los rayos directos de los reflejados y emplea los datos procedentes de estos últimos para el cálculo del posicionamiento. Este hecho ocasiona errores importantes en el cálculo de la posición.

Generalmente, para describir el multitrayecto se emplean los siguientes términos:

- LOS (*Line-of-sight*): que representa la conexión directa entre el transmisor y el receptor.
- NLOS (*Non-line-of-sight*): que representa el camino seguido por la señal tras una o varias reflexiones.

Los receptores actuales suelen separar adecuadamente la señal original de la reflejada en caso de que exista línea de visión (LOS), sin embargo, esto no ocurre cuando no existe visión directa del satélite (NLOS). La Figura 10 muestra un escenario en el cual no existe línea de visión (NLOS). Las flechas azules representan los límites de visibilidad de los satélites GNSS permitidos por los edificios mientras que las líneas negras punteadas muestran la visibilidad entre la antena y los satélites. En esta imagen, los satélites 1 y 2 se encuentran en línea de visión directa, al contrario que el satélite 3, cuya señal llega a la antena procedente exclusivamente de la reflexión sobre el edificio. Añadiendo un satélite más o asumiendo altitud constante respecto a la posición anterior es posible calcular la posición del vehículo. Sin embargo, el valor de la pseudodistancia del satélite 3 será mayor del real a causa del multitrayecto y esto dará lugar a errores significativos en la estimación final de la posición del vehículo.



Figura 10. Escenario con multitrayecto NLOS.

# Capítulo 3

# Mapas Digitales

### 3.1. Introducción.

El mapeado digital, conocido también como cartografía digital es el proceso en el cual se recogen una serie de datos con el objetivo de conformar imágenes virtuales. La principal función de esta tecnología es producir mapas que proporcionen representaciones muy precisas de un área en concreto.

Los mapas digitales pueden contener solamente imágenes de determinadas áreas o terrenos y suelen estar preparados para ser mostrados en programas específicos o para trabajar con GPS.

Los sistemas de navegación a bordo (*On-board Navigation Systems*) se han convertido en los últimos años en una de las principales vertientes de los Sistemas Inteligentes de Transporte. Estos, suelen emplear mapas 2D que contienen información en tiempo real sobre el tráfico o datos geográficos. Sin embargo, los mapas digitales 2D no satisfacen completamente las necesidades de estas aplicaciones y, en la mayoría de ocasiones se requieren otros datos e informaciones no contenidas en ellos.

El desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (GIS, *Geographic Information System*) ha permitido en los últimos años emplear mapas digitales 3D en los equipos a bordo. El uso de este tipo de mapas ha supuesto un notable avance en diversos campos como la cartografía, la localización y el transporte inteligente, ya que contienen más información que los tradicionales en 2D, permitiendo almacenar imágenes completas y datos de calles, edificios e intersecciones.

## 3.2. Mapas raster y mapas vectoriales.

Un Sistema de Información Geográfica es una herramienta informática que permite a los usuarios representar, analizar y crear consultas de forma eficiente de cualquier tipo de información geográfica asociada a un territorio. Para ello, conecta con mapas en los que hay almacenadas bases de datos que almacenan información relevante sobre dicho territorio (carreteras, uso del suelo, altitudes, etc).

Según la forma en la cual se almacenan dichos datos, los mapas se pueden clasificar en mapas raster y mapas vectoriales.

En la actualidad, los SIG que utilizan estos últimos son más populares en el mercado, ya que los primeros son utilizados con mayor frecuencia en aplicaciones que requieran varias capas continuas y menor precisión espacial, como por ejemplo, estudios medioambientales.

## 3.2.1. Mapas raster.

En este tipo de mapas, se subdivide el área completa que se pretende modelar en pequeñas celdas. Se parte de una imagen de tipo raster, también llamada mapa de bits, formada por una gran matriz de puntos muy pequeños y de diferentes colores denominados píxeles. Generalmente, estos provienen de una imagen escaneada o bien de una fotografía aérea.

Cada una de las celdas en las cuales queda subdividida la imagen contiene valores numéricos relativos al píxel de color que representa. Para reproducir esta imagen en un ordenador basta con leer cada uno de los valores contenidos en estas celdas y aplicarlos a los píxeles de la pantalla. La definición de las características del terreno dependerá del tamaño de cada una de estas celdas, en definitiva de la resolución de la imagen.

La Figura 11 muestra una vista ampliada de una imagen de tipo raster. En ella se puede observar la división de la misma en pequeñas celdas según los píxeles que conforman la imagen.



Figura 11. Ampliación de una imagen raster Fuente: <u>www.osi.ie</u>

Los mapas raster se suelen emplear en aplicaciones en las que las propiedades del espacio son más importantes que la precisión de la localización. Al igual que una fotografía obtenida mediante una cámara digital, en este tipo de mapas, la combinación

entre distintos píxeles creará una imagen detallada de un terreno sobre la cual, posteriormente se podrán realizar labores de digitalización.

La Figura 12 muestra una imagen aérea de un terreno y su correspondiente representación raster. Se puede observar como cada elemento del terreno tiene asociado un píxel de un determinado color en la imagen que lo representa.



Figura 12. Mapa raster. Fuente: <u>www.osi.es</u>

Los mapas raster [6] se caracterizan por:

- Conformar archivos de gran tamaño, requiriendo así bastante capacidad de almacenamiento.
- Mayor lentitud de visualización debido al tamaño de los datos que lo conforman.
- No almacenan información sobre los atributos de los objetos.
- Proporcionar un tamaño óptimo de visualización y gran colorido, viéndose afectada la nitidez al aumentarse o reducirse.
- Producirse de manera sencilla a partir de una imagen impresa como un mapa. Para ello basta con escanear dicha imagen y georeferenciarla.

Este tipo de mapas se utilizan generalmente para almacenar datos que varían continuamente, como por ejemplo, fotografías aéreas, superficies elevadas e imágenes obtenidas por satélite.

## 3.2.2. Mapas vectoriales.

En un mapa vectorial, la información es almacenada por medio de nodos o vértices. A partir de los estos, es posible definir otros elementos geométricos tales como líneas, polilíneas o polígonos para modelar los elementos del entorno. Según la escala y la precisión requeridas, se elegirán unos u otros. Los elementos base de cualquier mapa vectorial son:

- Nodos: Almacenan un par de coordenadas XY (generalmente latitud y longitud) que posteriormente son representadas como puntos.
- Líneas: Conectan los vértices o nodos, generando con ello un vector. Se utilizan generalmente para representar elementos que son lineales en la naturaleza, como por ejemplo carreteras o ríos, aunque a veces también simbolizan los límites de una región. Según el tamaño del elemento que representan se trazarán con mayor o menor grosor. La concatenación de dos o más líneas rectas se denomina *polilínea*.
- Polígonos: Se generan cuando se une un conjunto de vértices en un orden determinado y se cierra uniendo el primero de ellos con el último. Se emplean para representar en el mapa elementos que cubren un área bidimensional en la realidad, tales como edificios, campos de agricultura o incluso áreas administrativas. Se suelen emplear para modelar áreas de gran escala.



Figura 13. Elementos base de un mapa vectorial: nodos, polilíneas y polígonos.

Los datos vectoriales cuentan con información precisa de la localización de los elementos geográficos que representan. Se caracterizan, principalmente por:

- Necesitar pocos recursos de almacenamiento, ya que sus archivos no ocupan gran tamaño. En ellos sólo se almacenan datos de los elementos digitalizados.
- Se visualizan con mayor rapidez que los mapas raster.
- Almacenan información en bases de datos sobre los atributos de los elementos que representan. Esta información permite crear un mapa que describa un atributo particular almacenado en dichas bases de datos.
- Los datos son fáciles de mantener y actualizar. Además, se pueden añadir y eliminar.
- Las capas que los forman pueden ser ocultadas y mostradas individualmente.

Los mapas empleados por los receptores GPS de coche (TomTom, Viamichelin,...) son mapas vectoriales [7].

Los mapas raster pueden ser adquiridos comercialmente o producidos por el usuario, según lo permita cada receptor GPS. En cambio, los mapas vectoriales, debido a su complejidad suelen ser proporcionados por una empresa de cartografía.



Figura 14. Mapa vectorial. Fuente: <u>www.osi.es</u>

## 3.3. Mapas digitales para la carretera.

Un mapa digital puede definirse como la interpretación de los elementos de un mapa y la relación entre los mismos. Este tipo de mapas contiene una cantidad de información considerable que no es almacenada implícitamente en él, aunque sí puede ser derivada de la interpretación del mismo.

Los mapas digitales para la carretera se caracterizan básicamente porque la información contenida en ellos supera ampliamente la contenida en los tradicionales ya que proporcionan datos sobre carreteras, tráfico e incluso puntos de interés tales como estaciones de servicio, hoteles, lugares turísticos, etc. Su construcción es similar a la de un mapa vectorial y sus elementos base son los nodos y las polilíneas.

Los mapas digitales suelen estar preparados para representarse en algún software específico y para trabajar con GPS. Una de sus principales ventajas es su gran versatilidad a la hora de mostrar la información, ya que disponen de diferentes vistas, escalas y zooms. Se clasifican esencialmente en dos categorías: los mapas comerciales y los llamados mapas realzados (*Enhanced Maps*).

## 3.3.1. Mapas comerciales.

Los mapas comerciales han experimentado un notable desarrollo en los últimos años. El avance de las tecnologías de localización ha contribuido a la inclusión cada vez más frecuente de receptores GPS a bordo de vehículos y su uso en smartphones. Asimismo, se han producido cambios importantes en las empresas cartográficas, surgiendo nuevos proveedores de mapas o, extendiéndose los ya existentes. En la actualidad, las principales compañías proveedoras de mapas digitales son:

Navteq:

Navteq es una empresa líder en servicios de información sobre mapas digitales tanto para el sector automovilístico como para servicios basados en localización o incluso proporcionando soluciones a nivel gubernamental.

La compañía, ha construido una de las mayores y más robustas bases de datos geográficas del mundo. Hoy en día, prácticamente todos los grandes fabricantes de automóvil que ofrecen sistemas de navegación en Europa y América emplean mapas Navteq en numerosos modelos. Además, ofrece uno de los mayores portales de internet cartográficos en Europa y América del Norte.

Sus mapas abarcan más de 57 países y territorios de los cinco continentes y son ampliamente conocidos por su nivel de detalle. Incluyen hasta 160 atributos de datos tales como restricciones de acceso a las calles, carreteras unidireccionales o limitaciones de velocidad que ayudan a optimizar la navegación. Además, incluyen puntos de interés en aproximadamente 50 categorías en todo el mundo, facilitando la localización y ruta a diferentes destinos.



Figura 15. Mapa digital de Here. Fuente: www.here.com

En el año 2007 fue adquirida por la empresa Nokia hasta que en el año 2011 se fusionó completamente con ésta para formar parte de Here [8]. La nueva compañía Here, trabaja no sólo en la fabricación de mapas, sino también para ofrecer servicios de movilidad y localización de última generación.

#### - Tele Atlas.

Tele Atlas fue fundada en el año 1984 en los Países Bajos y ofrece mapas digitales y otros contenidos dinámicos para servicios de navegación y localización, tanto personales como automovilísticos. Proporciona datos que se utilizan en una amplia gama de aplicaciones de mapas tanto para móviles como para internet. Es una de las principales competidores de Navteq.

En el año 2008, el fabricante de navegadores TomTom [9] compró Tele Atlas, que hasta entonces había sido su proveedor de mapas.

Tele Atlas desarrolló el primer sistema de navegación a bordo y el primer mapa digital navegable de Europa. Además, también fue la primera compañía en proporcionar mapas y puntos de interés en 3D. Hasta el año 2009, ha sido la empresa proveedora de mapas para Google Maps.

En la actualidad ofrece más de 25 millones de puntos de interés y numeroso contenido de tráfico dinámico que permite a las empresas y a los consumidores ahorrar tiempo en sus rutas.



Figura 16. Mapa digital de TomTom. Fuente: <u>www.tomtom.com</u>

#### - OpenStreetMap.

OpenStreetMap [10] (también conocido como OSM) consiste en un proyecto colaborativo de datos abiertos para crear mapas libres y editables. Los colaboradores utilizan imágenes aéreas, dispositivos GPS, mapas y otras fuentes de datos libres para verificar que los datos sean precisos y estén actualizados. A través de su portal, los usuarios registrados proporcionan información capturada con su GPS. Dicha

información es almacenada en bases de datos permitiendo corregir la cartografía y mejorar la información contenida en los mapas.

OpenStreetMap también utiliza datos públicos libreados por instituciones gubernamentales que se encuentran a disposición pública.



Figura 17. Mapa digital de Openstreet Maps. Fuente: www.openstreetmap.org

Google Maps.

Google Maps [11] es un servidor web de aplicaciones de mapas que proporciona información detallada de regiones geográficas de todo el mundo. Ofrece tanto imágenes por satélite como imágenes a pie de calle a través de la herramienta denominada Street View. Mediante esta herramienta es posible obtener vistas panorámicas de numerosas ciudades del mundo y de los edificios que en ellas se encuentran.



Figura 18. Mapa digital de Google Maps. Fuente: www.google.es/maps

Google Maps tiene una versión de escritorio llamada Google Earth. Consiste en un programa que muestra un globo virtual permitiendo al usuario visualizar múltiples características cartográficas a través de imágenes aéreas. Con Google Earth es posible obtener vistas 3D de la Tierra, conocer las coordenadas de cualquier lugar o incluso medir distancias.

## 3.4. Mapas 3D.

La principal característica de los mapas 3D es que incluyen información sobre la elevación del terreno [19]. La mayoría de ellos permite visualizar los edificios en tres dimensiones, y obtener vistas panorámicas. Además, este tipo de mapas suele ofrecer imágenes aéreas del terreno y recorrer las calles en un ángulo de hasta 360°.

Una de las cartografías 3D más conocidas y ampliamente utilizadas en el momento es la proporcionada por Google Maps. En la actualidad es posible hacer uso de ella tanto a través de su página web como por medio de aplicaciones móviles.

Estas aplicaciones funcionan bajo distintos sistemas operativos aunque, inicialmente fueron creadas para dispositivos Android y, a pesar de que sus funcionalidades son diversas, gran parte de ellas intenta dar servicio de posicionamiento a este tipo de dispositivos.

El software por excelencia para dispositivos móviles y ordenadores basado en la cartografía de Google Maps se denomina Google Earth [20]. Google Earth no sólo incluye la cartografía 3D de Google Maps, también posee otros servicios y prestaciones. Esta herramienta es gratuita en su versión más básica y permite:

- Visualizar las calles, edificios y puntos de interés.
- Importar datos KML, KMZ y GPS.
- Crear modelos 3D con Google SketchUp
- Aplicar etiquetas geográficas a fotografías.
- Grabar un viaje y marcar posiciones.
- Dibujar polígonos y medir distancias en el mapa.

Los dispositivos móviles que trabajan bajo el sistema operativo iOS disponen de su propio servicio de mapas, denominado Mapas 3D [21] con prestaciones similares a Google Maps y una función denominada *Flyover* que combina imágenes de alta resolución con modelos tridimensionales para la representación virtual de ciudades y lugares.

En cuanto a la cartografía de OpenStreetMap, ofrece una librería denominada *OSM Building* [22] que permite añadir una capa con información de edificios a los mapas 2D y 3D disponibles en ella.

Tanto Google Maps como OpenStreetMaps ofrecen cartografías detalladas, con una amplia información sobre calles, relieves o puntos de interés. Sin embargo, no proporcionan datos precisos sobre la altura de los elementos que obstaculizan las señales procedentes de los satélites (típicamente edificios). Este hecho dificulta la implementación de algoritmos de detección y eliminación del multitrayecto basados en mapas comerciales.

Una de las técnicas de cartografía más utilizadas para generar mapas 3D se basa en la fotogrametría espacial [23, 24]. Esta técnica consiste en crear modelos 3D a partir de imágenes 2D para representar los objetos que aparecen en ellas mediante elementos geométricos. Para ello, se realizan fotografías aéreas del terreno que se pretende cartografíar.



Figura 19. Interfaz de Google Earth.

Posteriormente, estas imágenes se proyectan en forma ortogonal en un plano de referencia, se introducen en el ordenador y se opera sobre ellas para obtener un modelo tridimensional. Se trata de una técnica flexible y con alta velocidad de compilación, sin embargo, requiere una inversión considerable en equipos, por lo que conlleva un proceso costoso en tiempo y presupuesto. Asimismo, en ocasiones resulta necesaria una inspección posterior del lugar para determinar aquellos elementos que no son visibles de forma satisfactoria, lo cual aumenta el tiempo de desarrollo de los mapas.

Algunos autores defienden la idea de que el modelado de datos debe llevarse a cabo en 3D [25] y que tanto las operaciones fotogramétricas como la generación del modelo digital de terreno (DTM, *Digital Terrain Model*) deben de considerarse módulos esenciales del sistema de información geográfica.

En los últimos años, han aumentado notablemente los métodos para adquirir y reconstruir datos espaciales. Sin embargo, aún existe una relación importante entre la precisión, la complejidad y el coste de estos métodos. Por tanto, para encontrar la solución más precisa en el modelado 3D es necesario considerar factores como el nivel

de detalle requerido, la precisión, el tamaño de los datos, el coste, el nivel de automatización y la facilidad de uso.

Otras técnicas más actuales consisten en la utilización de la tecnología LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) [27]. Este tipo de láser permite adquirir datos digitales a grandes distancias. Para ello, se emplea un láser que emite un haz pulsado. La distancia entre el objeto y dicho emisor se obtiene mediante la medida del tiempo de retraso entre la emisión del pulso y su detección. La principal ventaja de esta tecnología reside en el volumen de datos que es capaz de almacenar, hecho que puede ser considerado a la vez como uno de sus principales inconvenientes, ya que ralentiza el proceso de extracción de la información. Esto puede suponer un problema en aplicaciones que requieran procesado de datos en tiempo real. Además, la utilización de un equipo LIDAR también aumenta considerablemente los costes de un proyecto.

En el marco del proyecto CityVip [28] los autores de [29] hacen uso de un Sistema de Información Geográfica proporcionado por el software francés BeNomad [30] que contiene datos digitales 3D de alta precisión previamente adquiridos y preprocesados por el *Institut National de l'Information Géographique et Forestiére* de Francia (IGN) [31]. El modelo 3D es construido a partir de imágenes aéreas de alta resolución completadas con imágenes terrestres adquiridas mediante mapeo móvil.

## Capítulo 4

# EMaps y EEMaps: Mapas Realzados Digitales

## 4.1. Introducción.

El concepto de los mapas digitales realzados (*Enhanced Digital Maps*, EDMaps) o mapas realzados (*Enhanced Maps*, EMaps) surgió con el propósito de crear mapas que satisficieran las necesidades de algunas aplicaciones vehiculares con ciertos requisitos en términos de precisión o cantidad de información disponible superior a los ofrecidos por los mapas estándar [46]. Algunos autores han explotado este concepto para el uso de aplicaciones diversas tales como posicionamiento a nivel de carril [47], detección de cambio de carril [48] o integridad de la posición [17]. Otros han utilizado la información almacenada en los mapas navegables para aplicaciones de posicionamiento asistido mediante mapas [49, 50]. En la actualidad, nuevos desarrollos en los departamentos de I+D de los proveedores de mapas [51, 52] intentan mejorar y contribuir al desarrollo de aplicaciones avanzadas de asistencia de la conducción (ADAS, *Advanced Driving Assistance Applications*).

El concepto de EMaps o mapas realzados abarca tanto los mapas digitales en 2D, denominados EMaps como en 3D, estos últimos son más conocidos como EEMaps (*Elevation Enhanced Maps*) ya que, tal y como indica su nombre, incluyen información sobre la capa de elevación.

La principal ventaja de los mapas realzados reside en que son bastante más completos y precisos que los mapas convencionales. Esto se debe a que son capaces de almacenar datos más detallados y algunos parámetros que no están incluidos en los mapas basados en polilíneas.

#### 4.1.1. EMaps.

El concepto de EMap, tuvo su origen con el inicio del proyecto EDMap (*Enhanced Digital Maps Project*) [12], llevado a cabo por cuatro grandes fabricantes de componentes para automóviles (DaimlerChrysler, Ford, General Motors y Toyota), un

importante fabricante de mapas (NAVTEQ), la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*) y la Administración Nacional de Seguridad de Tráfico en Carretera (Administración Nacional de Seguridad en el Tráfico en las Carreteras).

Los principales objetivos de este proyecto eran, por un lado, identificar tanto la precisión como los atributos necesarios para el desarrollo de aplicaciones de seguridad vehicular y, por otro, estudiar la viabilidad de comercializar mapas que contuvieran este tipo de información.

A raíz de la creación de este proyecto, son numerosos los autores que han desarrollado y/o complementado mapas digitales para ser utilizados en aplicaciones de localización y transporte inteligente.

Una forma interesante de recolectar datos para la creación de EMaps fue llevada por los autores en [13] y [14]. Estos trabajos se basaban en la fusión de trayectorias dadas por una flota de vehículos equipados con GPS.

Originalmente la mayoría de los Sistemas de Información Geográfica representaban los carriles mediante una o dos polilíneas, es decir, una serie de nodos y puntos conectados por segmentos [15]. Esta modelización no representaba los carriles con la precisión necesaria, existiendo a veces hasta 1 m de diferencia entre el segmento modelado y la curva real del terreno.

En [16] y [17] los autores utilizan un EMap que contiene la descripción geométrica del centro de cada carril de la calzada. Esta descripción geométrica la realizan por medio de clotoides, una curva tangente al eje de abcisas caracterizada por sus coordenadas de origen, la dirección y curvatura origen y la variación de esta última con respecto a dicho eje. La ventaja que presenta el uso de clotoides para la caracterización de mapas es que éstas pueden ser modeladas tanto como líneas rectas como curvas ajustando determinados parámetros de las mismas según las necesidades del terreno que se pretende modelar.

En [18], en cambio, se presenta una solución para modelar las intersecciones basada en lo que los autores denominan carriles virtuales. Este tipo de carril se diseña no sólo teniendo en cuenta la información geométrica basada en polilíneas, sino que también tiene en cuenta ciertos principios de tráfico, así como posibles conexiones con otras intersecciones. A partir de estos carriles construyen lo que denominan un mapa electrónico de carreteras, que contiene información tanto de los carriles que componen la calzada como de las intersecciones que los unen.

En otros trabajos como [53] se incluyen puntos de intersección para describir de manera más precisa la curvatura de la carretera.

Siguiendo un enfoque diferente, el IGN ha desarrollado un modelado de la carretera basado en triángulos disponible para ciertas áreas que constituye una alternativa interesante a la descripción basada en polilíneas [31].

Los EMaps han supuesto un notable avance en el campo de la cartografía, proporcionando al usuario prestaciones que no existían en los mapas digitales

tradicionales. No obstante, siguen presentando ciertas limitaciones en aplicaciones que requieren un posicionamiento de alta precisión. Más aún, en entornos afectados por el problema del multitrayecto, en los cuales resulta imprescindible poseer información en tres dimensiones del entorno para modelarlo con exactitud. Se hace pues necesario disponer de mapas digitales 3D.

## 4.1.2. EEMaps.

Una de las aplicaciones que se puede beneficiar del uso de mapas 3D digitales de precisión es la navegación por satélite, objeto de esta tesis. En este tipo de aplicaciones es de vital importancia un correcto posicionamiento, para lo cual se precisa un modelado exacto del escenario en el que se sitúa el móvil que se pretende posicionar. En este campo, los datos de elevación son esencialmente importantes, ya que proporcionan información sobre la obstaculización de los elementos del entorno.

En este línea, los autores de [33] emplean un modelo de ciudad 3D para determinar la disponibilidad de satélites y para analizar la degradación de la señal en entornos con multitrayecto basado en escenarios simulados. También los trabajos de [34], [35] y [36] crean modelos de ciudades 3D para evaluar el comportamiento de la tecnología GNSS en cañones urbanos. En [36], concretamente, los datos de los edificios están almacenados en lenguaje VRML (*Virtual Reality Modelling Language*), un lenguaje para modelado de realidad Virtual. En estos modelos se representan objetos y escenas a partir de prototipos basados en figuras geométricas básicas, permitiendo al usuario interactuar con ellos de forma similar a como lo hacen en la realidad.

Marais en [56] abordó esta cuestión también mediante la construcción en tiempo real de un modelo 3D a partir de imágenes recogidas con una cámara de ojo de pez.

A diferencia del criterio de la creación de mapas de visibilidad del cielo sobre el terreno durante la conducción, esta tesis se centra en mapas previamente creados y almacenados, de manera que sean accesibles cuando sea necesario. Esto, supone un ahorro considerable del tiempo de ejecución.

Cada vez es más habitual considerar solamente los datos correspondientes a la elevación de los edificios, ya que estos son los elementos que juegan el papel más relevante en el problema del multitrayecto [57], [58]. En esta línea, Costa [57] emplea un modelo de simulación que incluye un modelo de elevación digital, bases de datos de edificios y un modelo de vegetación para procesar un mapa de acimut y elevación de los estados de ruta (claro, sombreados y bloqueados) para un gran número de observadores. Este modelo de simulación se emplea para el estudio y la planificación de aplicaciones de localización y navegación basadas en satélites. En [58], los autores emplean un modelo sofisticado de ciudad 3D para determinar los límites de los edificios y la visibilidad de los satélites GPS, aunque el modelo 3D en sí y su creación no se explica en el artículo. Peyret et al. en [59], explotan un mapa GIS y una herramienta gráfica para estimar las alturas de los edificios y emplearla en la detección NLOS. El mapa utilizado en las pruebas realizadas es un proyecto del IGN francés que añade información sobre los edificios a lo largo de las calles urbanas.

Siguiendo la línea del proyecto europeo CVIS [28], en el cual se desarrollan mapas realzados (EMaps) para mejorar la calidad de posicionamiento de vehículos, el método propuesto en esta tesis trata de evitar el multitrayecto explotando información almacenada en mapas digitales referida a la localización de los edificios y sus tamaños. Dos de las principales y más interesantes contribuciones de este trabajo a la resolución del problema del multitrayecto basada en mapas 3D residen en el bajo coste que supone la construcción del EEMap y el volumen de datos que éste ocupa. Por un lado, no es necesario emplear ningún equipo de pruebas adicional al propio receptor GPS; por otro, la información almacenada en el mapa es mínima, lo que evita tener que construir modelos 3D del entorno sofisticados y con capacidad para almacenar y procesar gran volumen de datos.

Los EEMaps propuestos hacen uso de la capa de elevación que se va a describir a continuación y complementan una primera fase de desarrollo de EMaps realizada por los autores en [60] con el fin de proporcionar y mejorar posicionamiento GPS. Esta primera fase consiste en la creación de una capa de carretera, dedicada a describir las formas de las carreteras urbanas, bastante flexible como para modelar zonas complicadas. Esta primera capa, representa de manera precisa los bordes de la carretera en entornos urbanos en lugar de los centros de los carriles y sus anchuras, como en la mayoría de las aproximaciones de la literatura del área.

La segunda capa, desarrollada íntegramente en esta tesis, consiste en una capa de elevación que contiene información sobre la localización y la altura de los edificios situados sobre la carretera. De esta manera, cuando un vehículo se sitúa en un punto dado de la carretera, es posible crear un mapa de visibilidad de los satélites GNSS y detectar cuáles de ellos se encuentran en situación de NLOS. Así, antes de resolver el cálculo de la posición, es posible eliminar los datos procedentes de dichos satélites y evitar los efectos causados por el multitrayecto.

La solución propuesta solamente incluye edificios, ya que son los elementos que contribuyen de forma más significativa a los efectos del multitrayecto, especialmente en ciudades. En esta aproximación también podría tenerse en cuenta puentes ya que pueden ser descritos como segmentos de carreteras en el marco de los EMaps [16], sin embargo, estos elementos no serán objeto de estudio de este trabajo, por representar un caso muy excepcional de multitrayecto en entorno urbano Por otro lado, aunque los árboles también pueden causar interrupciones de las señales GNSS en entornos urbanos, su impacto es mucho menos significativo.

## 4.2. Propuesta de EEMap.

La Figura 20 muestra una visión esquemática de un EEMap y sus dos capas. La capa de la carretera se presenta en color gris oscuro y representa el suelo de la carretera, frente al color gris claro de las aceras (o más precisamente, cualquier espacio en el cual no puedan circular vehículos). Las características de este modelo de capa de carretera hacen factible la descripción de superfícies con formas similares a las de la figura, con elementos rectos y redondeados. Los edificios, en color azul, representan los obstáculos que bloquean las señales del satélite GPS impidiendo que éstas lleguen a la antena del receptor en un rayo directo.



Figura 20. Concepto de EEMap con ángulos relevantes para el algoritmo de detección NLOS.

El concepto completo de un EEMap incluye ambas capas, si bien esta tesis está centrada en el estudio de la visibilidad de las señales de los satélites y en la detección NLOS, para lo cual solamente se emplea la capa de elevación. Aunque la capa de carretera no se emplea en el cálculo del posicionamiento a lo largo de esta tesis, es conveniente explicarla para entender su funcionalidad y el concepto propuesto de EEMap

## 4.2.1. Capa de carretera.

El concepto de la capa de carretera se presenta y desarrolla en [60] y está basado en un conjunto reducido de figuras planas localizadas en un entorno 3D y definidas por un determinado número de descriptores. Cada figura representa una porción de pavimento y el conjunto de todas ellas una a continuación de otra define completamente la forma de la carretera.

En este modelo, existen cuatro figuras básicas para describir la forma de la carretera. La Figura 21 muestra una pequeña área de la ciudad de Murcia, en la cual se representan estas cuatro figuras.

A continuación se proporciona una descripción detallada de cada una de ellas:



Figura 21. Superposición de algunas figuras de un EEMap (en verde, azul, rojo y amarillo) sobre carreteras de la ciudad de Murcia.

• **Trapecio:** Esta figura se usa para definir porciones rectas de la carretera (formas de color verde de la Figura 21). Estos tramos pueden variar su anchura a lo largo del eje longitudinal, por lo que son modelados adaptando las bases del trapecio v y w tal y como muestra la Figura 22 (a). Sus descriptores son:

- w: anchura de la base opuesta al punto de referencia.
- v: anchura de la base que contiene al punto de referencia.
- x, y, z: coordenadas Este, Norte y elevación (UTM) del punto central de la base.
- j: argumento (entre 0 y  $2\pi$ ) del vector que une los puntos medios de las bases con respecto al plano XY.
- jz: argumento (entre +  $\pi$  /2 y  $\pi$  /2) del vector que une los puntos medios de las bases con respecto al eje Z.
- l: distancia de la proyección de la altura del trapecio respecto al plano XY.

• Sector circular: El sector circular tiene como objetivo describir rotondas tanto con un radio exterior como con un interior que se ajusta a la anchura de la carretera (formas amarillas en la Figuras 21 y descriptores en la Figura 22 (b)). Los valores de j y k, medidos en radianes, se utilizan para determinar el argumento de las coordenadas polares de los límites laterales de la corona en la dirección radial del sector circular con respecto a su centro. Los descriptores de un sector circular son:

- x, y, z: coordenadas Este, Norte y Elevación (UTM) del punto central de la rotonda.
- j: argumento (entre 0 y 2  $\pi$ ) del vector que une un lado de la corona al centro de la rotonda.
- k: argumento (entre 0 y  $2\pi$ ) del vector procedente del otro lado de la corona hacia el centro de la rotonda.

- jz: argumento (entre  $+\pi/2$  y  $-\pi/2$ ) del vector desde el centro que va de la rotonda hasta el lado descrito por j con respecto al eje Z.
- kz: argumento (entre  $+\pi/2$  y  $-\pi/2$ ) del vector desde el centro de la rotonda hasta el lado descrito por k con respecto al eje Z.
- r1: radio del arco interior.
- r2: radio del arco exterior.

• Punta de flecha: Los bordes de la carretera en una intersección raramente están compuestos de ángulos puntiagudos. En este modelo, son descritos por formas redondeadas (formas rojas en la Figura 21). Este polígono es similar a un triángulo, pero que tiene uno de sus lados curvos, por lo que es fácil de describir aquellas porciones de la carretera variando el punto (CX, CY) y el radio r, como se muestra en la Figura 22 (c).

- x, y, z: coordenadas Este, Norte y Elevación (UTM) del vértice principal (entre ambas líneas rectas).
- j: argumento (entre 0 y  $2\pi$ ) del vector que describe un lado de la punta de flecha con respecto al vértice principal en el plano XY.
- k: argumento (entre 0 y  $2\pi$ ) del vector que describe el otro lado de la punta de flecha con respecto al vértice principal en el plano XY.
- jz: argumento (entre +  $\pi$  / 2 y- $\pi$  / 2) del vector descrito por j con respecto al eje Z.
- kz: argumento (entre +  $\pi$  / 2 y- $\pi$  / 2) del vector descrito por k con respecto al eje Z.
- cx, cy: coordenadas Este, Norte (UTM) del centro del círculo que describe la curva lateral.
- r: radio del arco cuyo centro es cx, cy.
- v: este parámetro representa la más grande de las longitudes de los lados rectos en la punta de flecha. Aunque su inclusión no es necesaria, se introduce para mejorar la eficiencia computacional de un algoritmo que pretenda comprobar si un punto se encuentra dentro de la figura.

• **Triángulo:** Dado que el triángulo es la piedra angular de cualquier figura geométrica, su inclusión es necesaria para completar las porciones restantes de la carretera que no pueden ser bien representadas por los tres elementos anteriores (ver triángulos azules en la Figura 21). Los descriptores de datos definen los vértices del triángulo en un entorno tridimensional (Figura 22 (d)).

- xA, yA, zA: coordenadas Este, Norte y Elevación (UTM) del vértice A.
- xB, yB, zB: coordenadas Este, Norte y Elevación (UTM) del vértice B.
- xC, yC, zC: coordenadas Este, Norte y Elevación (UTM) del vértice C.

## 4.2.2. Capa de elevación.

La capa de elevación almacena la información de la ubicación y las alturas de los edificios. Esta capa, desarrollada íntegramente en esta tesis, permitirá determinar si un edificio bloquea la señal procedente de un satélite y, por tanto es necesario descartarla

por ser esta clasificada como una señal NLOS. Con esta información, será posible posteriormente proporcionar la posición del receptor y, por tanto la solución GPS.



Figura 22. Figuras que representan las carreteras en un EEMap con los descriptores. Trapecio (Figura 17 a), sector circular (Figura 17 b), punta de flecha (Figura 17 c) y triángulo (Figura 17 d).

Los datos necesarios para la construcción de los mapas incluyen tanto las dos esquinas más cercanas a la carretera como la longitud y la altura de cada edificio. La descripción de los edificios sigue el formato dado en la Tabla 3, en la cual, los subíndices 1 y 2 se refieren a las posiciones 2D de las dos esquinas inferiores de la fachada considerada (representadas mediante segmentos de color rojo en la Figura 23). En este enfoque, las dos esquinas de la fachada comparten un único valor de altitud. Esto se puede hacer puesto que los edificios son generalmente horizontales, incluso si la carretera está inclinada, y es el techo del edificio (y no el suelo) el que define la visibilidad del cielo.

Id edificio	Lat <sub>1</sub>	Lon <sub>1</sub>	Lat <sub>2</sub>	Lon <sub>2</sub>	Longitud	Altura

Tabla 3. Parámetros de Modelos de Edificios.



Figura 23. Vista aérea de un escenario urbano con modelado de edificios en Murcia.

## 4.3. Modelado de los EEMaps.

## 4.3.1. Capa de carretera.

La creación de esta capa se lleva a cabo por medio de fotogrametría asistida por ordenador. Para ello, los autores crearon una herramienta web específica que se presenta en [60]. La aplicación utiliza la tecnología AJAX [61] para mantener la comunicación con el servidor, y contiene una base de datos donde se almacenan los descriptores de las figuras del mapa. Las imágenes utilizadas para llevar a cabo la tarea de la fotogrametría son suministradas por Google Maps, que ofrece una resolución de las imágenes de satélite adecuadas para este trabajo. Esta herramienta web es sencilla y rápida de usar sin perder exactitud. El proceso de elaboración de mapas explota un conjunto de herramientas de dibujo de la aplicación web que asisten en el proceso de dibujo manual de figuras en una imagen de mapa. Una visión general de la misma se muestra en la Figura 24.

## 4.3.2. Capa de elevación.

Uno de los aspectos clave en el proceso de modelado de mapas de elevación es la identificación de la información necesaria para representar fielmente los edificios.

En este trabajo, para construir el mapa de elevación se ha utilizado el Sistema de Coordenadas Mundial Geodésico de 1984 (WSG-84, *World Geodesic System of 1984*) ya que coincide con el sistema de coordenadas empleado por el receptor GPS. Sin embargo, para calcular la posición del usuario y determinar la visibilidad de los satélites en áreas urbanas se realizarán algunas conversiones al sistema de coordenadas cartesianas ECEF (*Earth- Centered Earth- Fixed*).



Figura 24. Vista de la herramienta web desarrollada para crear la capa de carreteras de un EEMap. A la derecha, la barra de herramientas y el asistente de dibujo; a la izquierda, el dibujo de mapas superponiendo la imagen aérea de un área urbana de Murcia.

Este sistema, también conocido como sistema de coordenadas geocéntrico, tiene su origen en el centro de masa de la Tierra y sus ejes rotan con ella. El eje Z se dirige directamente al norte a lo largo del eje polar y los ejes X e Y están en el plano ecuatorial con X dirigido hacia el meridiano de Greenwich (0° latitud, 0° longitud) y el eje Y 90° hacia el Este





Se han desarrollado dos métodos para extraer los parámetros de modelado de edificios reflejados en la Tabla 3. El primero de ellos, denominado "*Método basado en Imágenes de Edificios*" requiere una vista completa del edificio. Ésta se obtiene mediante la herramienta *Street Viewer* de Google Earth. El uso de esta herramienta permite obtener prototipos de manera rápida evitando la necesidad de llevar a cabo extensas campañas de recolección de datos para poder extraer las características de los edificios. Sin embargo, en ocasiones no es posible obtener una vista frontal completa de cualquier edificio mediante Google Earth. Por esta razón se propone un segundo método similar al anterior basado en el número de plantas que conforman el edificio. Este método se denomina "*Método basado en Plantas*" y consiste en aplicar la técnica anterior a imágenes de partes aisladas de edificios, tales como el bajo comercial o el primer piso. A continuación se describe cada uno de ellos y se establece una comparación entre ambos que demuestra la validez de ambos.

#### Método basado en Imágenes de Edificios

Para obtener la altura de los edificios de manera simple y eficiente se propone un algoritmo basado en procesado de imágenes de Google Earth. La primera etapa del método consiste en la adquisición de una vista frontal del edificio cuyas características se desean obtener mediante la herramienta *Street Viewer*. Una vez capturada dicha imagen, se implementa un algoritmo detector de Canny [62], que proporcionará una imagen de intensidad de bordes. Entonces, la información de la escena proporcionada por el modelo de pequeña escala obtenido con el detector de bajo nivel se usa para calcular la relación entre la longitud y la altura del edificio. Dado que es posible medir la longitud real de la fachada en la imagen aérea proporcionada por Google Earth (Figura 23), se puede realizar una extrapolación de dicha información para calcular la altura real del edificio. La Figura 26.a muestra una vista frontal de un edificio situado en la Avenida Juan Carlos I de Murcia, España. La imagen de bordes detectada se muestra en la Figura 26.b.

Tal y como se demostrará con posterioridad, los resultados experimentales muestran que el algoritmo anterior funciona correctamente en casos en los que es posible capturar una vista frontal completa del edificio con en la herramienta *Street Viewer* de Google Earth.

#### Método basado en Plantas:

La imagen frontal del edificios no siempre se encuentra disponible en Google Earth, especialmente en calles estrechas con visibilidad limitada en las cuales las únicas características visibles de los edificios se corresponden con las del bajo comercial o las del primer piso. En estos casos, es posible utilizar el algoritmo anterior para detectar los bordes correspondientes solamente a las partes del edificio disponibles y, posteriormente extrapolar las medidas al edificio completo simplemente teniendo en cuenta el número de plantas que lo forman. Dado que la altura de todas las plantas de un edificio es la misma, salvo la planta baja y, en caso de que exista el entresuelo , aplicando esta técnica es posible calcular la altura completa del edificio mediante la siguiente relación:

 $h = k1 \times s + k2$ 

donde s denota el número de plantas, k1 representa un valor de altura constante de un piso arbitrario y k2 es la suma de la altura del bajo comercial y de cualquier elemento extra no incluido en cualquiera de las plantas estándar del edificio. Ambos parámetros se obtienen mediante el método de estimación del detector de Canny descrito en el Anexo IV.



Figura 26. a) Vista frontal de un edificio cuyas características se desean extraer. b) Imagen

## 4.4. Validación de la propuesta de EEMap

El concepto de EEMap presentado anteriormente será válido siempre que la información almacenada en él sea lo suficientemente precisa y el uso de la memoria no sea excesivo. A continuación se realizará un estudio sobre ambos parámetros.

de intensidad de bordes después de aplicar el algoritmo de Canny.

## 4.5.1. Precisión.

#### - Capa de carretera.

El propósito principal de esta capa es describir las vías urbanas con una mejor precisión que los mapas estándar basados en polilíneas. En particular, puesto que el área a ser mapeada se modela con las figuras que se adaptan a la forma de la carretera, los bordes de las carreteras se definen con mucha más exactitud. Esto resulta interesante para algoritmos de posicionamiento de vehículos y *map-matching*.

La precisión final de un EEMap depende de varios factores:

- La calidad y la precisión de la imagen aérea. La herramienta web descrita anteriormente para la creación del EEMap emplea Google Maps. En las pruebas realizadas en varias ciudades de España, su calidad se ha encontrado suficiente para lograr al menos una precisión inferior al metro en el borde de la carretera. Aunque puede haber algunos errores absolutos causados por desviaciones en la vista aérea, en las pruebas realizadas no se encontraron errores significativos. Sin embargo, la solución de este problema está fuera del alcance de este trabajo. Por otro lado, en ciertas ocasiones, los árboles y otros objetos pueden bloquear la vista del borde de la carretera, aunque estas situaciones son bastante inusuales.
- Limitaciones del modelo. Las figuras elegidas por los autores fueron seleccionadas porque permiten representar la forma de la carretera con una alta precisión y se complementan entre sí. Además, la complejidad computacional de determinar si ciertas coordenadas UTM se encontraban dentro de las figuras también se tuvo en consideración. Debido al número limitado de figuras, puede haber situaciones en las que la idoneidad no es óptima. Aunque estas situaciones son inusuales en los entornos urbanos, es posible lograr la exactitud deseada modelando la carretera mediante dibujo libre, en cuyo caso el polígono introducido por el usuario se rompe automáticamente en un número óptimo de triángulos.
- Las habilidades del usuario. Al igual que con cualquier otro proceso realizado por el hombre, las capacidades del usuario para desarrollar las mejores estrategias sobre la herramienta Web EEMap condicionarán la calidad final del mapa, aunque el uso de la misma es sencillo.

Los beneficios alcanzados en términos de precisión a la hora de caracterizar las vías urbanas con el modelo EEMap en comparación con los mapas convencionales basados en polilíneas dependen de la zona en estudio, la forma de su calzada y la calidad de los mapas estándar allí.

La Figura 27 (a) muestra un ejemplo de un área interesante cerca de una rotonda. En la imagen superior, el EEMap (en azul) está superpuesto sobre la vista aérea de la zona. En la imagen inferior, el mapa basado en polilíneas se muestra junto con las figuras geométricas del EEMap en azul. Se puede observar que el mapa basado en polilíneas presenta ciertas inexactitudes a partir de la mitad de la calle, lo que añadiría errores adicionales al proceso de *map-matching*. También existen algunos errores en zonas señaladas con flechas rojas en la imagen.

La Figura 27 (b) muestra otro ejemplo de esta situación. En la parte inferior de la imagen, los carriles en la dirección de derecha a izquierda se representan en el mapa comercial con una línea central común (línea negra sólida) y el ancho de la carretera (línea negra discontinua). Los dos caminos de intersección también se representan de la misma manera. El EEMap de esta área se superpone en verde. Las áreas marrones son coincidencias entre el mapa comercial y el EEMap.

Se observa a simple vista que suponer un ancho de carril fijo deriva en importantes imprecisiones que afectan posteriormente al algoritmo de posicionamiento. En cambio,

el modelado con EEMap es más preciso y, en líneas generales se ajusta de manera satisfactoria a la geometría de la carretera.



Figura 27. (a) Superior:. Vista aérea del escenario en estudio con EEMap superpuesto (en azul); Inferior: Inexactitudes del mapa basado en polilíneas con un EEMap superpuesto (en azul). (b) Negro: línea central del mapa basado en polilíneas. Rojo: Imprecisiones cometidas en el supuesto de un carril de ancho fijo junto con la imprecisión de la mitad de carril. Líneas de trazos negras: límite de los carriles. Verde: EEMap superpuesto.

#### - Capa de elevación.

Dentro del proyecto CityVip se ha llevado a cabo un proceso de validación del modelado de edificios mediante EEMaps descrito en este trabajo. Para ello, se ha realizado un estudio comparativo entre éste y el modelado BATI 3-D presentado en [31]. Este último está basado en el uso de un SIG embebido y dedicado desarrollado por el SME BeNomad francés que contiene datos 3D precisos del entorno previamente adquiridos y preprocesados por el IGN mediante imágenes aéreas de alta resolución, completadas con imágenes terrestres obtenidas mediante mapeo móvil. Este producto solamente se encuentra disponible para algunas ciudades francesas, pero los autores afirman que se extenderá a la mayoría de las ciudades francesas bajo el nombre de BATI 3-D. En cuanto al SIG de BeNomad, emplea un nuevo formato de datos binarios compatible con la baja capacidad de potencia y memoria de los sistemas embebidos. Su arquitectura, ha sido diseñada para el desarrollo de aplicaciones tales como navegación por carretera o control de flotas.

En primer lugar y, con objeto de validar el proceso de creación de elevación de los EEMaps, se han empleado las técnicas descritas en el apartado anterior para calcular las alturas de un subconjunto de edificios situados en Murcia. La Tabla 4 muestra algunos resultados obtenidos. Como puede observarse en la Figura 28, la diferencia entre las alturas obtenidas con ambos métodos es ligeramente diferente, con un error relativo inferior al 1% y un error medio de un 0.48%. Se puede afirmar por tanto que los resultados son coherentes.

Id Edificio	Método 1	Método 2	Error absoluto	<b>Error Relativo</b>
1	26.27	26.36	0.09	0.0034
2	38.99	38.70	0.29	0.0074
3	26.65	26.85	0.20	0.0075
4	25.07	25.01	0.06	0.0025
5	19.92	19.98	0.06	0.0033

Tabla 4. Comparación de Estimaciones de las Alturas entre el método basado en imágenesde edificios y el método basado en plantas.



#### Figura 28. Error relativo entre las alturas de 5 edificios calculadas por el método basado en imágenes de edificios y el basado en plantas.

Para evaluar la bondad de las alturas de los edificios obtenidas siguiendo la metodología presentada en esta tesis se ha realizado una comparación entre los resultados obtenidos en ella y los datos del IGN Batimap francés. Las diferencias en diez edificios de Francia se muestran en la Tabla 5 y en la Figura 29.

Id Edificio	Método basado en Imágenes	Modelo IGN Batimap francés	Error absoluto	Error Relativo
1	13.40	13.98	0.58	0.043
2	15.32	15.89	0.57	0.037
3	15.20	15.16	0.33	0.002
4	15.60	15.71	0.11	0.007
5	14.29	14.62	0.33	0.023
6	5.79	6.06	0.27	0.047
7	15.71	15.42	0.29	0.018
8	14.99	15.39	0.40	0.027
9	7.60	7.06	0.54	0.071
10	14.66	15.28	0.62	0.042

Tabla 5. Comparación de Estimaciones de las Alturas con el modelo IGN Batimap francés.

Se puede observar que las alturas son siempre coherentes, y la diferencia relativa entre ambos conjuntos de datos es siempre inferior a 0,05 con una media de 0.032. En términos absolutos, las diferencias máximas son alrededor de medio metro. Por otro lado, cabe destacar, que a lo largo de la tesis se ha trabajado en varios escenarios de diferentes características obteniéndose siempre resultados coherentes.



Figura 29. Error relativo entre las alturas obtenidas mediante el método basado en imágenes y el modelo IGN Batimap francés.

## 4.5.2. Uso de memoria.

#### - Capa de carretera.

Con respecto a la memoria de almacenamiento de mapas, los EEMaps por lo general requieren más memoria que los sistemas cartográficos convencionales. Esto se debe a que se necesita una mayor cantidad de descriptores de datos.

Un ejemplo de esto puede verse en la Figura 30 a. En este ejemplo se ha realizado una comparación numérica entre un mapa basado en polilíneas y el EEMap. Para ello, se supone que polilíneas emplean cuatro descriptores (X, Y, Z y con ancho de banda) para describir los tramos entre los nodos y / o forma puntos (separados por guiones negros en la imagen de la Figura 30 a), con la excepción de la última sección que también tendrá tres valores adicionales, X, Y, Z, correspondiente al final de la polilínea.

La tabla 6 muestra los resultados de esta comparación. Si bien se necesitan 264 valores para describir esta área con el EEMap, el mapa basado en polilínea requiere sólo 78 valores. Sin embargo, dependiendo de la forma de la carretera, el uso de los EEMaps puede conducir a una reducción de la cantidad de uso de la memoria, como se observa en la Tabla 7 y en la Figura 32. Ambas muestran los resultados obtenidos al llevar a cabo el mismo análisis realizado en la Tabla 6, pero esta vez para la imagen que se presenta en la Figura 30 b. En este caso, sólo se necesitan 36 valores para describir la rotonda con los nuevos mapas mejorados, mientras que se necesitan 123 valores con el fin de hacer una descripción basada en polilíneas.



Figura 30. a) situación donde el uso del EEMap conduce a un aumento en los requisitos de memoria. Imagen de la izquierda: mapa basado en polilíneas donde los guiones negros indican nodos; Imagen de la derecha: EEMap de la misma zona. (b) Ejemplo de una zona de rotonda basada en EEMap en la cual se utiliza un menor número de figuras que en el mapa basado en polilíneas. Imagen de la izquierda: mapa basado en polilíneas con rayas negras que separan las líneas en los nodos; Imagen de la derecha: EEMap de la derecha: EEMap de la misma área que utiliza menos parámetros.

Tipo de mapa	Elemento	Descriptores por elemento	Descriptores totales
Basado en	29 segmentos	4	78
polilíneas	6 segmentos finales	7	70
	10 Trapecios	8	
EEMap	18 Triángulos	9	264
	2 Puntas de flecha	11	

Tabla 6. Comparación del número de parámetros necesarios para describir la imagen dela Figura 23 a) con polilíneas y con EEMap.

Tipo de mapa	Elemento	Descriptores por elemento	Descriptores totales
Basado en	29 segmentos	4	122
polilíneas	1 segmento final	7	125
EEMap	4 Sectores circular	9	36

# Tabla 7. Comparación del número de parámetros necesarios para describir la imagen dela Figura 23 b) con polilíneas y con EEMap.

#### - Capa de elevación.

La memoria necesaria para almacenar la capa de elevación de un EEMap depende de la densidad de los edificios en el área considerada. Dado que los objetivos de este trabajo se centran en el estudio y análisis de escenarios urbanos, consideremos el caso de un área urbanizada denso.

A lo largo de un kilómetro de la calle en el centro de la ciudad de Murcia, contamos con 139 fachadas pertinentes teniendo en cuenta ambos lados de la carretera. Para este conteo, fachadas relevantes son los que podrían bloquear la visión directa de un satélite GPS de un receptor instalado en un vehículo en esta carretera. Típicamente, para un edificio con cuatro fachadas, sólo tres son relevantes ya que el cuarto se esconde detrás de los otros tres. Cada fachada necesita ocho parámetros de acuerdo con la Tabla 3, que se traduce en 1.112 parámetros por kilómetro en un escenario urbanizado muy denso.



Figura 31. Número de descriptores totales necesarios para describir la imagen de la Figura 23 a) con polilíneas y con EEMap.



Figura 32. Número de descriptores totales necesarios para describir la imagen de la Figura 23 b) con polilíneas y con EEMap.

En la actualidad, algunos modelos 3D almacenan gran volumen de datos debido al nivel de detalle que contienen. Esto hace que el tiempo de procesado del sistema aumente y la velocidad de cómputo se ralentice significativamente. En esta tesis, el hecho de que solamente sea necesario almacenar ocho parámetros por edificio en la capa de elevación hace que esta implementación del entorno sea compatible con aplicaciones de posicionamiento en tiempo real, dotando de rapidez de cálculo al posterior algoritmo de detección NLOS.
# 4.5. Conclusiones.

En este capítulo se ha presentado un nuevo concepto de EEMap. Éste consta de dos capas, la capa de carretera y la capa de elevación. Aunque esta tesis se centra en el desarrollo de la segunda, se ha realizado un cálculo de la eficiencia computacional del mismo en términos de uso de memoria y descriptores necesarios para su construcción. Los resultados obtenidos muestran idoneidad de dicho mapa para su uso en aplicaciones en tiempo real debido a su bajo coste computacional.

Por otro lado, se ha desarrollado la construcción de la capa de elevación a través de imágenes aéreas y frontales proporcionadas por Google Maps. Se han presentado dos métodos para la determinación de la altura de los edificios colindantes y las alturas obtenidas a partir de ambos se han contrastado con las estimada tras aplicar un tercer método desarrollado a partir de imágenes proporcionadas por el IGN francés obteniendo resultados muy similares.

Los resultados obtenidos permiten por tanto afirmar que se ha conseguido uno de los objetivos fundamentales de esta tesis: proponer un mapa eficiente en cuanto a volumen de datos y de construcción sencilla orientado a apoyar la navegación por satélite.

# Capítulo 5

# Algoritmo de Detección NLOS

### 5.1. Introducción.

Los receptores GNSS actuales suelen disponer de mecanismos de rechazo del multitrayecto mediante circuitos integrados, sin embargo, las antenas de parche de bajo coste incluidas en sus equipos siguen siendo altamente sensibles a cualquier señal, ya sea ésta directa o reflejada. Por este motivo, es de vital importancia prestar atención no sólo al diseño del hardware, sino también al de los algoritmos GNSS.

Algunos fabricantes optan por usar antenas de anillo estrangulador (*choke ring antennas*) que intentan reducir la intensidad de las señales reflejadas. Sin embargo, el haz de este tipo de antenas debe orientarse en una dirección dada, lo que hace que esta técnica sea muy limitada o poco práctica en entornos con trayectos múltiples, en los cuales las señales se reflejan desde diversas direcciones.

El problema de detección del multitrayecto, por tanto, puede abordarse desde diversas vertientes. Una de ellas y, en la cual se centra esta tesis, está basada en el uso de mapas digitales. Sin embargo, existen otras soluciones tales como las técnicas FDE y RAIM, detalladas a continuación.

En este capítulo, se describen los algoritmos desarrollados tanto para el cálculo de la visibilidad de los satélites como del posicionamiento del receptor. La combinación de ambos con la generación de los EEMaps explicados en el capítulo anterior supone una novedosa técnica en el campo de la detección del multitrayecto y del posicionamiento basado en sistemas GNSS en entornos urbanos.

Con el fin de facilitar la comprensión y utilidad de los algoritmos presentados, es necesario definir algunos conceptos previos sobre mecánica orbital.

# 5.1.1. Detección NLOS basada en mapas digitales.

En la actualidad, son numerosos los avances en el campo del estudio de la visibilidad de los satélites basado en mapas digitales. En ellos, generalmente se parte de la información 3D almacenada en un mapa para llevar a cabo diversas implementaciones que permitan clasificar las señales procedentes de los satélites según sean LOS o NLOS. Una de las técnicas más novedosas se detalla en [32]. En este trabajo, se propone una solución basada en un proceso que los autores denominan de coincidencia de sombras. Para ello, en primer lugar, obtienen una posición aproximada del receptor mediante pseudodistancias GNSS. A partir de dicha posición, definen un área de búsqueda generando un conjunto de posibles posiciones del usuario cercanas a la posición inicial aproximada. En cada una de estas posiciones se predice la visibilidad del receptor a partir de información 3D del entorno y se realiza un estudio de las posibles zonas que un edificio puede bloquear, según las sombras que proyecte. A continuación, se considera que la posición más precisa es la solución de coincidencia de sombras dentro de esa área respecto a la posición medida. Para llevar a cabo esta técnica es necesario conocer una posición aproximada del receptor. Esto, no siempre es posible, especialmente en cañones urbanos donde las señales procedentes de los satélites pueden llegar a perderse durante algunos segundos o incluso minutos.

Centrándose en experimentos simulados, los autores de [35] calculan la posición del receptor a partir de simulaciones del error de multitrayecto usando para ello un modelado 3D de la superficie de cada edificio. Para estimar las posibles posiciones utilizan un filtro de partículas.

Otros trabajos, basados en una caracterización tridimensional del entorno, apuestan sin embargo por una integración de INS y filtros débilmente acoplados [37].

En [38] y [65] se realiza una estimación del recorrido de las señales afectadas por multitrayecto partiendo del conocimiento de la superficie sobre la cual se ha producido la reflexión. Para predecir las trayectorias geométricas de las señales en situación de NLOS emplean un Filtro de Kalman Extendido (EKF) complementado con un modelo 3D del escenario. La simulación de la posible recepción de las señales se realiza a partir del software SE-NAV, desarrollado por la compañía OKTAL-SE [66].

En otra línea, los autores en [39] proponen una solución al problema mediante intervalos de confianza y un filtro débilmente acoplado. En este caso, en lugar de generar un mapa 3D completo, se trabaja con restricciones y se delimita lo que los autores llaman el área "conducible", que ellos mismos definen como el área a lo largo de la cual puede situarse el vehículo. Este área se representa en un software de diseño mediante un mallado compuesto por triángulos. Posteriormente, se realiza un estudio estadístico de las posibles posiciones que puede ocupar el vehículo dentro de la misma teniendo en cuenta las pseudodistancias GPS y las restricciones subyacentes en ellas.

Otra propuesta presentada por [40] consiste en aplicar un algoritmo de detección de multitrayecto basado en la construcción dinámica de mapas 3D en tiempo real. Éste combina además datos GPS y GLONASS con una integración débilmente acoplada de medidas odométricas del vehículo.

Los autores de [41] abordan el problema de forma inversa; en lugar de usar los datos almacenados en el mapa 3D para determinar la posición del receptor, emplean la información de la posición actual para contribuir a la construcción del entorno.

En [29] y [43], por ejemplo, utilizan mapas 3D para detectar las señales procedentes de los satélites en situación NLOS. Para ello, emplean una cámara a bordo del vehículo con objeto de determinar los puntos críticos de un edificio a partir de los cuales la señal deja de llegar mediante rayo directo al receptor. Es necesaria, por tanto una fase de preprocesado de datos en la cual se capturan las imágenes del escenario para posteriormente analizarlas.

La idea fundamental de [42] consiste, en cambio, en comparar los retardos procedentes de las señales NLOS, predichos mediante el uso de un modelo de ciudad 3D, con los retardos observados por el receptor, estudiando la correlación entre ellos. Los datos 3D de la ciudad son, en este caso, adquiridos por los autores a una compañía cartográfica externa.

Algunos trabajos como [54] introducen la idea de crear un mapa de los obstáculos que impiden la visibilidad directa del cielo, en esta ocasión, aplicada al campo de los ferrocarriles.

En [55], se utilizó una cámara de infrarrojos de ojo de pez para asignar las posiciones de los satélites con respecto a los edificios de los alrededores. Marais en [56] abordó esta cuestión para el transporte guiado en entornos urbanos, utilizando también una cámara de ojo de pez en el vehículo y con el objetivo de construir en tiempo real un modelo 3D a partir de las imágenes sucesivas.

Más recientemente, se emplean modelos 3D de ciudades para desarrollar aplicaciones móviles de posicionamiento en cañones urbanos para smartphones [44]. En esta dirección, los autores de [45] presentan un método de rectificación de la posición mediante modelos de ciudades 3D y simulación de trazado de rayos. Éste hace uso de un filtro de partículas para estudiar la probabilidad de cada posible solución.

# 5.1.2. Otras técnicas de detección de multitrayecto.

Existen otras técnicas en las cuales se prescinde de la información del entorno para detectar y mitigar el efecto del multitrayecto. Algunos estudios se centran en cuestiones relacionadas con la parte de radiofrecuencia de los receptores, el efecto del multitrayecto en la información de las pseudodistancias y las medidas de fase de la portadora [66, 67]. En este campo, se han realizado numerosas simulaciones para abordar este problema [68, 69].

En otros trabajos, también se ha recurrido al uso de altímetros y relojes de precisión [70, 71] para obtener información adicional. Por otro lado, otros autores han integrado la medición GPS con sistemas de navegación inercial (INS) para proporcionar servicios de posicionamiento continuo [72, 73].

Tal y como se explicaba en el capítulo 2, también es posible aumentar el número de satélites visibles combinando los sistemas GPS y Galileo [74, 75] o usando técnicas SBAS [76].

Dado que la duración del bloqueo de una señal en un entorno urbano puede ser corta para un vehículo en movimiento, otros autores apuestan por suponer constantes algunos

parámetros tales como la una altitud, la velocidad del vehículo, o la variación de las pseudodistancias durante dicho período de tiempo. Con estas restricciones, se podría resolver el cálculo del posicionamiento incluso cuando el número de satélites disponibles fuera menor que 4. Los autores de [77, 78] suponen una altitud constante, transformando el problema de posicionamiento en un problema 2D, de manera que es suficiente con conocer el valor de tres pseudodistancias. En [79] se propone un modelo esférico con altitud constante en el cual se resuelve una ecuación cuártica con respecto al elipsoide de la Tierra. Esta última es más precisa pero requiere más recursos computacionales, lo que la hace difícilmente aplicable en problemas de posicionamiento en tiempo real.

La integridad, constituye uno de los parámetros fundamentales para medir la calidad de un sistema de localización. En esta sentido, es necesaria la eliminación de los satélites que proporcionan datos erróneos al receptor. Una de las técnicas más extendidas en esta dirección es la técnica RAIM (*Receiver Autonomous Integrity Monitoring*).

La tecnología RAIM [80, 81] se basa en la comparación de la información y el tiempo obtenidos de diversas combinaciones de cuatro satélites en un conjunto de al menos 5 satélites visibles y con geometría satisfactoria. Con cuatro satélites, el receptor es capaz de calcular la posición, pero no de proporcionar integridad. En cambio, con cinco satélites, se podría utilizar diferentes combinaciones de 4 satélites cada una y detectar una anomalía. De esta forma, es posible detectar si un satélite está afectado por multitrayecto y dar un aviso. Sin embargo, el principal problema de esta técnica es que no efectúa la cancelación de dicho satélite, por lo cual es necesario disponer de otro método que sí lo haga.

El sistema FDE (*Fault Detection and Exclusion*) es capaz de excluir el satélite detectado como NLOS, basándose primeramente en un algoritmo RAIM. Para ello necesita al menos 6 satélites.

No obstante, ninguna de estas técnicas descritas funciona correctamente en los típicos cañones urbanos, donde la disponibilidad de satélites es baja y el problema del multitrayecto puede dar lugar a varias medidas erróneas al mismo tiempo. Los autores de [82] sugieren un enfoque alternativo al FDE estándar, consistente en una caracterización del error de posicionamiento y la provisión de un nivel de protección con todos los satélites visibles. En este método son necesarios al menos cinco satélites. También en [83] se propone una técnica FDE distinta, basada en el uso de un filtro de Kalman y se realiza una comparativa de los resultados, tanto reales como simulados, obtenidos con ella y con el sistema RAIM tradicional.

# 5.2. Definición de los ángulos de acimut y elevación.

Para proporcionar la mejor y más precisa solución de navegación, la constelación satelital debe tener unas propiedades geométricas adecuadas. Por un lado y tal y como se explicaba en el capítulo 2 de esta tesis, debe de presentar un valor del DOP adecuado; por otro, debe cumplir unos límites dentro de los valores de los ángulos de acimut y elevación. Estos ángulos se detallan a continuación, pero primeramente es necesario definir el concepto de *punto subsatelital*:

### Punto subsatelital.

Es la intersección sobre la superficie terrestre de la línea que une la posición del satélite en órbita con el centro de la Tierra. Sus coordenadas son:

- *Ls*: Latitud del punto subsatelital en grados.
- *ls*: Longitud del punto subsatelital en grados.

Para satélites geoestacionarios el punto subsatelital está en el ecuador ( $Ls=0^{\circ}$ ) en alguna longitud determinada.

En términos de las coordenadas  $(x_r, y_r, z_r)$  del sistema rotatorio se puede determinar la latitud del punto subsatelital como sigue:

$$L_{s} = 90^{\underline{o}} - \cos^{-1} \left[ \frac{z_{r}}{\sqrt{x_{r}^{2} + y_{r}^{2} + z_{r}^{2}}} \right]$$

Por otro lado, la longitud,  $l_s$  depende del cuadrante en el cual esté situado el punto  $(x_r, y_r)$  y se calcula según las siguientes expresiones:

$$l_{s} = \begin{cases} -\tan^{-1}\left(\frac{y_{r}}{x_{r}}\right), & y_{r} \geq 0 \quad y \quad x_{r} \geq 0 \quad (Primer\ cuadrante) \\ 180^{\circ} + \tan^{-1}\left(\frac{y_{r}}{|x_{r}|}\right), & y_{r} \geq 0 \quad y \quad x_{r} \leq 0 \quad (Segundo\ cuadrante) \\ 90^{\circ} + \tan^{-1}\left(\left|\frac{y_{r}}{x_{r}}\right|\right), & y_{r} \leq 0 \quad y \quad x_{r} \leq 0 \quad (Tercer\ cuadrante) \\ \tan^{-1}\left(\frac{|y_{r}|}{x_{r}}\right), & y_{r} \leq 0 \quad y \quad x_{r} \geq 0 \quad (Cuarto\ cuadrante) \end{cases} \end{cases}$$

### • Acimut.

Es la distancia angular horizontal a una dirección de referencia, que puede ser el punto sur o norte del horizonte. Se define como el ángulo horizontal de apuntamiento de una antena de estación terrestre. Para navegación, este ángulo puede medirse en grados desde el norte verdadero, en el sentido de las manecillas del reloj.

La Figura 33 muestra el ángulo de acimut  $A_z$  de la señal procedente de un satélite, medido desde la estación terrestre según la horizontal en la ubicación de la misma.

### Elevación.

Es el ángulo entre la línea satélite-terminal y el plano tangente a la superficie terrestre en la localización de la estación terrena.

El nivel de cobertura GPS es caracterizado según el número de satélites visibles que se encuentran por encima de un ángulo mínimo de elevación en una determinada región. Generalmente, las señales recibidas con un ángulo de elevación pequeño tienden a experimentar con mayor probabilidad el efecto del multitrayecto, mientras que aquellas recibidas con un ángulo de elevación mayor no son tan propensas a sufrirlo. Paradójicamente, las señales con menores ángulos de elevación suelen contribuir positivamente al valor del DOP, mejorando la geometría de la constelación. Esto hace que, a pesar de que muchas de ellas sufran de multitrayecto, en ocasiones se incentive el uso de las mismas, ocasionando errores graves en el cálculo del posicionamiento.



Figura 33. Representación del ángulo de acimut de un satélite.



Figura 34. Representación del ángulo de elevación de un satélite.

En este sentido, las contribuciones presentadas en esta tesis son de especial interés. En ella, se estudia una solución que abarca los aspectos más relevantes a tener en cuenta a la hora de proporcionar la solución GPS: los ángulos de elevación y acimut de los satélites, la visibilidad de las señales en el entorno y la geometría de la constelación resultante.

La Figura 34 muestra la representación del ángulo de elevación de un satélite  $E_s$  según la ubicación de la estación terrestre. En ella, también se puede observar el punto subsatelital, explicado con anterioridad.

# 5.3. Descripción del proceso de posicionamiento.

En esta tesis, se propone una novedosa solución para el cálculo del posicionamiento en entornos urbanos con visibilidad limitada. Ésta viene dada a partir de un proceso de posicionamiento en el cual se diferencian las siguientes etapas:



Figura 35. Etapas del proceso de posicionamiento.

La primera de ellas, consistente en el modelado 3D del entorno, se ha detallado en el capítulo 4.

En la segunda etapa, se aplica el algoritmo que detecta si un satélite se encuentra en LOS o en NLOS. Este algoritmo se denominará en lo sucesivo *Algoritmo de Detección NLOS*. Los datos de entrada para este proceso son las medidas de los satélites (posiciones y pseudodistancias), el Mapa de Elevación digital Mejorado (*EEMap*) y una estimación de la posición del vehículo obtenida, por ejemplo, mediante un filtro de Kalman Extendido (*EKF*). A continuación, se descartan los satélites que no tengan línea de visión directa con el vehículo y solamente se tendrán en cuenta los satélites en LOS como entradas para la segunda etapa. Esta segunda etapa consistirá en la resolución del problema GPS mediante un algoritmo que estudiará la calidad de la geometría resultante y proporcionará la posición de la antena.

La Figura 36 muestra esquemáticamente el flujo del proceso propuesto para proporcionar posiciones libres del efecto del multitrayecto. A continuación se describe cada una de las etapas del proceso de manera detallada.

# 5.3.1. Algoritmo de detección NLOS.

El algoritmo de detección del multitrayecto se ha desarrollado con la finalidad de rechazar eficientemente aquéllos satélites que no se encuentren en línea de visión directa con el receptor y tener en cuenta solamente los satélites que sí lo están.



Figura 36. Esquema de flujo del proceso de posicionamiento.

En la Figura 37 se puede observar el problema gráficamente. Esta imagen representa una circunstancia frecuente en un etorno urbano. El receptor, supuesto a bordo del vehículo, intenta recibir la señal procedente del satélite  $S_i$ . Esto no es posible dado que el edificio  $B_j$  la obstaculiza. En este caso, si dicha señal es recibida, nunca va a ser de forma directa, sino que llegará a éste después de experimentar sucesivos rebotes en las superficies de otros edificios colindantes. Este hecho derivará en un aumento significativo del valor de su pseudodistancia y, con total seguridad se producirá un error en el proceso de trilateración satelital llevado a cabo para el cálculo de la posición.

La idea fundamental del algoritmo de detección NLOS es definir lo que se denominará en lo sucesivo el *intervalo de bloqueo*. Este intervalo comprenderá los valores de los ángulos de acimut y elevación dentro de los cuales un determinado edificio bloqueará la señal procedente de un satélite impidiendo así que ésta alcance al receptor de forma directa.

Para determinar el intervalo de bloqueo causado por un obstáculo cercano el receptor, son necesarios los siguientes parámetros:

- Los ángulos de elevación y acimut de cada satélite. Estos ángulos son calculados a partir de las coordenadas del satélite en cada instante temporal.
- La altura de los edificios almacenados en el EEMap. Éstas se obtienen mediante cualquiera de los dos métodos presentados en el capítulo 4 de esta tesis; ambos basados en la implementación de un algoritmo de detección de bordes.
- Las coordenadas de cada una de las esquinas superiores de la fachada de los edificios modelados mediante el EEMap. Estas coordenadas se obtienen a partir del software cartográfico Google Earth, detallado en el capítulo 3.

La Figura 37 muestra los ángulos de acimut y elevación para los cuales el edificio  $B_j$  bloquea la señal procedente del satélite  $S_i$ . Para determinar el valor de dichos ángulos se seguirá el proceso que se detalla a continuación.



Figura 37. Concepto de EEMap para detección NLOS.

En lo que sigue se hace referencia a los subíndices i y j para referirse a un satélite en particular o a un edificio respectivamente. Denotando  $E_{si}$  y  $A_{si}$  a los ángulos de elevación y acimut del satéite *i-ésimo*, se calcula el ángulo de elevación del satélite *i* de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\cos(E_{si}) = \frac{\sin(\gamma)}{\left[1 + \left(\frac{r_e}{r_{si}}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{r_e}{r_{si}}\right) \cdot \cos(\gamma)\right]^{\frac{1}{2}}}$$
(1)

siendo:

$$\cos(\gamma) = \cos(L_e)\cos(L_{si})\cos(l_{si} - l_e) + \sin(L_e)\sin(L_{si})$$
(2)
dende:

donde:

- $r_{si}$  = vector desde el centro de la Tierra al satélite i.
- $r_e$  = vector desde el centro de la Tierra a la estación terrena.
- $\gamma =$ ángulo con respecto al centro de la Tierra entre el punto del subsatélite y el borde de cobertura (ver Figura 29).
- $L_{si}$  = Latitud del satélite i.
- $l_{si}$  = Longitud del satélite i.
- $L_e$  = Latitud de la posición de referencia.
- $l_e$  = Longitud de la posición de referencia.

Al encontrarse la estación terrenal, el centro de la Tierra, el satélite y el punto subsatelital en el mismo plano, el ángulo de acimut  $A_{si}$  de la estación terrena al satélite *i* es el mismo que desde esta misma estación al punto subsatelital. Se mide hacia el este (en sentido de las agujas del reloj) desde el norte geográfico hasta la posición del punto subsatelital.

Para poder determinar el ángulo de acimut  $A_{si}$  se recurre al cálculo de un ángulo intermedio  $\alpha$  para, seguidamente, determinar realizar una corrección de cuadrante. De este modo se obtiene el acimut  $A_{si}$  entre 0° y 360°. Aplicando las relaciones de trigonometría esférica se tiene:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[ \frac{\tan[(l_{si} - l_e)]}{\sin(l_e)} \right]$$
(3)

Por último, el ángulo de acimut para cada satélite  $A_{si}$  se obtiene de la siguiente manera:

- Caso 1:Posición actual en el Hemisferio Norte con:
  - a) Satélite al Sureste (SE) de la estación terrestre:  $A_{si} = 180^{\circ} \alpha$
  - b) Satélite al Suroeste (SO) de la estación terrestre:  $A_{si} = 180^{\circ} + \alpha$

#### - Caso 2: Posición actual en el Hemisferio Sur con:

- a) Satélite al Noroeste (NE) de la estación terrestre:  $A_{si} = \alpha$
- b) Satélite al Noroeste (NO) de la estación terrestre:  $A_{si} = 360^{\circ} \alpha$

Una vez conocidos los ángulos de elevación y acimut de cada satélite, es necesario calcular los ángulos de elevación  $(E_{bnj})$  y acimut  $(A_{bj})$  de cada uno de los edificios colindantes y así, poder determinar el intervalo de ocultación del edificio j-ésimo respecto al satélite i-ésimo.

Estos ángulos se calculan de la siguiente forma:

$$E_{bnj} = \cos^{-1} \frac{\overline{P_r C_{nj}} \cdot \overline{P_r C_{nsupj}}}{|\overline{P_r C_{nj}}| \cdot |\overline{P_r C_{nsupj}}|}$$
(4)

$$A_{bj} = \cos^{-1} \frac{\overline{P_r C_{1j}} \cdot \overline{P_r C_{2j}}}{|\overline{P_r C_{1j}}| \cdot |\overline{P_r C_{2j}}|}$$
(5)

con n = 1,2; denotando n cada uno de los vértices de las esquinas de la fachada del edificio *j* donde:

- $\overline{P_r C_{nj}}$ : es el vector cuyo origen es el punto de referencia de la posición (P<sub>r</sub>) y extremo el punto que representa las coordenadas de la esquina inferior enésima del edificio j (C<sub>nj</sub>).
- $\overrightarrow{P_r C_{nsupj}}$ : es el vector cuyo origen es el punto de referencia de la posición (P<sub>r</sub>) y extremo el punto que representa las coordenadas de la esquina superior enésima del edificio *j* (C<sub>nsupj</sub>).
- $\overrightarrow{P_r C_{1j}}$  y  $\overrightarrow{P_r C_{2j}}$ : representan los vectores que unen el punto de referencia de la posición (P<sub>r</sub>) con los puntos que determinan las esquinas inferiores del edificio *j* más cercanas a la carretera (C<sub>1j</sub> y C<sub>2j</sub> respectivamente).

Denominando [ $\alpha_{1j}$ ,  $\alpha_{2j}$ ] al *intervalo de ocultación* de un determinado edificio *j* y [ $\alpha_{1svi}$ ,  $\alpha_{2svi}$ ] al *intervalo de visibilidad* del satélite *i* con respecto al edificio *j* se puede determinar si el satélite se encuentra o no en situación de NLOS de la siguiente forma:

```
if [\alpha_{1 svi}, \alpha_{2 svi}] \leq [\alpha_{1j}, \alpha_{2j}]
then => Satellite i is in NLOS
else if [\alpha_{1 svi}, \alpha_{2 svi}] > [\alpha_{1j}, \alpha_{2j}]
then => Satellite i is in LOS
end
```

Aplicando este concepto para cada edificio situado alrededor de la estimación inicial de la posición del receptor, es posible determinar en cada instante la visibilidad de los satélites detectados. Esto permitirá descartar aquellos que no lleguen al receptor de forma directa, excluyendo las medidas de sus pseudodistancias durante el proceso de cálculo de la posición.

El esquema de la Figura 38 muestra los pasos llevados a cabo por el algoritmo de detección NLOS.



Figura 38. Esquema del algoritmo de Detección NLOS.

# 5.3.2. Algoritmo de cálculo de la posición.

Una vez conocidos y descartados los satélites cuya señal se ve afectada por el efecto del multitrayecto, se procede al cálculo de la solución GPS. En esta tesis y, previamente a esta etapa, se realiza un estudio del DOP.

Tal y como se ha explicado en el capítulo 2, la eliminación de un satélite de la constelación genera una nueva geometría. Ésta puede o no ser apta para llevar a cabo el proceso de trilateración satelital. Por este motivo, resulta importante disponer de algún mecanismo que informe de la calidad de la misma. En el Anexo 3 se detalla el pseudocódigo del algoritmo DOP.

En aquellos casos en los que la geometría de la nueva constelación sea la adecuada, se procederá a resolver el problema del posicionamiento. Para llevar a cabo el cálculo de la posición del receptor se han desarrollado dos aproximaciones diferentes: el **algoritmo de Mínimos Cuadrados** (LSQ, *Least Squares*) y la **aproximación de Bancroft**, ambos

descritos en los Anexos I y II respectivamente. El uso de dos algoritmos de posicionamiento distintos ayuda a evitar la posible influencia de las particularidades de un algoritmo concreto en los resultados.

Hay que destacar que para este trabajo no se han tenido en cuenta las correcciones ionosféricas y troposféricas para emular exclusivamente el funcionamiento del receptor GPS. Por este mismo motivo tampoco se ha explotado la constelación GLONASS.

### 5.4. Validación del algoritmo de detección NLOS.

Para poder evaluar el funcionamiento del algoritmo de detección NLOS y validar sus resultados, se ha realizado una comparación entre éste y un segundo método desarrollado por los autores dentro del marco del proyecto francés CityVIP [10]. Esta segunda propuesta se basa en el uso de un Sistema de Información Geográfica embebido desarrollado por la compañía francesa BeNomad y que contiene datos digitales 3D precisos del entorno, previamente adquiridos y procesados por el IGN.

### 5.4.1. Descripción del método BATI-3D.

El modelo 3D construido por el IGN es realizado a partir de imágenes aéreas de gran resolución (10 cm), completadas con imágenes terrestres adquiridas mediante una técnica conocida como *mobile mapping*.

El mapeo móvil o *mobile mapping* consiste en un sistema de cartografía embarcado en un vehículo que permite capturar y almacenar información geográfica precisa e imágenes de alta resolución mientras el vehículo se desplaza.

En cuanto al SIG de BeNomad, usa datos geográficos en formato binario y, su arquitectura está diseñada para el desarrollo de aplicaciones de navegación por carretera o control de flotas mediante el uso de un SDK (*Software Development Kit*). Concretamente, este software muestra una visión de los datos capturados por la cámara virtual y permite controlar los parámetros intrínsecos y extrínsecos de la misma. La Figura 39 muestra la imagen producida por la cámara y su ubicación en el vehículo.

Al igual que para el método basado en EEMaps, el primer paso de la solución presentada, consiste en determinar la posición geográfica de la antena. Para ello, los autores usan una interpolación de la trayectoria de referencia obtenida mediante un vehículo equipado con una unidad IMU, un receptor GPS/GLONASS y el odométro del vehículo trabajando a 100 Hz.

A continuación, se extraen los ángulos de acimut y elevación de la salida del receptor. Entonces, mediante el modelo 3-D embebido se determina el ángulo crítico impuesto por el entorno con respecto al ángulo de acimut del satélite. A través de la cámara virtual convenientemente configurada, el algoritmo determina el píxel crítico situado en el borde entre el cielo y la parte frontal del edificio. Éste servirá para posteriormente calcular el ángulo de elevación crítico y compararlo con el ángulo de elevación del satélite. Si éste es inferior al ángulo de elevación crítico del edificio, dicho satélite es clasificado como NLOS.



Figura 39. Imagen producida por la cámara virtual.

# 5.4.2. Presentación de los equipos utilizados en las pruebas experimentales.

Con objeto de validar el algoritmo de detección presentado en esta tesis y comparar los resultados proporcionados por éste con el método BATI-3D, se ha llevado a cabo un experimento a gran escala en el centro de la ciudad de Nantes. El entorno estudiado puede considerarse un entorno típico de problemas de multitrayecto, ya que contiene edificios de alrededor de 15 m de altura y calles estrechas de unos 15 m de máximo.

La campaña consistió en recorrer 5 veces en coche un mismo circuito de 10 km con una duración de 15 minutos y bajo 2 constelaciones diferentes.

Para llevar a cabo la campaña de pruebas se usó el vehículo VERT, representado en la Figura 40.

Este vehículo estaba equipado con:

• Una unidad MRT (*Measurement of Reference Trajectory*): Esta unidad contenía un sistema híbrido de navegación basado en la IMU LandINS. Básicamente, una

IMU combina el uso de acelerómetros y giróscopos para medir magnitudes tales como la velocidad, orientación o fuerzas del vehículo en donde se instala.

- Un receptor con frecuencia dual GPS/GLONASS: Novatel DLV3.
- Un odómetro contenido en el vehículo cuya frecuencia de trabajo era de 100 Hz. La principal función de cualquier odómetro es el cálculo de la distancia recorrida por el vehículo. A partir de ésta y, conociendo el tiempo empleado en recorrerla es posible determinar otras magnitudes tales como la velocidad del mismo.



Figura 40. Vehículo VERT del IFSTTAR de Nantes.

A partir de los datos proporcionados por la IMU se determinó la posición inicial de referencia. Otras pruebas realizadas en [12] demostraban que los errores verticales y horizontales obtenidos por el equipo MRT no excedían los 25 cm y 50 cm respectivamente en casos de pérdida de señal GPS durante 5 minutos. Se puede considerar, por tanto, una buena estimación de la posición inicial del vehículo.

# 5.4.3. Aplicación de ambos métodos y comparación de resultados en términos de detección NLOS.

Para validar el algoritmo de detección desarrollado en el presente trabajo, se han analizado los resultados obtenidos tras aplicar ambos métodos en un tramo del trayecto anteriormente mencionado. Concretamente, este estudio se limita a 250 m de longitud del norte de la Calle Fouré. La Figura 41 muestra el escenario en el que se han llevado a cabo los experimentos.

Previamente a la realización de las pruebas, se ha modelado la geometría de los edificios existentes a ambos lados de la carretera mediante Google Maps, siguiendo el procedimiento descrito en el capítulo 4.

Se han realizado dos sets de pruebas, el primero ha tenido lugar durante la mañana y el segundo por la tarde para así poder comparar también los resultados en un mismo escenario ante la presencia de dos geometrías satelitales diferentes.



Figura 41. Imagen del escenario de pruebas. Calle Fouré, Nantes.

La tabla 8, muestra un resumen comparativo de los datos recogidos en ambas baterías de pruebas (mañana y tarde) realizadas en el escenario anterior. Cabe destacar que el receptor ha detectado más de 4 satélites en el 100% de los casos. En estas detecciones, se incluyen aquellos satélites afectados por multitrayecto, los cuales son considerados como visibles erróneamente por parte del receptor para calcular la posición.

Tal y como se observa, a lo largo de un tramo de 250 m se han recogido aproximadamente 1000 observaciones y, éstas se han repetido bajo diferentes constelaciones. Este hecho puede permitirnos establecer conclusiones estadísticamente significantes.

La tabla 9 recoge la comparación entre los resultados obtenidos mediante el algoritmo de detección NLOS, basado en EEMaps y el método BATI-3D desarrollado por el IGN. Se puede observar que los resultados obtenidos tras la aplicación de ambos son consistentes, siendo este último mucho más sofisticado y necesitando más recursos para poder ser implementado.

	Test de mañana	Test de tarde
Duración de la prueba	25 "	30 "
Número de épocas a 4 Hz	101	121
Número de épocas en los que el receptor ha podido detectar 4 o más satélites	101 (100 %) Entre 7 y 10 satélites	121 (100 %) Entre 8 y 10 satélites
Número total de pseudodistancias observadas	800	1 080

#### Tabla 8. Características de las pruebas de validación

El algoritmo de detección NLOS presentado en esta tesis es, en líneas generales más conservador que el método BATI-3D ya que detecta un mayor número de satélites en NLOS que este último. Esto hace que el método BATI-3D disponga de mayor porcentaje de épocas con 4 o más satélites disponibles tras la eliminación NLOS.

Test de mañana	BATI 3D®	EEMap
Número de satélites NLOS detectados	258 (32.3 %)	311 (38.9 %)
Número de épocas con 4 o más satélites disponibles después de la eliminación NLOS	93 (92.0 %)	83 (82.0 %)
Test de tarde	BATI 3D® inside a GIS	EEMap
Número de satélites NLOS detectados	408 (37.8 %)	544 (50.4 %)
Número de épocas con 4 o más satélites disponibles después de la eliminación NLOS	115 (95.0 %)	89 (73.6 %)

# Tabla 9. Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D® y basado en EEMaps)

Las Figuras 42 y 43 muestran los resultados obtenidos con cada método en los tests realizados por la mañana y por la tarde respectivamente. Claramente, el modelo BATI-3D detecta un menor número de satélites afectados por multitrayecto que el algoritmo de detección NLOS.

La tabla 10 muestra las matrices de confusión de ambos métodos tanto en situación LOS como NLOS.

Test de mañana	LOS con EEMap	NLOS con EEMap
LOS con BATI 3D®	460 (57.5 %)	82 (10.3 %)
NLOS con BATI 3D®	29 (3.6 %)	229 (28.6 %)
Test de tarde	LOS con EEMap	NLOS con EEMap
LOS con BATI 3D®	483 (44.7 %)	189 (17.5 %)
NLOS con BATI 3D®	53 (4.9 %)	355 (32.9 %)

#### Tabla 10. Matrices de confusión.



Figura 42. Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D® y basado en EEMaps) durante el primer test (mañana)



Figura 43. Comparación entre las detecciones NLOS de ambos métodos (BATI 3D® y basado en EEMaps) durante el segundo test (tarde)

En los tests de mañana se observa que de 542 detecciones LOS realizadas por el método BATI-3D, 460 también han sido detectadas por el algoritmo de detección NLOS, mientras que 82 han sido identificadas como NLOS. Esto supone un 57.5% de detecciones LOS identificadas por ambos métodos y un 10.3% de detecciones que el método BATI-3D identifica como LOS y el algoritmo de detección lo hace como NLOS. En el caso de las clasificaciones NLOS, de un total de 258 detecciones del método BATI-3D, 229 también son detectadas por el algoritmo NLOS mientras que 29 de ellas aparentemente están en LOS y son clasificadas por dicho algoritmo como NLOS. Esto supone un 28.6% y un 3.6% respectivamente.

En las pruebas de tarde, en cambio se obtiene un 44.7% de situaciones LOS detectadas por ambos y un 32.9% de detecciones NLOS también clasificadas de igual manera por

ambos. Sin embargo la discrepancia es de un 17.5% en el caso de las señales LOS y de un 4.9% en el caso de las señales NLOS.

Estos resultados demuestran que en el test de mañana ambos métodos coinciden en un 86.1% de los casos, mientras que en el de la tarde lo hacen en un 77.6% de las observaciones. También se deduce de la tabla que en las pruebas de mañana y tarde, el algoritmo de detección NLOS es más pesimista en un 10.3% y un 17.5% de los casos respectivamente.

Finalmente, la tabla 11 muestra las disconformidades entre ambos algoritmos:

	Test de mañana	Test de tarde
Disconformidad del método basado en		
EEMaps respecto al método BATI-3D® en	13.9 %	22.4 %
% de observaciones		

#### Tabla 11. Disconformidad entre ambos algoritmos

Tal y como se observa en la tabla anterior, existe una discrepancia de un 13,9 % en los resultados obtenidos tras el primer test y una discrepancia del 22,4 % en los del segundo test.

Esta disconformidad se debe principalmente a las diferencias existentes entre los mapas usados por uno y otro. Mientras que el método BATI-3D emplea mapas de muy alta resolución y muy precisos, el método basado en EEMaps hace uso de las imágenes disponibles por medio de Google Maps, las cuales son menos precisas que los modelos del IGN.

Tras analizar los resultados obtenidos se puede deducir que las principales ventajas del algoritmo propuesto en el presente trabajo son:

- La capacidad de crear EEMaps de cualquier ciudad con información sobre la altura de los edificios simplemente mediante el uso de las herramientas geográficas de Google: Google Earth o Google Maps, ambas de ellas gratuitas y a disposición de cualquier usuario. Esto permite cartografiar regiones sin necesidad de recorrerlas físicamente ni capturar ningún tipo de información presencial.
- La ligereza de esos mapas, pues se pueden descargar y almacenar en el sistema de navegación del propio vehículo debido a que ocupan poco espacio y contienen la información relevante para el cálculo del posicionamiento. Esta característica los hace idóneos para aplicaciones con recursos limitados o para complementar tareas en tiempo real, sin necesidad de llevar a cabo una etapa de postprocesado.
- La sencillez, rapidez y simplicidad del algoritmo de cálculo NLOS en comparación con otros algoritmos basados en procesado de imagen, los cuales son más lentos y requieren, por tanto, más tiempo computacional.

 Su bajo coste de implementación. Tal y como se ha explicado con anterioridad, no es necesario disponer de ningún equipo adicional tales como cámaras, láseres, etc, cuyo uso implican un encarecimiento del proyecto y aumento del tiempo de procesado.

Los inconvenientes del mismo son:

- La incertidumbre de la calidad de las imágenes proporcionadas por Google Earth o Google Maps.
- La simplicidad de la representación de la forma de los edificios mediante EEMaps, ya que el modelo BATI-3D es más completo y exacto.
- El trabajo previo necesario para crear el EEMap.

A pesar de estas desventajas, se puede afirmar que la utilización de los EEMaps y, posteriormente del algoritmo de detección NLOS constituye una potente herramienta para solucionar el problema del multitrayecto en entornos urbanos.

### 5.5. Conclusiones.

Este capítulo se ha centrado en la consecución del segundo objetivo principal de esta tesis: el desarrollo de un algoritmo de detección de satélites en situación de NLOS que sea viable computacionalmente para posicionamiento en tiempo real.

Se han llevado a cabo dos baterías de pruebas y se han comparado las detecciones proporcionadas con dicho algoritmo con las obtenidas mediante el método BATI-3D. Ambas han sido consistentes mostrando un alto índice de coincidencias en las detecciones NLOS.

El alto porcentaje de situaciones NLOS correctamente identificadas y la simplicidad del algoritmo de detección NLOS lo hacen pues, apropiado para aplicaciones de posicionamiento en tiempo real, alcanzándose así el objetivo anteriormente mencionado.

# Capítulo 6

# Mejoras en el Posicionamiento con Algoritmos GNSS/Detección NLOS

### 6.1. Introducción.

Una vez mitigado el efecto del multitrayecto con la exclusión de las señales procedentes de los satélites en situación de NLOS, es conveniente evaluar la calidad de la geometría resultante. Para ello y tal como se ha mencionado en capítulos anteriores se ha desarrollado un algoritmo de cálculo del DOP, detallado en el Anexo 3 de esta tesis. La etapa final del proceso de posicionamiento consiste pues en determinar la posición del receptor a partir de las pseudodistancias de los satélites en LOS cuya valor de DOP sea menor que 10. Esto asegurará que la calidad de la geometría satelital es la adecuada para llevar a cabo el cálculo de la posición del receptor.

Con objeto de validar los conceptos desarrollados en el presente trabajo se ha llevado a cabo una batería de pruebas reales en diversos escenarios situados en diferentes localidades y países. Dichos escenarios consisten en su mayoría en zonas densas y urbanas de Francia y España en las cuales está presente el problema del multitrayecto, causando así importantes desviaciones en la determinación de la posición GPS.

Para recoger los datos se han empleado receptores DGPS y un sistema de navegación inercial de alto nivel (INS, *Inertial Navigation System*), ambos instalados a bordo del vehículo. La antena receptora se ha situado en todos los casos encima del mismo.

La posición de referencia necesaria para comprobar la validez de los resultados se ha obtenido de diferente manera en los dos tipos de escenarios. Por un lado, en España, ésta ha sido determinada tras un post-procesado con el receptor DGPS de frecuencia dual. Por otro, en las medidas tomadas en Francia se utilizó como posición de referencia la proporcionada por el sistema de navegación inercial.

# 6.2. Pruebas realizadas en España.

# 6.2.1. Descripción de las pruebas.

La finalidad de las pruebas llevadas a cabo en España ha sido esencialmente demostrar la validez de los conceptos expuestos en el presente trabajo. Por este motivo, esta campaña ha sido dirigida principalmente en torno a dos vertientes: la primera de ellas se centra en el estudio del Error de Posicionamiento Horizontal y la segunda en el análisis de la influencia de las señales procedentes de los satélites detectados como NLOS en la solución proporcionada por el receptor.

Los tests llevados a cabo han tenido lugar en una zona urbana de la ciudad de Murcia. Se ha realizado un recorrido por diferentes zonas de la ciudad con características similares. La mayoría de las calles recorridas corresponden a los llamados cañones urbanos, en los cuales se sitúan edificios altos a ambos lados de la carretera que obstaculizan las señales procedentes de los satélites.

La Figura 44 representa un tramo de dicho escenario. Se trata de la Avenida de la Constitución, localizada en el centro urbano de la ciudad de Murcia.



Figura 44. Escenario de pruebas en España. Fuente: <u>www.google.es/maps</u>.

En la Figura 45 puede observarse una vista aérea de una parte de dicho escenario en un instante concreto. En esta imagen la marca verde representa la posición de referencia, la azul la posición proporcionada por el receptor GPS y la roja muestra las mejores soluciones dadas por el receptor combinando datos procedentes de cuatro satélites, estando siempre uno de ellos en situación de NLOS. Finalmente la marca amarilla se corresponde con la solución dada por el algoritmo de posicionamiento propuesto en esta tesis, teniendo en cuenta solamente aquellos satélites en situación LOS. En este caso en concreto, la posición ha sido calculada con un valor del DOP mayor que 10. Es por este motivo que, la medida dada por el algoritmo difiere significativamente de la estimada

posición de referencia. Sin embargo y, a pesar de que la geometría resultante no era la adecuada, se ha realizado el cálculo del posicionamiento en dicho instante para comprobar la mejora de la posición al eliminar los satélites NLOS.

Tal y como se observa, la marca amarilla, se encuentra más cerca de la verde que la azul o la roja. Es altamente probable pues, que con un alto valor del DOP ambas soluciones coincidan o se encuentren muy próximas entre sí y distantes de las soluciones dadas por el receptor.



Figura 45. Vista aérea del escenario de pruebas en España

# 6.2.2. Equipos de pruebas.

Las pruebas se han llevado a cabo a través de un vehículo en el cual se ha instalado un receptor GNSS+INS. El equipo está formado por un sistema de navegación inercial con tecnología GNSS, el SPAN-CPT, de Novatel. El SPAN-CPT está integrado por tres acelerómetros, 3 giróscopos y un receptor OEM6. La Figura 46 muestra el equipo empleado como estación móvil.

En este caso, la posición de referencia necesaria para poder probar la validez de los algoritmos presentados en este trabajo se ha obtenido por medio de la técnica DGPS, explicada en el capítulo 2, mediante un proceso de post procesado realizado con un receptor GPS de frecuencia dual.

El equipo utilizado como estación terrestre ha sido el receptor de frecuencia dual OEM4 de Novatel. Se ha situado con ayuda de un trípode en la azotea de la Facultad de Informática de la Universidad de Murcia en el punto de coordenadas (38.023315°, 1.174759) de latitud y longitud y 131.125 m de altura. La Figura 47 muestra la ubicación de la estación en dicho emplazamiento.



Figura 46. Equipo empleado como estación móvil. Fuente: <u>www.novatel.com</u>



Figura 47. Estación terrestre empleada para calcular la posición de referencia.

# 6.2.3. Resultados.

Uno de los parámetros de mayor interés a la hora de comprobar una medida de posicionamiento es el Error de Posicionamiento Horizontal (HPE, *Horizontal Positioning Error*). En estas pruebas se ha calculado el valor de dicho parámetro obtenido tras la aplicación del algoritmo de visibilidad y, posteriormente, del de posicionamiento. Dado que en este trabajo se proponen dos soluciones para determinar

la solución GPS (el algoritmo de Mínimos Cuadrados y el de Bancroft), se ha calculado el HPE tras la aplicación de cada uno de ellos obteniéndose resultados similares.

La Figura 48 muestra el HPE durante 4 segundos. Como se puede observar, durante los dos primeros segundos el receptor detecta solamente 4 satélites en línea de visón directa, identificados en la Figura como 2, 3, 4 y 5.

En el instante t = 3 s se detecta el satélite 1 como visible. El algoritmo de visibilidad advierte de que este último satélite se encuentra en situación de NLOS, aunque el receptor no lo identifica como tal y utiliza los datos provenientes del mismo para el cálculo del posicionamiento. Por este motivo y tal y como se observa en la Figura 43, la posición calculada por el receptor es errónea y, bastante alejada de la posición de referencia.



Figura 48. Error de Posicionamiento Horizontal durante 4 segundos.

La imagen muestra como todas las combinaciones de satélites en las que se utilizan las medidas provenientes del satélite 1 son imprecisas y derivan en un aumento del HPE. Únicamente la combinación que descarta el satélite 1 para el cálculo del posicionamiento obtiene un valor del HPE admisible. Esto se debe a que ésta es la única libre del problema del multitrayecto. Tal y como indica el algoritmo de visibilidad, la pseudodistancia del satélite 1 no debe de utilizarse para el cálculo del posicionamiento ya que éste se encuentra en situación de NLOS.

Las pruebas llevadas a cabo en España permiten, por tanto, concluir que la eliminación de los satélites afectados por multitrayecto conlleva una mejora de la posición proporcionada por el receptor, ya que disminuye significativamente el error de posicionamiento horizontal, independientemente del algoritmo utilizado para realizar el proceso de trilateración.

# 6.3. Pruebas realizadas en Francia.

# 6.3.1. Descripción de las pruebas.

La segunda batería de pruebas tiene por objetivo principal la validación del conjunto de algoritmos y técnicas desarrolladas en el presente trabajo. Su finalidad es, comprobar su aplicabilidad en el campo de la detección y mitigación del problema del multitrayecto en cañones urbanos y mejorar el posicionamiento basado en sistemas GNSS.

En esta ocasión, los tests realizados han tenido lugar en la ciudad francesa de Nantes. Se ha realizado un recorrido de aproximadamente 15 minutos de duración a lo largo de 10 km de la misma. Sin embargo y, debido a los resultados dispares proporcionados por el GPS a lo largo de la calle Cours Olivier de Clisson, ésta ha sido el eje central de dicho estudio. Esta calle, a pesar de ser un escenario atípico en los problemas de multitrayecto, tiene grandes problemas de visibilidad ya que los edificios son altos, muy anchos y se encuentran bastante alejados de la carretera. Esto hace que, cualquier pequeño error en las pseudodistancias de los satélites, aumente significativamente debido a que un pequeño rebote de la señal en un edificio colindante se ve aumentado por la lejanía entre los mismos y el receptor. La Figura 49 muestra un tramo del escenario de pruebas.



Figura 49. Vista aérea de Cours Olivier de Clisson

# 6.3.2. Equipos de pruebas.

En esta ocasión, para llevar a cabo las pruebas, se ha situado un receptor GPS U-blox LEA-4T con una antena de parche encima del vehículo. Para los cálculos de la

odometría se han empleado los sensores de velocidad de las ruedas, accesibles a través del bus CAN (*Controller Area Network*). También se ha utilizado un giróscopo de fibra óptica de un eje de la serie KVH e-core para medir la velocidad de giro.

Este vehículo incorpora también el equipo MRT descrito en el capítulo 5 para obtener la medida de la posición de referencia.

### 6.3.3.1. Caracterización del error GPS en las pseudodistancias.

Para analizar exhaustivamente el comportamiento del receptor GPS y validar los resultados obtenidos en las detecciones NLOS, es necesario caracterizar el error proporcionado por éste al operar en escenarios libres de multitrayecto. Una vez caracterizado dicho error, se podrá establecer un límite dentro del cual las medidas de las pseudodistancias serán consideradas correctas. A tal efecto, se ha realizado una campaña de pruebas previa en las mismas condiciones que el resto de experimentos y con el vehículo en movimiento. Se ha recorrido un trayecto a lo largo de un entorno abierto con visibilidad y sin obstáculos.

En ausencia de multitrayecto, se puede considerar sin pérdida de generalidad que los errores en las pseudodistancias siguen una distribución Gaussiana con media cero y que estos son independientes de un satélite a otro.

Si estos errores se distribuyen de forma Gaussiana, es posible afimar que el 99.87% de los datos se encuentran dentro del intervalo  $[-3 \sigma, 3 \sigma]$ , siendo  $\sigma$  la desviación típica de dicho error. En este caso, cualquier error en una pseudodistancia comprendida en un área de  $3 \sigma$  se considerará admisible, pudiéndose considerar aquellos errores fuera de esta área como datos espúreos sin importancia y que, por tanto pueden ser descartados.

En caso de que el error en una pseudodistancia se encuentre fuera de los límites de este umbral, ésta se considerará anómala y, por tanto deberá de ser detectada por el algoritmo NLOS ante la sospecha de que esté contaminada por efecto del multitrayecto.

Para llevar a cabo la caracterización del error y, partiendo de las coordenadas de las posiciones de los satélites y sus pseudodistancias en cada instante, se han calculado los errores de cada uno de los satélites detectados para, a partir de estos, estimar los valores de la media  $\mu$  y la desviación típica  $\sigma$  de la distribución del error.

Para un determinado satélite *i*, dicho error se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$\delta_i = \rho_{mi} - \rho_i$$

siendo:

- $\delta_i$  = Error en la pseudodistancia del satélite *i*.
- $\rho_m$  = Pseudodistancia del satélite *i* medida o proporcionada por el receptor (posiblemente afectada por multitrayecto).
- ρ<sub>i</sub>' = Pseudodistancia calculada del satélite *i*. Ésta se determina como la diferencia entre la posición de referencia (proporcionada por la IMU) y las coordenadas de la posición del satélite i-ésimo.

La Figura 50 representa el histograma de la distribución del error en las pseudodistancias en un entorno abierto, libre de multitrayecto. Los resultados corresponden a un número de 2650 observaciones y, tal y como se observa, los parámetros característicos de dicho error siguen una distribución Gaussiana normalizada, generalmente asumida en este tipo de situaciones.

Se ha obtenido una media  $\mu$  de 0.3552 m y una desviación típica  $\sigma$  de 1.5379 m. El valor de  $\sigma$ , tal y como se ha explicado con anterioridad, se empleará posteriormente como valor umbral para decidir si una pseudodistancia es o no correcta y, por tanto, si el satélite del cual procede se encuentra libre o no de multitrayecto. De esta forma será posible comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de Detección NLOS.



Figura 50. Histograma del error en las pseudodistancias a lo largo del test libre de multitrayecto.

La Figura 51 muestra el error en las pseudodistancias medidas en función del tiempo. Se puede observar que dicho error varía entorno a cero y no se aprecia ninguna desviación importante, por lo que es aceptable asumir que se puede modelar con una distribución Gaussiana cuya media se sitúa cercana a cero.

### 6.3.3.2. Resultados.

Como se ha indicado anteriormente, la referencia de si un satélite se encuentra o no en situación de no visibilidad se obtiene comparando la distancia real de la antena al satélite correspondiente y la pseudodistancia medida de éste. Si la diferencia entre ambas es mayor que  $3 \sigma$ , el satélite se considera que está en situación NLOS. En caso

contrario estará en LOS y sus datos podrán ser utilizados para el cálculo del posicionamiento.

La Figura 52 muestra el valor absoluto del error en las pseudodistancias proporcionadas por los satélites y las calculadas en función del tiempo. Se puede observar que, al principio de la prueba, todos los satélites se encuentran en situación LOS, presentando un valor absoluto del error menor que 4.6137 (3  $\sigma$ ). En el instante 1.25 s, el satélite con PRN = 7, representado en color cian comienza a tener un error en su pseudodistancia superior a 3  $\sigma$ .



Figura 51. Valores del error en las pseudodistancias a lo largo del test libre de multitrayecto.

Por otro lado, y también en dicho instante temporal, el satélite con PRN =28, representado en color magenta, deja de ser detectado por el receptor. El resto de satélites observados, continúan en situación LOS durante la realización de la prueba.

La Figura 53 muestra los resultados proporcionados por el algoritmo de detección NLOS en las mismas condiciones y períodos de tiempo. Se puede observar como al principio del test todos los satélites observados se encuentran en situación LOS hasta que, en el instante 1.25 s el satélite cuyo PRN =28 deja de ser detectado y, el satélite con PRN = 7 es clasificado como satélite en situación NLOS.

El algoritmo avisa de que, aunque dicho satélite es utilizado por el receptor para calcular el posicionamiento, su señal está siendo obstruida por algún edificio colindante y, por tanto su pseudodistancia es errónea. En este caso concretamente, el error en las pseudodistancias es significativamente alto. Esto puede ser debido a que los edificios se encuentran bastante alejados de la calzada y la calle es ancha. En entornos urbanos con calles más estrechas es de esperar que el valor de dicho error se sitúe más cerca del

definido umbral de  $3\sigma$ . Podemos concluir por tanto que el algoritmo de detección NLOS ha funcionado correctamente advirtiendo que dicho satélite se encuentra afectado por el multitrayecto y, por tanto no debe de ser utilizado para efectuar el cálculo de la posición.



Figura 52. Valor absoluto del error en las pseudodistancias en función del tiempo.



Figura 53. Resultados del algoritmo de detección NLOS en función del tiempo.

En un total de 300 muestras y en el entorno anteriormente descrito, el algoritmo de detección NLOS obtuvo un 100% de coincidencias con la medida de referencia, con ninguna falsa alarma ni falsos positivos.

Una vez descartados los satélites en situación NLOS, se procede a calcular la posición GPS teniendo en cuenta solamente las observaciones procedentes de los satélites visibles.

La Figura 54 muestra las soluciones proporcionadas por el receptor tras el cálculo del posicionamiento y las obtenidas en este trabajo por el método de Bancroft tras aplicar el algoritmo de visibilidad y descartar los satélites no visibles.

Las líneas rojas representan las distancias entre la posición de referencia y la del receptor en el mismo instante. Las azules muestran las distancias entre el receptor y las soluciones proporcionadas por el algoritmo de Bancroft tras ser aplicado el algoritmo de detección NLOS presentado en esta tesis.

Esta imagen representa bien tres escenarios típicos que a menudo se dan en áreas urbanas con edificios altos.

Al principio de la prueba, el algoritmo de detección NLOS informa de que todos los satélites se encuentran visibles. Consecuentemente, tanto las soluciones proporcionadas por el receptor como las obtenidas mediante el algoritmo de Bancroft son exactas. Conforme avanza el vehículo, el receptor continúa utilizando todos los satélites detectados para el cálculo del posicionamiento, mientras que, el algoritmo NLOS detecta que la señal procedente de uno de los satélites está siendo bloqueada por uno de los edificios situados a la derecha de la carretera. Estos edificios han sido etiquetados en la Figura 54 como 1 y 2 respectivamente. Este satélite aparece como visible para el receptor porque su señal llega al mismo como consecuencia de un reflejo en alguno de los edificios situados a la izquierda de la carretera, es decir el 3, 4 o 5. Este hecho constituye un claro ejemplo de multitrayecto. El receptor no tiene mecanismos para saber que la pseudodistancia de ese satélite no es correcta y la utiliza para cálculos de posicionamiento, obteniendo así una solución de la posición errónea y bastante alejada de la posición de referencia.

El resultado obtenido mediante el algoritmo de Bancroft, en cambio, no tiene en cuenta este satélite y muestra consistencia con la trayectoria de referencia.

Conforme el vehículo avanza algunos metros, la configuración de los satélites vuelve a cambiar. En este caso, el rechazo de los satélites en situación NLOS deriva en una mala geometría de los satélites restantes, con valores de DOP pobres. Una vez más el receptor emplea todos los satélites para el cálculo de la posición, aunque estos estén en NLOS, y proporciona posiciones significativamente alejadas de la posición real.

El algoritmo presentado en esta tesis informa de que con la configuración actual de satélites no es posible obtener una estimación precisa de la posición del vehículo.

Para concluir la validez de los trabajos expuestos es conveniente realizar un estudio estadístico de los resultados obtenidos tras el proceso de detección. Esto permitirá

obtener una idea global de la eficacia de los algoritmos presentados y de la utilidad de los EEMaps construidos para aplicarlos.

Los parámetros analizados en las pruebas del escenario descrito anteriormente son los siguientes:

- MDR (*Missed Detection Rate*): representa aquellos casos en los cuales un satélite se encontraba en situación NLOS y no ha sido detectado.
- FAR (*False Alarma Rate*): muestra aquellos casos en los cuales un satélite ha sido clasificado como NLOS cuando en realidad se encontraba en situación LOS.
- OCDR (*Overall Correct Detection Rate*): Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

$$OCDR = 1 - MDR - FAR$$

- CMR (*Correct Match Rate*): representa la tasa de detecciones NLOS correctas.
- ECMR (*Enhanced Correct Match Rate*): representa la suma de las situaciones NLOS y LOS correctamente identificadas.



Figura 54. Escenario con multritrayecto NLOS.

La tabla 12 muestra los valores obtenidos para la detección NLOS según los parámetros anteriores:

MDR	FAR	OCDR	CMR	ECMR
0.0000	0.0207	0.9792	0.9796	1.0000

Tabla 12. Resultados del algoritmo de detección NLOS.

Tal y como se observa, el MDR es nulo, por lo que no se ha producido ningún caso en el cual un satélite en situación NLOS no haya sido detectado como tal. En consecuencia, todos los satélites no visibles han sido identificados por el algoritmo.

Por el contrario, se ha producido algún falso positivo y algunos satélites visibles han sido clasificados como no visibles. Esto puede explicarse debido a algunas pequeñas imprecisiones en la creación del EEMap.

El CMR es significativamente alto, obteniéndose un valor de un 97.96%. Concretamente, en esta prueba, con 300 muestras, la mayoría de ellas están influenciadas por efectos de multitrayecto, con lo que es esencialmente necesaria una correcta detección NLOS.

Finalmente el CMR es del 100%. Con estos resultados puede deducirse que el algoritmo acierta prácticamente en el 100% de las detecciones NLOS, existiendo una tasa muy reducida (2%) de situaciones LOS erróneamente identificas como NLOS. Por tanto, la probabilidad de detectar el efecto de multitrayecto y, consecuentemente de mitigarlo es muy alta.

La Tabla 13 muestra los resultados estadísticos para el Error de Posicionamiento Horizontal (HPE) para ambas posiciones: la proporcionada por el receptor y la calculada por el algoritmo de Bancroft tras la clasificación NLOS y el estudio del DOP. Para estos cálculos solamente se han tenido en cuenta aquellas muestras con más de 4 satélites en LOS y cuyos valores de DOP obtenidos han sido menores de 10 con el objetivo de asegurar una geometría de los mismos adecuada para el cálculo de la posición.

	MEDIA	DESVIACIÓN TÍPICA
RECEPTOR	22.87	5.54
BANCROFT	2.60	1.01

Tabla 13. Error de Posicionamiento Horizontal (m
--

Con una media de 22.87 m, se aprecia cómo el receptor comete un error elevado estimando la posición de la antena. Esto es debido al problema del multitrayecto. Sin embargo, el error obtenido tras la aplicación de los conceptos desarrollados en esta tesis es de 2.60 m, totalmente admisible para aplicaciones de posicionamiento mediante GPS.

La Figura 55 muestra los valores de la media y la desviación típica de ambas soluciones. Se observa pues la gran diferencia entre ambas y la mejora de los resultados tras mitigar el efecto del multitrayecto.



Figura 55. Media y desviación típica del HPE cometido por el receptor GPS y por el algoritmo de Bancroft tras la aplicación de los algoritmos desarrollados en esta tesis.
# Capítulo 7

# Conclusiones

## 7.1. Conclusiones.

La tesis presenta dos aportaciones en el ámbito del posicionamiento de vehículo de carretera. Ambas aportaciones han sido recogidas en congresos tales como el *IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, el ITS World Congress y el IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshop on Navigation, Perception, Accurate Positioning and Mapping for Intelligent Vehicles y en diversas publicaciones de reconocido prestigio en el sector tales como la revista *Sensors* y *IEEE Robotics & Automation Magazine*. Entre las publicaciones en revistas se encuentran: *A Two-Layers Based Approach of an Enhanced-Map for Urban Positioning Support y GNSS Autonomous Localization: NLOS Satellite Detection Based on 3-D Maps* La primera de ellas recoge el proceso de desarrollo de los EEMaps y la segunda el algoritmo de detección NLOS y la solución global para el cálculo del posicionamiento libre de multitrayecto.

En primer lugar, la propuesta de mapas EEMaps es lo suficientemente completa para poder modelar edificios con una precisión suficiente para el problema planteado. Los mapas no implican el manejo masivo de datos pesados, ni demandan computaciones costosas para su consulta. La exactitud del método de generación de mapas EEMaps propuesto en la tesis ha sido validada por medio de una referencia internacional en mapas 3D.

Si bien su uso no se ha explotado en esta tesis, el modelo de mapa EEMap incluye, no solo los edificios (capa de elevación), sino también la vía (capa de carretera). Se trata por tanto de un modelo completo, que podría ser empleado directamente por un algoritmo de posicionamiento capaz de procesar esta información, tal como un algoritmo basado en medidas GNSS y DR fuertemente acoplado mediante un filtro de partículas.

Dado que las particularidades del entorno pueden generar dificultades para tener disponibilidad de una imagen completa del edificio que permita extraer la información relevante para generar el mapa EEMap, se contempló un método alternativo de estimación de la altura de los edificios, basado en el número de plantas. El error relativo entre ambos métodos era únicamente entorno al 0,5 %.

Tanto el modelo EEMap como su implementación se validaron con pruebas de campo. La capa de carretera basada en figuras geométricas es capaz de modelar una vía urbana convencional con una exactitud decimétrica de manera relativamente poco costosa (en tiempo). En cuanto al uso de recursos de memoria, al contener información más detallada sobre la vía, la memoria consumida es típicamente mayor. Sin embargo, también se demostró como la optimización de los recursos del mapa 2D durante el proceso de creación del mismo permite incluso ahorrar memoria en ciertos tramos, según la naturaleza de la vía. En conclusión, la solución propuesta se considera viable en este sentido.

En cuanto a la exactitud de la capa de elevación, el modelo y técnica de creación de EEMaps se comparó con datos del Instituto Geográfico Nacional francés (IGN), con diferencias relativas inferiores a 0,05, siendo la media 0,032. En términos absolutos, en un entorno de edificios de entre 6 y 16 metros, el error absoluto típico resultó inferior a medio metro, lo que se considera suficiente para el uso previsto en la tesis. En cuanto al consumo de memoria, el hecho de modelar el edificio en base únicamente a sus esquinas, supone una reducción dramática frente a los modelos 3D convencionales, basados en nubes de puntos (por ejemplo, la solución LIDAR), o triángulos.

En segundo lugar, estos mapas han demostrado que pueden apoyar efectivamente la navegación por satélite, sirviendo como entrada de un algoritmo de detección de satélites GNSS que no estén en línea directa de visión con el receptor (situación de NLOS). Cabe recordar que es habitual que los receptores GNSS capten señales rebotadas de satélites, incluso de aquellos que se encuentran en línea con el receptor (LOS). Para un receptor, es relativamente sencillo descartar la señal errónea (la reflejada) si dispone de la señal directa, que tendrá mejor relación SNR. Sin embargo, no lo es descartar una señal errónea cuando esta es la única disponible. El algoritmo NLOS desarrollado, mapea el entorno de la antena receptora para decidir si la señal GNSS la alcanza de manera directa. Para ello compara los ángulos antena-entorno y antena-satélite relevantes.

Para validar el algoritmo de NLOS se hicieron pruebas con medidas reales en distintas localizaciones y horarios. El algoritmo NLOS se validó frente a la referencia francesa BATI-3D, en dos tests (de mañana y tarde) realizados en Nantes, Francia, con unas 2000 pseudodistancias recogidas.

Durante el test de la mañana, el número de satélites descartados por encontrarse en situación de no visibilidad fue entorno al 35%, lo que da una idea de la relevancia de poder aplicar una algoritmo que descarte estas medidas defectuosas. En esta prueba, la discrepancia entre el resultado de EEMap y la el método de referencia BATI-3D fue del 13,9%. En el test realizado por la tarde (y por tanto con distinta configuración de satélites), la diferencia fue del 22,4%. Tras analizar los resultados, se llegó a la conclusión de que la principal razón para tal diferencia es el uso de distintos mapas. BATI-3D emplea mapas muy pesados de gran nivel de realismo, mientras que el algoritmo de NLOS propuestos en la tesis emplea los mapas ligeros EEMap.

Posteriormente, tras demostrar que el cálculo de NLOS es computacionalmente eficiente, la detección NLOS se incluyó como una fase de detección y eliminación de fallos de un algoritmo de posicionamiento GNSS. Las primeras pruebas realizadas en España demostraron la viabilidad del concepto. Pruebas más extensas en Nantes, Francia, permitieron caracterizar los errores de pseudodistancia. Aquellos valores que respondían apropiadamente a una distribución normal de ruido se considerarían aceptables, y los que no, se clasificarían como NLOS. Para ello se emplearon 2650 observaciones. El análisis de los errores en las pseudodistancias permitió identificar los instantes en los que los edificios bloquean la visibilidad de los satélites. Las tasas de éxito fueron cercanas al 100%, con pequeñas variaciones dependiendo de cada prueba. Tras aplicar el método NLOS dentro del algoritmo de posicionamiento, el error de posición horizontal medio disminuyó desde 22.87 m a 2.60 m. Si bien es cierto que también la disponibilidad es menor por el hecho de descartar medidas espurias, la fiabilidad de la solución es sin duda muy superior.

Podemos concluir de esta manera que se ha alcanzado el objetivo principal de la tesis, ya que se ha demostrado la bondad de un nuevo modelo de mapa digital que describe el entorno urbano de una manera apropiada para asistir la navegación por GNSS en el problema del multitrayecto, y de un algoritmo que se basa en dicho modelo, capaz de clasificar en tiempo real los satélites cuya señal sufre multitrayecto. Asimismo, se han conseguido cada uno de los objetivos secundarios planteados al comienzo tal y como se demuestran los resultados de las pruebas realizadas y sus posteriores análisis.

# 7.2. Trabajos futuros.

Uno de los principales puntos débiles del presente trabajo es la sensibilidad del algoritmo de NLOS a los errores en las estimaciones de la altura de los edificios. Si bien cualquier error no detectado empeoraría la posición calculada, una solución conservadora aumentaría las falsas alarmas de NLOS, eliminando innecesariamente satélites válidos. En un cañón urbano resultará necesario aprovechar al máximo la disponibilidad de la cobertura de los satélites, por lo que no es práctico optar por una solución altamente conservadora. El procedimiento de generación de mapas EEMap, al tener una importante carga manual, introduce una incertidumbre en la estimación de las alturas de los edificios. Una de las primeras mejoras del presente trabajo debería centrarse en robustecer el procedimiento de generación de EEMaps, de manera que las posibles incertidumbres se puedan gestionar apropiadamente.

Por otra parte, si bien el algoritmo de NLOS evita que se introduzcan medidas erróneas causadas por el multitrayecto en el cálculo de la posición, la tesis no incluye en sí misma una alternativa a las mismas que permita mantener la provisión de posición. No obstante, la literatura ofrece numerosas alternativas para esto, empleando para ello información procedente de otros sensores. En este sentido, posibles líneas de trabajo que mejoraría los resultados alcanzados por la tesis serían:

- Integrar la detección de NLOS dentro de una arquitectura fuertemente acoplada GNSS/DR mediante un filtro extendido de Kalman (EKF), o un filtro de partículas (PF). Esto permitiría emplear como punto para detección de NLOS la estimación GNSS/DR y aumentar la disponibilidad del posicionamiento.
- Tal filtro podría beneficiarse de la información de la capa de carretera del EEMap propuesto en esta tesis, aplicando esta condición de contorno en los cálculos del posicionamiento.
- No descartar los satélites en NLOS, sino reutilizarlos tomando en cuenta su condición. Una consecuencia directa de la eliminación de satélites obstruidos

por edificios en cañones urbanos es que los satélites visibles no tienen distribuciones geométricas apropiadas (quedarán alineados), el problema de optimización tiende a ser singular, causando altos valores de DOP y en definitiva, que la posición GNSS calculada no sea fiable. Este efecto no es propio del algoritmo NLOS, sino intrínseco a la propia naturaleza de los sistemas GNSS. Además del uso de sensores que aporten información redundante, una línea de trabajo interesante pasaría por no descartar las pseudodistancias de satélites en NLOS, sino emplearlas en un nuevo algoritmo de cálculo de posicionamiento que permita tomarlas en cuenta. Una vez sepamos que la señal viene reflejada de un edificio en particular, resultaría posible emplear esta información para incluirla en los cálculos de la posición de la antena receptora.

Finalmente, otro trabajo de alto interés sería analizar el impacto de emplear otras constelaciones GNSS, como GLONASS, Galileo o Beidou. Si bien estas constelaciones también sufrirán problemas multitrayecto, el mayor número de satélites en órbita permitirá aumentar la redundancia de la información, y explorar diferentes combinaciones de algoritmos de FDE con detección de NLOS, a expensas naturalmente de un coste computacional más elevado.

# Capítulo 8

# Publicaciones

## 8.1. Introducción.

El trabajo desarrollado en la presente tesis ha sido reconocido internacionalmente en diversos medios científicos de reconocido prestigio. Muestra de ello son los artículos publicados en revistas y congresos que se recogen a continuación. En el Anexo V pueden consultarse de manera más detallada cualquiera de ellos.

## 8.2. Revistas.

Las publicaciones en revista producidas durante el desarrollo de esta tesis son las siguientes:

 A Two-Layers Based Approach of an Enhanced-Map for Urban Positioning Support. Carolina Piñana-Díaz, Rafael Toledo-Moreo, F. Javier Toledo-Moreo and Antonio Skarmeta. Sensors (Basel). 2012; 12(11): 14508–14524. doi: 10.3390/s121114508 Factor de impacto: 2,033 (Q1 en 2012).

En este artículo se presenta el concepto de EEMap y se desarrolla de manera detallada la construcción de las dos capas incluidas en él: la capa de carretera y la capa de elevación. También se incluye una descripción de la metodología llevada a cabo y un completo análisis de la exactitud del mapa, ocupación de memoria, e idoneidad para uso posterior en algoritmos de posicionamiento.

 GNSS Autonomous Localization: NLOS Satellite Detection Based on 3-D Maps. Francois Peyret; David Bétaille; <u>Carolina Piñana</u>; Rafael Toledo-Moreo; Antonio F. Gómez-Skarmeta; Miguel Ortiz IEEE Robotics & Automation Magazine. 2014, Volumen: 21, Issue: 1, pp: 57 - 63, DOI: 10.1109/MRA.2013.2295944. Factor de impacto: 1,82 (Q1 en 2014)

En esta publicación se presenta un análisis exhaustivo de los beneficios de la solución EEMap propuesta en la tesis doctoral. En ella se lleva a cabo una

comparativa en término de detecciones NLOS con el método BATI-3D, basado en mapas 3D del IGN francés y explicado en el capítulo 6.

## 8.2. Congresos internacionales.

Asimismo, también se han realizado las siguientes participaciones relacionadas con la tesis en reconocidos congresos internacionales del sector:

 GPS Multipath Detection and Exclusion with Elevation-Enhanced Maps. Carolina Piñana-Díaz, Rafael Toledo-Moreo, David Bétaille, Antonio F. Gómez-Skarmeta.14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Washington, DC, USA. October 5-7, 2011.

Esta contribución contiene una descripción de la construcción de la capa de elevación de los EEMaps. En ella se explican los dos algoritmos de detección de bordes presentados en esta tesis y se realiza una comparación entre las alturas de varios edificios estimadas mediante ambos métodos. También se introduce el algoritmo de Detección NLOS y se muestran los resultados obtenidos en una batería de pruebas llevadas a cabo en la ciudad de Murcia, España. A continuación se incluye un estudio estadístico de dichos resultados.

 Multipath Mitigation with Elevation-Enhanced Maps. Carolina Piñana-Díaz, Rafael Toledo-Moreo, Antonio F. Gómez-Skarmeta. ITS World Congress – Orlando, Florida, EE.UU, 2011.

Este artículo complementa al anterior con la descripción del algoritmo de cálculo de la posición mediante el algoritmo de Bancroft. En él se explican los resultados tras la eliminación de los satélites en NLOS y se realiza un estudio del HPE.

 Elevation-Enhanced-Map-based GPS Non-Line-Of-Sight Detection in Urban Environments. Carolina Piñana Díaz, Rafael Toledo-Moreo, Antonio Gómez Skarmeta, David Bétaille, François Peyret. IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshop on Navigation, Perception, Accurate Positioning and Mapping for Intelligent Vehicles. Alcalá de Henares, Madrid, Spain 2012.

El principal objetivo de esta publicación es la validación de los conceptos presentados en los artículos anteriores. Para ello se caracteriza estadísticamente del error en las pseudodistancias y se utiliza el modelo obtenido para analizar los resultados obtenidos tras la realización de diversas pruebas en la ciudad de Nantes, Francia.

# Bibliografía

- [1] Carles Olmedillas, Joan. *Introducción a los sistemas de navegación por satélite*. España: Editorial UOC, 2013.
- [2] L. Harte, B. Levitan. *Global Positioning System (GPS)*. Althos books. ISBN: 1-932813-30-6. 2009.
- [3] Bancroft. *An algebraic solution of the GPS equations*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. AES-21, pp. 56-59. 1985.
- [4] F. Peyret. EGNOS-on-the-road: What Can Be Expected from EGNOS Compared to GPS for Road Traffic Management Services. Proc. Of the ITS World Congress. PaperID: T-EU00897. Busan, Korea. 2010.
- [5] J. Ibañez-Guzmán, O. Le Marchand, and C. Chen. *Metric evaluation of automotive-type GPS receivers*. Proc. FISITA, Munich, Germany, Sep. 2008.
- [6] Instituto Geográfico Nacional. <u>http://www.ign.es</u>
- [7] http://www.radiocomunicaciones.net
- [8] http://<u>www.here.com</u>
- [9] http://www.tomtom.com
- [10] http://www.openstreetmap.org
- [11] http://www.google.es/maps
- [12] Janausch, T.; Gern, A.; Linder, F.; Maile, M.; Wilson, C.; Wolermann, B.; Pilutti, T.; Ahmed-Zarid, F.; Palmer, M.; Shulman, M.; Waldis, A.; Sadekar, V.; Deering, R.; Grimm, D.; Hamilton, B.; Kellum, C.; Krishnan, H.; Haskitt, P.; Nyczak, G.; Uehara Y.; Goudy, R.; Sanislow, D.; Torres, R. et al., *Enhanced Digital Mapping Project*—Final Report; US Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2004.

- [13] Wang J., Shroedl S., Mezger K., Ortloff R., Joos A., Passegger T. Lane Keeping Based on Location Technology. IEEE Transactions On Intelligent Transportation Systems, Vol. 6, No. 3, 351–356, 2005.
- [14] Shroedl S., Rogers S., Wilson C. Map refinement from GPS traces. DaimlerChrysler Res. and Technol. North America, Palo Alto, CA, RTC Rep. No. 2000/6, 2000.
- [15] M. A. Quddus, W. Y. Ochieng, and R. B. Noland. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the-art and future research directions. Transp. Res. Part C, vol. 15, no. 5, pp. 312–328, Oct. 2007
- [16] Bétaille, D.; Toledo-Moreo, R. *Creating enhanced maps for lane-level vehicle navigation*. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2010, 11, 786–798.
- [17] Toledo-Moreo, R.; Bétaille, D.; Peyret, F. Lane-level integrity provision for navigation and map matching with GNSS, dead reckoning, and enhanced maps. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2010, 11, 100–112.
- [18] Jiang Liu, Baigen Cai, Yunpeng Wang, Jian Wang. Generating Enhanced Intersection Maps for Lane Level Vehicle Positioning based Applications. In 13th COTA International Conference of Transportation Professionals (CICTP 2013), 96, 2395-2403.
- [19] Ross, L. (2010). Virtual 3D City Models in Urban Land Management Technologies and Applications. Master thesis, the University of Berlin, Germany, 2010.
- [20] Google Earth. https://www.google.es/intl/es\_es/earth/
- [21] Apple. https://support.apple.com/es-es/HT202570
- [22] OSM. https://osmbuildings.github.io/OSMBuildings/
- [23] Gruen, Tobago. A Semi-Automated Approach for The Generation of 3-D Building Models. ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sens., vol. 53, no. 2, Apr. 1998, pp. 108-118.
- [24] M. Madani. *Photogrammetric Applications, Manual of Photogrammetry*, Maryland: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 2004.
- [25] C. Heipke and A. Peled. Integration of Geodata and Imagery for Automated Refinement and Update of Spatial Databases. Int. J. Photogrammetry and Remote Sens., vol. 58, Jan. 2004, pp. 127-128.
- [26] Lee, Dong-Cheon; Yom, Jae-Hong; Shin, Sung-Woong; Oh, Jae-Hong; Park, Ki-Surk. Automatic Building Reconstruction with Satellite Images and Digital Maps. ETRI Journal, vol. 33, iss. 4, 2011, pp. 537-546

- [27] E. Orthubera, b, J. Avbelja. 3D Building Reconstruction From LIDAR Point Clouds By Adaptive Dual Contouring. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume II-3/W4, 2015 PIA15+HRIGI15 – Joint ISPRS conference 2015, 25–27 March 2015, Munich, Germany
- [28] Cooperative vehicle infrastructure systems. European Project of the 6th framework program. http://www.cvisproject.org
- [29] Peyret F, Bétaille D, Pinana-Diaz C, Toledo-Moreo R, Gomez-Skarmeta A and Ortiz M (2014). GNSS autonomous localization: Non-Line-Of-Sight satellite detection based on digital maps of city environments. IEEE Robotics and Automation Magazine., March, 2014. Vol. 21(1), pp. 57-63.
- [30] http://www.benomad.com
- [31] Institute National de L'Information Geographique et Forestier. Available online: <u>http://www.ign.fr</u>.
- [32] Paul D. Groves, Shadow Matching: A New GNSS Positioning Technique for Urban Canyons. The Journal Of Navigation (2011), 64, 417–430.
- [33] Bradbury, J., M. Ziebart, and P.A. Cross. *Code Multipath Modelling in the Urban Environment Using Large Virtual Reality City Models: Determining the Local Environment.* The Journal Of Navigation (2007), Vol. 60, 95–105.
- [34] Suzuki, T., and N. Kubo. *GNSS Positioning with Multipath Simulation using 3D Surface Model in Urban Canyon*. Proceedings of the ION GNSS, Nashville, Tennessee, 2012.
- [35] Suzuki, T., and N. Kubo. *Correcting GNSS Multipath Errors Using a 3D Surface Model and Particle Filter*. Proceedings of the ION GNSS, Nashville, Tennessee, 2013.
- [36] Wang, L., P D Groves, and M.K. Ziebart. Multi-Constellation GNSS Performance Evaluation for Urban Canyons Using Large Virtual Reality City Models. The Journal of Navigation (2012), Vol. 65, 459-476.
- [37] Obst, M., S. Bauer, and G. Wanielik. Urban Multipath Detection and Mitigation with Dynamic 3D Maps for Reliable Land Vehicle Localization. Proceedings of the Position Location and Navigation Symposium (PLANS) (2012), IEEE/ION, Myrtle Beach, SC, IEEE/ION, pp. 685-691.
- [38] Bourdeau, A. Constructive Use of GNSS NLOS- Multipath: Augmenting the Navigation Kalman Filter with a 3D Model of the Environment. Proceedings of the 15th International Conference on Information Fusion, Singapore (2012), IEEE, pp. 2271 – 2276.

- [39] V. Drevelle and P. Bonnifait. *iGPS: Global Positioning in Urban Canyons with Road Surface Maps*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, vol. 4, no. 3, pp. 6 18, 2012.
- [40] Marcus Obst, Sven Bauer, Pierre Reisdorf, Gerd Wanielik. Multipath detection with 3D digital maps for robust multi-constellation GNSS/INS vehicle localization in urban áreas. Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2012 IEEE.
- [41] Ben-Moshe, B., E. Elkin, H. Levi, and A. Weissman. *Improving Accuracy of GNSS Devices in Urban Canyons*. Proceeding of Canadian Conference on Computational Geometry 2011, August 10-12, Toronto, ON.
- [42] R. Kumar and M. G. Petovello. A Novel GNSS Positioning Technique for Improved Accuracy in Urban Canyon Scenarios Using 3D City Model. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 2014, pp. 2139 – 2148.
- [43] P. François, B. David, and M. Florian. Non-Line-Of-Sight GNSS signal detection using an on-board 3D model of buildings. ITS Telecommunications (ITST), 2011 11th International Conference on. IEEE, 2011, pp. 280 – 286.
- [44] Wang, L., P D Groves, and M.K. Ziebart. Urban Positioning on a Smartphone: Real-time Shadow Matching using GNSS and 3D city models. Proceedings of the ION GNSS, Nashville, Tennessee, 2013.
- [45] L.-T. Hsu, Y. Gu, and S. Kamijo. 3D building model-based pedestrian positioning method using GPS/GLONASS/QZSS and its reliability calculation. GPS Solutions, pp. 1 – 16, 2015.
- [46] Janausch, T.; Gern, A.; Linder, F.; Maile, M.; Wilson, C.; Wolermann, B.; Pilutti, T.; Ahmed-Zarid, F.; Palmer, M.; Shulman, M.; Waldis, A.; Sadekar, V.; Deering, R.; Grimm, D.; Hamilton, B.; Kellum, C.; Krishnan, H.; Haskitt, P.; Nyczak, G.; Uehara Y.; Goudy, R.; Sanislow, D.; Torres, R. *et al. Enhanced Digital Mapping Project*—Final Report; US Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2004.
- [47] Toledo-Moreo, R.; Bétaille, D.; Peyret, F.; Laneurit, J. Fusing GNSS, deadreckoning and enhanced maps for road vehicle lane-level navigation. IEEE J. Sel. Top. Signal Process. 2009, 3, 798–809.
- [48] R. Toledo-Moreo and M. A. Zamora-Izquierdo. *IMM-Based Lane- Change Prediction in Highways With Low-Cost GPS/INS*. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol 10. No. 1, pp: 180–185. March 2009.
- [49] Cui, Y.; Ge, S.S. Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments. IEEE Trans. Robot. Autom. 2003, 19, 15–25.

- [50] Fouque, C.; Bonnifait, P.; Bétaille, D. Enhancement of Global Vehicle Localization Using Navigable Road Maps and Dead-Reckoning. Proceedings of the IEEE ION Position, Location Navigation Symposium Conference, Monterey, CA, USA, 5–8 May 2008; pp. 1286–1291.
- [51] Zott, C.; Yuen, S.Y.; Brown, C.L.; Bertels, C.; Papp, Z.; Netten, B. Safespot Local Dynamic Maps: Context-Dependent View Generation of a Platform's State and Environment. Proceedings of the 15th Intelligent Transport Systems World Congress, New York, NY, USA, 16–20 November 2008; Paper nb. 20260.
- [52] Wevers, K.; Dreher, S. Digital Maps for Lane Level Positioning. Proceedings of the 15th Intelligent Transport Systems World Congress, New York, NY, USA, 16–20 November 2008.
- [53] Wang, C.; Hu, Z.; Uchimura, K. A Precise Road Network Modeling and Map Matching for Vehicle Navigation. Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, Beijing, China, 12–14 October 2008; pp. 1084–1089.
- [54] Marais, J.; Berbineau, M.; Frimat, O.; Franckart, J.P. A New Satellite-Based Fail-Safe Train Control and Command for Low Density Railway Lines. Proceedings of the TILT Seminar (Technological Innovations for Land Transportation), Lille, France, December 2003.
- [55] Meguro, J.I.; Murata, T.; Takiguchi, J.I.; Amano, Y.; Hashizume, T. *GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera*. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2009, 10, 22–30.
- [56] Marais, J.; Ambellouis, S.; Flancquart, A.; Lefebvre, S.; Meurie, C.; Ruichek, Y. Accurate localisation based on GNSS and propagation knowledge for safe applications in guided transport. IEEE Transp. Res. Arena 2012. 48, 796–805.
- [57] Costa, E. Simulation of the effects of different urban environments on GPS performance using digital elevation models and building databases. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst. 2011, 12, 819–829.
- [58] Groves, P.; Wang, L.; Ziebart, M. Shadow matching: Improved GNSS accuracy in urban canyons. GPS World. Available online: http://www.gpsworld.com/wireless/personal-navigation/shadow-matching-12550.
- [59] Peyret, F.; Bétaille, D.; Florian, M. Non-Line-of-Sight GNSS Signal Detection Using an on-Board 3D Model of Buildings. In Proceedings of the IEEE ITST, Saint-Petersburg, Russia, 24–25 August 2011.
- [60] López-Pérez, D.; Toledo-Moreo, R. An Approach to Road Enhanced Maps in Urban Areas. Proceedings of the 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops, Henares, Spain, 3 June 2012.

- [61] Garrett J.J. Ajax: *A New Approach to Web Applications*. Available online: <u>AdaptivePath.com</u>.
- [62] John Canny. *A computational Approach to Edge Detection*. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 8. NO. 6, November 1986.
- [63] D. Bétaille, F. Peyret, O. Nouvel, W. Vigneau, G. Duchateau, and H. Secretan, *How to produce a reference trajectory for studying GNSS errors in urban environments*. Proc. ENC GNSS, Toulouse, France, 2008.
- [64] G. Blewitt. *Basics of the GPS Technique: Observation Equations*. Department of Geomatics, University of Newcastle. Technical Report.
- [65] M.Sahmoudi, A.Bourdeau, Deep fusion of vector tracking GNSS receivers and a 3D city model for robust positioning in urban canyons with NLOS signals. 7th ESA Workshop on Satellite Navigation Technologies and European Workshop on GNSS Signals and Signal Processing (NAVITEC), Noordwijk, Netherlands, 2014.
- [66] D. J. R. Van Nee. *Multipath effects on GPS code phase measurements*. NAVIGATION, Journal of Navigation, vol. 39, no. 2, 1992.
- [67] J. M. Kelly, M. S. Braasch, and M. F. DiBenedetto. *Characterization of the effects of high multipath phase rates in GPS*. GPS Solutions, vol. 7, no. 1, pp. 5–15, May 2003.
- [68] B. M. Hannah. *Modelling and simulation of GPS multipath propagation*. Ph.D. dissertation, Queensland University of Technology, Queensland, Australia, 2001.
- [69] G. Moura and J. Castets. *Validation of deterministic simulation of GNSS reception in urban areas by comparison with measurement campaign*. Proc. of the European Navigation Conference GNSS, Toulouse, France, Apr. 2008.
- [70] J. A. Farrell and M. Barth, *The Global Positioning System and Inertial Navigation*. New York: McGraw-Hill, 1999.
- [71] M. A. Sturza. *GPS navigation using three satellites and a precise clock*. J. Inst. Navig., vol. 30, no. 2, pp. 122–132, Mar. 1983.
- [72] A. Lahrech, C. Boucher, and J.-C. Noyer. Accurate vehicle positioning in urban áreas. Proc. IEEE Conf. Ind. Electron. Soc., Raleigh, NC, Nov. 2005, pp. 486–490.
- [73] S. Hong, M. H. Lee, S. H. Kwon, and H. H. Chun. A car test for the estimation of GPS/INS alignment errors. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 5, no. 3, pp. 208–218, Sep. 2004.
- [74] M. Tsakiri, A. Kealy, and M. Stewart. Urban canyon vehicle navigation with integrated GPS/GLONASS/DR systems. J. Inst. Navig., vol. 46, no. 3, pp. 161–

174, Mar. 1999.

- [75] J. E. Naranjo, C. González, R. García, T. de Pedro, and R. E. Haber. *Power-steering control architecture for automatic driving*. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 6, no. 4, pp. 406–415, Dec. 2005.
- [76] R. T. Moreo, M. A. Zamora-Izquierdo, B. Úbeda-Miñarro, and A. F. Gómez-Skarmeta. *High-integrity IMM-EKF-based road vehicle navigation with lowcost GPS/SBAS/INS*. IEEE Trans. Intell. Transp. Syst., vol. 8, no. 3, pp. 491– 511, Sep. 2007.
- [77] T.-J. Ford and J. Hamilton. *A new positioning filter: Phase smoothing in the position domain.* J. Inst. Navig., vol. 50, no. 2, pp. 65–78, Apr. 2003.
- [78] B. T. Fang. Simple solutions for hyperbolic and related position fixes. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 32, no. 3, pp. 748–753, Sep. 1996.
- [79] M. Phatak. Position fix from three GPS satellites and altitude: A direct method. IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst., vol. 35, no. 1, pp. 350–354, Jan. 1999.
- [80] R. G. Brown. GPS RAIM: Calculation of thresholds and protection radius using chi-square methods—A geometric approach. Nov. 7, 1994. RTCA Paper No. 491-94//SC159-584.
- [81] R. G. Brown. A baseline GPS RAIM scheme and a note on the equivalence of three RAIM methods, J. Inst. Navig., vol. 39, no. 3, pp. 301–316, Fall 1992.
- [82] M. Azaola-Saenz and J. Cosmen-Schortmann, *Autonomous integrity: An error isotropy-based approach for multiple fault conditions*, Inside GNSS, pp. 28–36, Jan.–Feb. 2009.
- [83] Le Marchand, O. Bonnifait, Ph. Ibañez-Gúzman, J. Peyret, F. Bétaille, D. Performance Evaluation of Fault Detection Algorithms as Applied to Automotive Localisation. European Navigation Conference – GNSS 2008, Toulouse France, 04, 2008.
- [84] <u>http://www.oktal-se.fr</u>

# Anexo I

# Algoritmo de Mínimos Cuadrados

Dado que la ecuación de observación es no lineal, antes de aplicar el algoritmo de Mínimos Cuadrados es necesario linealizarla. En este trabajo, el proceso de linealización se lleva acabo de acuerdo con el procedimiento descrito en [64].

Suponiendo que la pseudodistancia medida con el receptor GPS  $P_{observed}$ , es la suma de una observación modelada,  $P_{mode l} = P_{x,y,z,\tau}$ , más un término de error v, es posible escribir:

$$P_{observed} = P_{x,y,z,\tau} + v \tag{1}$$

Aplicando el teorema de Taylor, se define la observación residual como la diferencia entre la observación actual y la observación calculada empelando los valores de los parámetros provisionales:

$$\Delta P \equiv P_{observed} - P_{computed} \tag{2}$$

$$=\frac{\partial P}{\partial x}\Delta x + \frac{\partial P}{\partial y}\Delta y + \frac{\partial P}{\partial z}\Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau}\Delta \tau + v$$
(3)

La ecuación (2) puede escribirse usando notación matricial como:

$$\boldsymbol{b} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{v} \tag{4}$$

La expresión anterior muestra una relación lineal entre las observaciones residuales  $\mathbf{b}$  y la corrección desconocida de los parámetros  $\mathbf{x}$ . La matriz columna  $\mathbf{v}$  contiene todos los términos de ruido, que son también desconocidos en este punto. Los autores en [64] denominan la ecuación matricial anterior "ecuación de observación linealizada".

Considerando  $\hat{x}$  una solución de (4), es posible estimar los residuos  $\hat{v}$  de la siguiente forma: $\hat{v} = b - A\hat{x}(5)La$  solución por mínimos cuadrados puede calcularse variando el valor de x hasta que la suma de los cuadrados de los residuos estimados, J(x) sea mínima:

$$J(\boldsymbol{x}) \equiv \sum_{i=1}^{m} vi^2 = \boldsymbol{v}^T \boldsymbol{v} = (\boldsymbol{b} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{x})^T (\boldsymbol{b} - \boldsymbol{A}\boldsymbol{x})$$
(6)

donde T denota la matriz traspuesta. El resultado de aplicar este método es:

$$\widehat{\boldsymbol{x}} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{b} \tag{7}$$

Este método asume que la inversa de  $\mathbf{A}^{T}\mathbf{A}$  existe. Asimismo, para llevarlo a cabo es necesario un proceso de linealización previo y una estimación inicial de la posición GPS. Se pueden encontrar más detalles sobre este proceso en [64].

# Anexo II

# Algoritmo de Bancroft

La versión directa del algoritmo de Bancroft [3] proporciona una solución algebraica no iterativa a las ecuaciones de observación. En lo que sigue se denotará  $\mathbf{r} = (X,Y,Z)$  y  $\mathbf{r}_i = (X_i, Y_i, Z_i), \mathbf{r}_i: \{1 \le i \le n\}$  a las coordenadas de posición del usuario y del satélite respectivamente en coordenadas cartesianas ECEF.

Ignorando los efectos de las refracciones, las variaciones del reloj y los errores en las medidas, la pseudodistancia medida con un receptor GPS,  $P_i$ , es la suma de la distancia entre el satélite y el receptor y la variación del reloj del receptor, dt, multiplicada por la velocidad de la luz, c, donde el subíndice i identifica al satélite.

$$P_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2} + cdt$$
(8)

Por otro lado, se definen los siguientes vectores columna de dimensión 1 x 4:

con:

$$\boldsymbol{a}_i = (\boldsymbol{r}_i^T \boldsymbol{P}_i)^T \qquad \boldsymbol{r}_i : \{1 \le i \le n\}$$

$$\boldsymbol{A} = (\boldsymbol{a}_1, \boldsymbol{a}_2, \boldsymbol{a}_3 \dots \boldsymbol{a}_n)^T$$
(9)

$$l = (1, 1, 1 \dots 1)^T$$
(10)

$$\boldsymbol{r} = (\boldsymbol{r}_1, \boldsymbol{r}_2, \boldsymbol{r}_3 \dots \boldsymbol{r}_n)^T \tag{11}$$

donde  $\mathbf{r}_i$  se calcula a partir de:

$$\boldsymbol{r}_i = \langle \boldsymbol{a}_i, \boldsymbol{a}_i \rangle / 2 \tag{12}$$

Y dado que la función de Minkowski para un espacio de 4 dimensiones y dos vectores dados **m** y **n** puede escribirse como:

$$\langle \boldsymbol{m}, \boldsymbol{n} \rangle = m_1 n_1 + m_2 n_2 + m_3 n_3 - m_4 n_4 \tag{13}$$

Calculamos la inversa generalizada:

$$\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{W} \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^T \boldsymbol{W} \tag{14}$$

donde W es una matriz de pesos simétrica definida positiva.

En este caso se asignará a la matriz **W** el valor de la matriz identidad y la ecuación (14) puede reescribirse de la siguiente forma:

$$\boldsymbol{B} = (\boldsymbol{A}^T \boldsymbol{A})^{-1} \boldsymbol{A}^T \tag{15}$$

Siguiendo la notación descrita en [3], los vectores u y v se calculan a partir de:

$$\boldsymbol{u} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{l} \tag{16}$$

$$\boldsymbol{v} = \boldsymbol{B}\boldsymbol{r} \tag{17}$$

y se definen los parámetros E,F y G como:

$$E = \langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{u} \rangle \tag{18}$$

$$F = \langle \boldsymbol{u}, \boldsymbol{v} \rangle - 1 \tag{19}$$

$$G = \langle \boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\nu} \rangle \tag{20}$$

entonces, resolviendo la ecuación cuadrática:

$$E\lambda^2 + 2F\lambda + G = 0 \tag{21}$$

Se obtiene la posición del receptor como:

$$\mathbf{y}_{1,2} = \lambda_{1,2} \mathbf{u} + \mathbf{v} \tag{22}$$

En la cual los subíndices 1 y 2 hacen referencia a las dos soluciones obtenidas a partir de la ecuación (21). Para distinguir la cuál es la posición correcta se sustituye en la ecuación original de las pseudodistancias (8). Sólo existirá concordancia en un caso.

# Anexo III

# Pseudocódigo del algoritmo DOP (Dilution of Precision)

A continuación se detalla el pseudocódigo el algoritmo de cálculo del parámetro DOP siguiendo las ecuaciones descritas en el capítulo 2.

Denotando Psat a la variable que almacena la posición de cada satélite en un instante determinado y Prx a la posición del receptor en ese mismo instante: i < -1

Mientras i < longitud(Psat)

R(i)= distancia euclídea (Psat, Prx); Cálculo de la matriz A; fin mientras;

> Cálculo matriz Q; Cálculo matriz d; Cálculo Pdop; Cálculo Tdop; Cálculo Gdop;

Return Gdop;

Una vez calculado dicho parámetro, se determina la calidad de la configuración geométrica de los satélites en dicho instante como sigue:

Si (Gdop<1) -> Ideal Si (1<Gdop<2) -> Excelente Si (2<Gdop<5) -> Buena Si (5<Gdop<10) -> Moderada Si (10<Gdop<20) -> Regular Si (Gdop>20) -> Pobre

# Anexo IV

# Algoritmo de detección de bordes

Para detectar los bordes de la imagen, se aplica un algoritmo de detección de Canny. El objetivo de dicho algoritmo es encontrar aquellos píxeles de la imagen cuyo valor de gradiente sea máximo e identificarlos como bordes.

- Definición de los parámetros de dos distribuciones gaussianas

```
- Eje x:
```

```
Nx1 <- 10:
Sigmax1 <- 1;
Nx2 <- 10:
Sigmax2 <- 1;
Theta1=pi/2;
```

```
- Eje y:
```

```
Ny1 <- 10:
Sigmay1 <- 1;
Ny2 <- 10:
Sigmay2 <- 1;
Theta2=0;
```

- Leer imagen;

- Convertir imagen a escala de grises;
- Derivada primer orden de la función gaussiana a lo largo del eje x;
- Gradientex=Convolución 2D de la imagen en escala de grises con la derivada anterior.

- Derivada primer orden de la función gaussiana a lo largo del eje y;

- Gradiente y=Convolución 2D de la imagen en escala de grises con la derivada anterior.

- Cálculo de la norma del gradiente;
- Definición del umbral (valores mínimos y máximos del gradiente).
- Detección de bordes: búsqueda de píxeles cuyo gradiente sea máximo

# Anexo V

Publicaciones

#### **GPS** Multipath Detection and Exclusion with Elevation-Enhanced Maps

Carolina Piñana-Diaz, Rafael Toledo-Moreo, IEEE Member David Bétaille, IEEE Member, Antonio F. Gómez-Skarmeta

Abstract-The reflections of satellite signals in the environment of Global Positioning Systems (GPS) receivers cause significant errors in their position estimates. Particularly critical are the errors due to the so called non-line-of-sight (NLOS) satellites. In a NLOS situation, the only way the satellite signal reaches the receiver is by means of reflections on plane surfaces, typically buildings, causing overestimates of the pseudoranges between the satellites and the antenna. Receivers not always distinguish between the direct signals and the multipath effects, leading to un-modelled GPS errors. This paper presents a solution to the problem of multipath effects in urban areas, by means of simple elevation models of the environment. The description of the buildings is stored in a elevation-enhanced digital map (EEMap) that can be consulted to decide whether a certain satellite may be in direct view or not. The validity of the concept is proven by means of real experiments in built-up areas of Spain.

#### I. INTRODUCTION

Global Navigation Satellite Systems (GNSS) are well known as the most suitable technology for vehicular global positioning. GNSS are satisfactory applied in a number of fields related to intelligent transportation systems (ITS) and intelligent vehicles, such as fleet management or incar navigation [1], [2]. However, at the moment GNSS lacks the necessary accuracy and reliability to be applied in more challenging missions, such as lane-level positioning or collision avoidance applications [3]. The main drawbacks of commercial GNSS are lack of coverage in certain scenarios, such as tunnels, covered parking lots and urban canyons, lack of accuracy for precision applications, such as lane level guidance, and lack of integrity in the solution due to unmodelled errors. It is expected that the increase of satellites in view coming from different constellations such as North-American Navstar GPS (Global Positioning System), the Russian Glonass (Global Navigation Satellite System) and the European Galileo may raise the final coverage of GNSS. However, there will be scenarios where more satellites in

This work has been supported by the Spanish Ministry of Transportation and Ministry of Science and Innovation under the projects SATELITES (FOM/2454/2007) and SEISCIENTOS (TIN2008-06441-C02), respectively, and it has been carried out inside the Intelligent Systems and Telematics group of the University of Murcia, awarded as an excellence researching group in frames of the Spanish Plan de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (04552/GERM/06).

Carolina Piñana-Diaz, Rafael Toledo-Moreo and Antonio F. Gómez-Skarmeta are with Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Computer Science, University of Murcia, 30100 Murcia, Spain. Rafael Toledo-Moreo is also with the Department of Electronics and Computer Technology, Technical University of Cartagena, Spain. David Bétaille is with IFSTTAR (French Institute of Sciences and Technology for Transport, Development and Networks) Nantes, France. carolina.pinana@um.es, toledo@um.es, david.betaille@ifsttar.fr, skarmeta@um.es the sky will not help, such as parking lots of multiple stories, etc., and aiding sensors are needed. The GNSS inaccuracies are now smaller than ten years ago [4] thanks to the upgrades in satellites and receivers. Double frequency receivers show very good precision but their prices must decrease before being applicable in the vehicular domain. Finally, the appearance of un-modelled errors due to strong assumptions such as one fault at one time at the user-end, or Gaussian distributions models for GNSS errors is a clear showstopper for safety and liability critical applications of the GNSS for vehicles [7], [5], [9]. Among all possible un-modelled errors, the most challenging is the multipath propagation of the satellite signals in the environment of the receiver [3].

Multipath can be classified as line-of-sight (LOS), when the receiver collects both the direct and the reflected signals, and non-line-of-sight (NLOS), when there is no direct view of the satellite and only the reflected signal is acquired. Current receivers are quite good at separating the original signal from the reflected one in the LOS case, but not so much for NLOS. Fig. 1 depicts a NLOS scenario. The blue arrows represent the bounds of GNSS satellite visibility caused by the buildings, and the line of visibility between the antenna and the satellites is shown with black dashes. In this image, satellites 1 and 2 are in direct view, but satellite 3 is not, and the signal arrives at the antenna exclusively due to the reflection on a building. With one more satellite or an assumption such as altitude-hold respect to the previous position, the vehicle position can be calculated. However, the value of the satellite 3 pseudorange is larger than it should, causing significant errors in the final estimate of the vehicle position.

Our approach to solve this problem is based on the fact that most of the multipath effects are due to the reflections in buildings around the vehicle environment. An elevationenhanced map (EEMap) of the buildings can be understood as a visibility map of the GPS satellites in flight that can inform whether or not a satellite is in direct view from a given location. If despite the fact that there is no direct view the signal arrives at the receiver, it is assumed that it is as a consequence of multipath reflections and the pseudorange measurement is discarded. Furthermore, if the satellite configuration resulting of disregarding the space vehicles in NLOS presents a bad geometry with a poor value of Dilution Of Precision (DOP), the solution is also labelled as unreliable.

The rest of the paper is organized as follows: our EEMaps are introduced in Section II; the positioning algorithms are



Fig. 1. Scenario with NLOS multipath.

described in Section III; Section IV presents briefly how the DOP concept is applied to our method. In Section V field tests prove the validity of our concept; finally, main conclusions are drawn in Section VI.

#### II. EEMAPS

Following the line of the European CVIS project [8], where enhanced maps (Emaps) are developed to improve the quality of the vehicle positioning, our approach aims at avoiding multipath by exploiting the information stored in digital maps regarding building locations and sizes. Buildings are the elements that contribute more remarkably to multipath effects, particularly in the cities. For that reason, for the moment our solution only includes buildings. Bridges can also be taken into account in this approach since they can be described as roads segments in the frame of an Emap, as presented in [6], but they are out of the scope of this paper. Although trees also cause disruptions in the GNSS signals, in urban environments its impact is much less significant.

#### A. Building model

In the process of elevation map modelling, building modelling is the key to identify the necessary information to reliably represent buildings.

In this work the World Geodesic System of 1984 (WGS-84) coordinate, which is the same coordinate used by the GPS receiver, was selected as the coordinate to build the elevation map. Further conversions into Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) frame will be performed to compute user position and determine satellite visibility in urban areas. For each building, latitude and longitude values of the two corners nearest to the road are stored, as well as its width and height. The description of the buildings follows the format given in Table I, where subscripts 1 and 2 stand for the 2D position ends of the facade under consideration (represented as the ends of each red segment in Fig. 2).

#### B. Extraction of building features

Two methods for extracting the model parameters of the buildings presented in Table I were developed, and are



Fig. 2. Aerial view of an urban scenario with modelled buildings in Murcia, Spain.

presented in the next sections. First method, named "Building Image-based Method", depends on the complete visibility of the building. Building images are obtained from Google Earth using the Street Viewer tool. This allows fast prototyping, avoiding extensive field campaigns for extracting the building features. However, since the complete view of the building is not always available, a second method named "Story-based Method" based on the number of stories is proposed. It consists in applying the same art as the "Building Image-based Method" in images that only show isolated parts of buildings, such as the ground or the first floor, something common in urban canyons. Finally, a comparison of both methods shows the consistency of our approach.

1) Building Image-based Method: A dedicated algorithm based on Google Earth images processing is proposed for simply and efficiently obtaining building heights. The first step employs a frontal view of the building facade provided by the Street Viewer tool of Google Earth. Then, a Canny detector algorithm [10] is implemented to get an edge intensity image. The small-scale model obtained with the low-level detector provides edge information of the scene which is used to calculate the relationship between the width and the height of the building. Since its real width can be measured in the aerial image provided by Google Earth (Fig. 2) it is possible to extrapolate feature information to calculate the real height of the building. Fig. 3.a) shows a frontal view of a building located in the street Avenida Juan Carlos I of Murcia, Spain. Its respective edge detected image is depicted in Fig. 3.b).

Experimental results show that the proposed algorithm works well on cases in which a complete frontal view of the building is available in the Street Viewer tool of Google Earth.

2) *Story-based Method:* An entire view of the facade of the building is not often available in Google Earth, especially in narrow streets with limited visibility where the only visible features correspond to the ground and first floors. In these

#### TABLE I

BUILDING MODEL PARAMETERS.

Bldg Id Lat<sub>1</sub> Lon<sub>1</sub> Lat<sub>2</sub> Lon<sub>2</sub> w h



Fig. 3. a) Frontal view of a building for feature extraction. b) Edge intensity image after applying the Canny algorithm.

cases, it is possible to use the prior algorithm to detect edges only of available parts and then extrapolate measurements to the whole building just by counting the number of stories. Given that the height of all the stories in a building is the same, by applying this technique the height of the entire building can be computed as follows:

$$h = k_1 \times s + k_2$$

where *s* denotes the number of stories,  $k_1$  represents a constant value of the height of an arbitrary floor and  $k_2$  is the height of the ground floor along with any extra element not included in a standard story of the building. Both parameters are obtained with the Canny detector estimation method.

3) Comparison: To validate this algorithm a comparison between the building-image and story-based methods has been performed. Both techniques have been used to calculate heights of a subset of buildings located in Murcia, Spain. Results are given in Table II. As it can be seen, the difference between heights computed using one or another method is only slightly different, with a median error percentage of 0.48%, and the methods show consistency. Additionally, these values can be compared with real values given by certain buildings with good results. A precise determination of the relative height errors based on precise elevation models and building databases is under progress. Nevertheless, the inaccuracies caused by the measurement tools of Google Earth are taken into account in the algorithm for determining the satellites in line-of-sight. As it will be shown, these building models presented in this section will be a powerful tool in order to decide whether a certain satellite may be in direct view or not.

TABLE II Comparison of building height estimates.

Bldg Id	Method 1	Method 2	Relative Error
1	26.27	26.36	0.0034
2	38.99	38.70	0.0074
3	26.65	26.85	0.0075
4	25.07	25.01	0.0025
5	19.92	19.98	0.0033



Fig. 4. Flowchart scheme of the positioning process.

#### **III. POSITIONING ALGORITHM**

This Section describes the algorithms developed for verifying the goodness of the concept introduced in the paper. In Fig. 4 a flowchart shows schematically the steps followed to provide multipath free positions.

First, the algorithm that detects whether a satellite is in LOS or in NLOS, called from now on the NLOS detection algorithm, is applied (Section III-A). Inputs of that process are the satellite measurements, the EEMap, and an estimate of the vehicle position obtained for instance from a simple extended Kalman filter. NLOS satellites are discarded, and only satellites in LOS are used as inputs of the second step, the GPS problem solving algorithm, that provides the position of the antenna. For this step, two different approaches are developed: the most common Least Squares (LS) algorithm (Section III-B), and the Bancroft approach (Section III-C). The use of two different positioning algorithms helps avoiding the possible influence of the particularities of a algorithm on the results. In our work both appear to be consistent providing in general similar results.

Let us remark here that ionospheric and tropospheric error corrections are not considered in order to emulate the function of a simple GPS receiver. For the same reason, the Glonass constellation is not exploited.

#### A. NLOS Detection Algorithm

With the aim of taking into account only satellites in direct view for GPS position calculation, a multipath detection algorithm is proposed for efficiently reject satellites that are in NLOS. See Fig. 1 for a graphic view of the problem.

Since satellite positions can be obtained with the GPS receiver and the coordinates of the corners of the buildings nearest to the road are stored in the EEmap, the following algorithm determines if a satellite signal is received through a direct path. Otherwise the proposed method rejects it.

It is important to note that an initial estimate of the receiver position is required in order to determine satellite visibility in a given area. Let us define  $\mathbf{u}_1, \mathbf{u}_2$  as the position vectors from the estimated position of the receiver to both the corners of a given building and v the vector from the same estimated position of the receiver to a "potentially" visible satellite captured by the receiver.

As that the height of the building has been obtained by the algorithm described in Section II, the interval of non-visibility for a given building can be calculated just determining the angles between both  $\mathbf{u}_1$  and  $\mathbf{u}_2$  and  $\mathbf{w}$ , being  $\mathbf{w}$  the imaginary line from the initial estimate of the receiver position and the upper corners of the building.

Once the angles for which a building blocks a path are known, we compute visibility angles for each of the satellites detected by the GPS receiver. As mentioned before, we denote **v** the position vector from the initial estimate of the receiver position and satellite  $i, \{0 \le i \le n\}$ , where *n* corresponds to the total numbers of satellites detected. The interval of visibility for satellite *i* will be calculated from the angles between **v** and the defined above **w**.

Defining  $[\alpha^1, \alpha^2]$  as the interval of occultation of a given building (superscripts 1 and 2 stand for each upper corner) and  $[\alpha_{sv_i}^1, \alpha_{sv_i}^2]$  the interval of visibility of satellite *i* regarding the building:

$$\begin{split} & \text{if } [\alpha_{sv_i}^1, \alpha_{sv_i}^2] \leq [\alpha^1, \alpha^2] \\ & \text{then} \Rightarrow \text{Satellite } i \text{ is in NLOS} \\ & \text{else if } [\alpha_{sv_i}^1, \alpha_{sv_i}^2] > [\alpha^1, \alpha^2] \\ & \text{then} \Rightarrow \text{Satellite } i \text{ is in LOS} \\ & \text{end} \end{split}$$

NLOS satellites are flagged as not valid for the GPS computation, while those in LOS are accepted. Applying this concept for each building located around the initial estimate of the location of the receiver it is possible to determine visibility of detected satellites along an urban dense area with tall buildings.

#### B. Least Squares Algorithm

Under the assumption that the pseudorange measured with a GPS receiver,  $P_{observed}$ , is the sum of a modelled observation,  $P_{model} = P_{x,y,z,\tau}$ , plus an error term v, it can be written  $P_{observed} = P_{x,y,z,\tau} + v$ . Applying Taylor's theorem, the residual observation is defined to be the difference between the actual observation and the observation computed using the provisional parameter values:

$$\Delta P \equiv P_{observed} - P_{computed}$$
(1)  
=  $\frac{\partial P}{\partial x} \triangle x + \frac{\partial P}{\partial y} \triangle y + \frac{\partial P}{\partial z} \triangle z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \triangle \tau + v$ 

(1) can be written with matrix notation as  $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}$ , which depicts a linear relationship between the residual observations **b** and the unknown correction to the parameters **x**. The column matrix **v** contains all the noise terms, which are also unknown at this point. The least squares solution can be found by varying the value of **x** until the sum of squares of the estimated residuals,  $J(\mathbf{x})$  is minimized. More details of the LS method can be found in [11].

#### C. Bancroft Algorithm

The direct version of the algorithm Bancroft provides an algebraic and non-iterative solution to the measurement equations. Due to paper length constraints, it is not possible here to include the description of the algorithm. Interested readers can find details in [12].

#### IV. DILUTION OF PRECISION

Receivers usually provide an estimate of the goodness of the GPS solution based on the geometry of the satellite set employed for calculating the position of antenna. This parameter is named Dilution Of Precision (DOP). Since the elimination of one satellite from the solution generates a new geometry, DOP values given by the receiver must be updated after detecting and removing NLOS satellites. For that reason, a DOP algorithm has been developed and introduced into the decision of whether or not final position is reliable.

A typical DOP threshold value is 10 (DOP has no dimensions and therefore no units are needed), where lower values are good and larger poor. This extra test will serve us well to determine not only if the new configuration of GPS satellites is free of non-line-of-sight multipath, but also if the resulting satellites in view are properly placed in the sky to achieve a good solution. It will be shown that this step is important to obtain good results. Further details about DOP calculations can be found in [13].

#### V. EXPERIMENTS

The concept introduced in this paper was validated by means of real tests in different urban scenarios in Spain and France. The data were collected by a DGPS receivers and a high-grade inertial navigation system (INS) onboard the vehicles, with the antenna installed on the top of the car. For the tests in Spain, the ground truth reference is obtained in post-processing with a double frequency DGPS. In France, the high-grade INS was employed as a reference for the true trajectory.

#### A. Field Tests

As it was aforementioned, two sets of experiments were performed. Firstly, experimental trials along a run in a highly masked environment in Murcia, Spain, were performed for proving the concept.

Fig. 5 represents a scenario with a typical situation where some of the satellites used by the receiver for computing GPS position are not in direct view because the nearest buildings block the path. Consequently, position solutions (shown in bottom image) that employ faulty pseudoranges (in red) are far from the ground truth (green), not meeting the GPS specifications. Also the receiver output (cyan), that uses 5 satellites but including one in NLOS, is far from the Bancroft solution calculated with the satellites in LOS (yellow).

Fig. 6 shows the value of the horizontal positioning error (HPE) estimated comparing GPS solutions employing Bancroft along a short period of time in a test performed in Murcia downtown (an image of the test scenario can be seen in Fig. 5.b). Results obtained with the Least Squares algorithm offer similar conclusions and will not be discussed.



Fig. 5. Built-up scenario where multipath appears. a) Image of the scenario. b) Aerial view: P (green) stands for the ground truth reference;  $P_{RX}$  (cyan), the receiver output;  $P_{NLOS}$  (red), the two best GPS solutions combining 4 satellites being one in NLOS;  $P_{DV}$  (yellow) represents the solution obtained employing the only combination of 4 satellites in direct view (LOS).

During this trajectory, the receiver detected 4 satellites in view during the first 3 seconds. These satellites are identified for the sake of simplicity as 2, 3, 4 and 5. One more satellite, numbered 1, is detected at instant t = 3 s. The proposed NLOS detection algorithm reports that satellite 1 is in NLOS situation, although the receiver did not detect it. For that reason, the receiver output is aberrant, as shown in Fig. 5.a with a cyan circle. On the left side of Fig. 6 are depicted the 4 different GPS solutions calculated using satellite 1 with different symbols and colors. Since the pseudorange value of satellite 1 is erroneous, the consequent position estimates are wrong. The EEMap-based algorithm under consideration informs that the solution obtained employing satellites 2, 3, 4 and 5 is the only one that uses exclusively satellites in LOS, offering consistency in the solution by removing the multipath effects from the GPS output.

Previous tests have shown the concept of the method proposed by the authors. In order to validate this concept more statistical evidences must be shown.

Fig. 7 shows a stretch of a test in a built-up area in Nantes, France. The axis origin have been moved to a local reference for an easier estimation of the distances. Red solid lines depict the distances between the reference position and the receiver position at the same instant, while the blue ones the distances to the positions provided by our algorithm based on the Bancroft method. This image presents very well three typical cases in built-up areas. At the beginning



Fig. 6. Horizontal Positioning Error (HPE) during a period of 4 seconds. From t = 0 s till t = 2 s, the receiver detects only four satellites available (2–5). Therefore, there is only a possible combination and unique GPS solutions at each epoch during this period. At instant t = 3 s a new satellite (1) becomes available, resulting 5 satellites in view. The colored symbols (green \*, magenta +, blue ×, red  $\square$  and black  $\circ$ ) identify the 5 different combinations of 4 satellites that lead to different positioning estimates.

of the test (the test vehicle moves from bottom-up and from right to left in the image) the NLOS detection method shows that all locked satellites were in line-of-sight. The receiver outputs are consequently good, and so they are the solutions obtained with our implementation of the Bancroft algorithm. Some meters ahead, even though the receiver keeps using all the satellites, our NLOS test detects that the visibility of a satellite has been blocked by one of the buildings on the right side of the road (labelled as 1 and 2 in the image). This satellite only appears visible at the antenna due to its reflection on building 3, 4 or 5 on the left side of the image. It is a clear example of NLOS multipath. Since the receiver was not aware of this, its solution is poor. However, our Bancroft solution is not affected by this outlier, showing consistency with the reference trajectory. After some other meters the satellite configuration changes again. This time, the rejection of NLOS satellites led to a bad geometry of the remaining satellites, causing poor DOP values. Due to the use of a space vehicle in NLOS, the receiver DOP value is good, although its position estimates wrong. In these cases, our method reports that with the current configuration is not feasible to estimate accurately the position of the vehicle.

Table III shows the statistical results for NLOS detection in terms of:

- Misdetection Rate (MDR) that represents those cases when there was a satellite in NLOS that was not reported.
- False Alarm Rate (FAR), that represents the cases

TABLE III			
ESULTS OF THE NLOS DETECTION ALGORITHM.			

MDR	FAR	OCDR	CMR	ECMR
0.0000	0.0207	0.9792	.09796	1.0000

R



Fig. 7. Scenario with NLOS multipath.

when the method reports NLOS for one satellite that is actually in LOS,

- Overall Correct Detection Rate (OCDR), that can be calculated as OCDR = 1 MDR FAR.
- Correct Match Rate (CMR), that stands for the rate of correct NLOS detections and
- Enhanced Correct Match Rate (ECMR), that represents the addition of NLOS and LOS situations correctly identified.

Let us remind here that a DOP test is also performed before supplying a positioning solution with the remaining satellites. Let us also remark that the reference for NLOS detection was obtained by comparing the receiver pseudoranges with the real distances from the satellites to the reference DGPS post-processed position.

As it can be seen in Table III, the MDR is null, i.e. NLOS is never missed. On the contrary, a few false alarms appear as a consequence of the compensation carried out to cope with the EEMap data inaccuracies. The CMR is very high: in this test performed with 300 samples in an urban area, most of the samples included multipath effects, what brings even more the need of NLOS detection. Finally, the ECMR was just perfect.

The statistical analysis of the field tests is completed with the estimates of the Horizontal Positioning Error (HPE), shown in Table IV. Both positions, the one provided by the receiver in single mode and the one we estimate with the Bancroft algorithm after passing the aforementioned NLOS and DOP tests are compared. Only those samples that having at least 4 satellites in view show DOP values larger than 10 are computed. It is clear how the receiver fails at meeting the accuracy specifications due to multipath effects. However, our solution is fully consistent also in terms of HPE.

TABLE IV Horizontal Positioning Error.

	Mean	Std
Receiver	22.87	5.54
Bancroft	2.60	1.01

#### VI. CONCLUSIONS

The work presented in this paper aims at proving that a simple characterization of the vehicular environment can support the detection of faulty positions affected by multipath effects. To do it so, simple models of buildings were developed. The process of extraction of building features presented in the paper is relatively easy, flexible and fast. Highly precise, heavy and detailed models of buildings are disregarded in favor of light maps with only the most fundamental information. Among some other benefits, the proposed EEMap can be easily updated and downloaded where demanded.

Additionally, an algorithm that exploits the information stored in the EEMap to detect whether or not a satellite is in direct view was developed and introduced into the process of GPS positioning estimation. For that purpose, two GPS algorithms were developed and tested. The EEMapbased positioning algorithms were successfully applied in several field tests in scenarios with different features, proving the validity of our concept. Nevertheless, further tests are required before offering more detailed conclusions.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Jose Santa, Miguel Ángel Zamora, Benito Úbeda and Pedro Pablo Martínez for their support in the test campaigns in Murcia.

#### REFERENCES

- GfK, "Portable satellite navigation systems on the road to success," www.gfk.com/group/press information/press releases/002095/index. en.html, 2008.
- [2] M. Tsakiri, M. Stewart, T. Forward, D. Sandison, and J. Walker, "Urban fleet monitoring with GPS and GLONASS", The Journal of Navigation, vol. 51, pp. 382-393. Sep. 1998.
- [3] F. Peyret "EGNOS-on-the-road: What Can Be Expected from EGNOS Compared to GPS for Road Traffic Management Services" In proc. of the ITS World Congress. PaperID: T-EU00897. Busan, Korea. 2010.
- [4] M. Zabic, "Road Charging in Copenhagen: A Comparative Study of the GPS Performance," 16th World Congress on Intelligent Transport Systems, Stockholm, Sweden, October 2009.
- [5] O. Le Marchand, P. Bonnifait, J. Ibañez-Guzmán, F. Peyret, D. Bétaille, "Performance Evaluation of Fault Detection and Exclusion Algorithms as Applied to Automotive Localisation", *In Proc. of the European Navigation Conference GNSS*, Toulouse, France, Apr. 2008.
- [6] D. Betaille and R. Toledo-Moreo, "Creating Enhanced Maps for Lane-Level Vehicle Navigation," IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems., vol. 11, no. 4, pp. 786-798, 2010.
- [7] "Minimum Operational Performance Standards For Global Positioning System/Wide Area Augmentation System Airborne Equipment". RTCA, RTCA/DO-229C Nov. 28, 2001 Supersedes DO-229B. 2001
- [8] Cooperative Vehicle Infrastructure Systems. European Project of the 6th Framework Program. www.cvisproject.org
- [9] R. Toledo-Moreo, David Bétaille, François Peyret, "Lane-Level Integrity Provision for Navigation and Map Matching With GNSS, Dead Reckoning, and Enhanced Maps", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 11, No. 1, pp. 100–112, March 2010.
- [10] John Canny. "A computational Approach to Edge Detection". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Inteligence. Vol. 8. NO. 6, November 1986.
- [11] G. Blewitt. "Basics of the GPS Technique: Observation Equations". Department of Geomatics, University of Newcastle. Technical Report.
- [12] S. Bancroft. "An algebraic solution of the GPS equations". IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. AES-21, pp. 56-59. 1985.
- [13] L. Harte, B. Levitan. "Global Positioning System (GPS)". Althos books. ISBN: 1-932813-30-6. 2009.

## **MULTIPATH MITIGATION WITH**

## **ELEVATION-ENHANCED MAPS**

Carolina Piñana-Diaz

Phd Student, University of Murcia DIIC, Facultad de Informática, 30100 +34 968326586, +34 968326400, <u>Carolina.pinana@um.es</u>

#### **Rafael Toledo-Moreo**

Professor, Universidad Politécnica de Research Fellow, University of Murcia Cartagena, DETCP, ETSIT, Cartagena. DIIC, Facultad de Informática, 30100 +34 968325948, +34 968326400, <u>rafael.toledo@upct.es</u>, <u>toledo@um.es</u>

#### Antonio Gómez Skarmeta

Full Professor, University of Murcia DIIC, Facultad de Informática, 30100 +34 868884607, +34 868884151, <u>skarmeta@um.es</u>

## ABSTRACT

Error free vehicular positioning is necessary for the success of a number of safety and liability-critical positioning-based applications. However, in certain environments such as built-in areas it appears difficult that the Global Positioning System (GPS) signals arrive at the receiver antenna without suffering from multipath reflections, causing GPS outliers and wrong estimates of the position. This paper introduces a solution for mitigating the multipath effects in urban canyons based on a rather simple but sufficient description of the elevation environment stored in a digital map, an Elevation Enhanced Map or EEMap. The algorithm detects whether or not the solution given by the GPS system includes aberrant pseudorange measurements due to the reflection of the satellite signals in the surrounding buildings, and if it is the case, the wrong measurements are discarded.

## INTRODUCTION

Positioning errors due to multipath hinder the wide dissemination of Global Navigation Satellite Systems (GNSS) technology in safety and liability-critical in-vehicle applications such as fleet management or in-car navigation [1,2]. This problem has been identified by the community of the field of at least as important as the lack of coverage. Although new receivers are capable of catching more signals than in the past, many of these signals are

actually reflections coming from non-line-of-sight (NLOS) satellites. Consequently, their estimated pseudorange values are not valid, and the final estimate of the vehicle positioning erroneous. To cope with this, many different techniques can be exploited. Our approach to solve this problem is based on the fact that most of the multipath effects are due to the reflections in buildings around the vehicle environment. In this paper we suggest the use of EEMaps, for Elevation-Enhanced Maps. EEMaps represent in a simple way the main features of an urban environment regarding GNSS signal propagation: the height and position of the buildings that can affect the GPS coverage. This information has been modeled and extracted by means of simple techniques that allow fast prototyping and updates. The elevation information is integrated into an enhanced map (EMAP), such as the one co-developed by the authors [3] in frames of the CVIS project [4]. An elevation enhanced map (EEMap) of the buildings can be understood as a visibility map of the GPS satellites in flight that can inform whether or not a satellite is in direct view from a given location. If despite the fact that there is no direct view the signal arrives at the receiver, it is assumed that it is as a consequence of multipath reflections and the pseudorange measurement is discarded. Digital maps are necessary for most location-based-services and applications, and they are expected to be in every vehicle in the future years. The elevation vectors simply add a new layer to the digital map with elevation information capable to support vehicle positioning.

The rest of the paper is organized as follows: our EEMaps are introduced in the next section; after that, the positioning algorithms are described; following, field tests prove the validity of our concept; finally, main conclusions are drawn.

## **EEMAPS**

Following the line of the European CVIS project [4], where enhanced maps (Emaps) are developed to improve the quality of the vehicle positioning, our approach aims at avoiding multipath by exploiting the information stored in digital maps regarding building locations and sizes. Buildings are the elements that contribute more remarkably to multipath effects, particularly in the cities. For that reason, for the moment our solution only includes buildings. Bridges can also be taken into account in this approach since they can be described as roads segments in the frame of an Emap, as presented in [3], but they are out of the scope of this paper. Although trees also cause disruptions in the GNSS signals, in urban environments its impact is much less significant.

#### **BUILDING MODEL**

In the process of elevation map modeling, building modeling is the key to identify the necessary information to represent reliably buildings. In this work the World Geodesic System of 1984 (WGS-84) coordinate, which is the same coordinate used by the GPS receiver, was

selected as the coordinate to build the elevation map. Further conversions into Earth-Centered Earth-Fixed (ECEF) frame will be performed to compute user position and determine satellite visibility in urban areas. For each building, latitude and longitude values of the two corners nearest to the road are stored, as well as its width and height. The description of the buildings follows the format given in Table 1, where subscripts 1 and 2 stand for the 2D position ends of the facade under consideration (represented as the ends of each red segment in Fig. 1.



 Table 1. Building model parameters



Figure 1. Aerial view of an urban scenario with modeled buildings in Murcia, Spain.

## **EXTRACTION OF BUILDING FEATURES**

Two methods for extracting the model parameters of the buildings presented in Table 1 were developed, and are presented in the next sections. First method, named "Building Image-based Method", depends on the complete visibility of the building. Building images are obtained from Google Earth using the Street Viewer tool. This allows fast prototyping, avoiding extensive field campaigns for extracting the building features. However, since the complete view of the building is not always available, a second method named "Story-based Method" based on the number of stories is proposed. It consists in applying the same art as the "Building Image-based Method" in images that only show isolated parts of buildings, such as the ground or the first floor, something common in urban canyons. Finally, a comparison of both methods shows the consistency of our approach.

## **Building Image-based Method**

A dedicated algorithm based on Google Earth images processing is proposed for simply and efficiently obtaining building heights. The first step employs a frontal view of the building facade provided by the Street Viewer tool of Google Earth. Then, a Canny detector algorithm [5] is implemented to get an edge intensity image. The small-scale model obtained with the low-level detector provides edge information of the scene which is used to calculate the

relationship between the width and the height of the building. Since its real width can be measured in the aerial image provided by Google Earth (Fig.1), it is possible to extrapolate feature information to calculate the real height of the building. Fig. 2.a shows a frontal view of a building located in the street Avenida Juan Carlos I of Murcia, Spain. Its respective edge detected image is depicted in Fig. 2.b). Experimental results show that the proposed algorithm works well on cases in which a complete frontal view of the building is available in the Street Viewer tool of Google Earth.



Figure 2. a) Frontal view of a building for feature extraction. b) Edge intensity image after applying the Canny algorithm.

#### **Story-based Method**

An entire view of the facade of the building is not often available in Google Earth, especially in narrow streets with limited visibility where the only visible features correspond to the ground and first floors. In these cases, it is possible to use the prior algorithm to detect edges only of available parts and then extrapolate measurements to the whole building just by counting the number of stories. Given that the height of all the stories in a building is the same, by applying this technique the height of the entire building can be computed as follows:

$$h = k_1 \times s + k_2$$

where *s* denotes the number of stories,  $k_1$  represents a constant value of the height of an arbitrary floor and  $k_2$  is the height of the ground floor along with any extra element not included in a standard story of the building. Both parameters are obtained with the Canny detector estimation method.

## **COMPARISON**

To validate this algorithm a comparison between the building-image and story-based methods has been performed. Both techniques have been used to calculate heights of a subset of buildings located in Murcia, Spain. Results are given in Table 2. As it can be seen, the difference between heights computed using one or another method is only slightly different, with a median error percentage of 0.48%, and the methods show consistency. Additionally, these values can be compared with real values given by certain buildings with good results. A precise determination of the relative height errors based on precise elevation models and building databases is under progress. Nevertheless, the inaccuracies caused by the measurement tools of Google Earth are taken into account in the algorithm for determining the satellites in line-of-sight. As it will be shown, these building models presented in this section will be a powerful tool in order to decide whether a certain satellite may be in direct view or not.

Building ID	Method 1	Method 2	Relative error
1	26.27	26.36	0.0034
2	38.99	38.70	0.0074
3	26.65	26.85	0.0075
4	25.07	25.01	0.0025
5	19.92	19.98	0.0033

Table 2. Comparison of building heights estimates.

## **POSITIONING ALGORITHM**

This section describes the algorithms developed for verifying the goodness of the concept introduced in the paper. In Fig. 3 a flowchart shows schematically the steps followed to provide multipath free positions.

First, the algorithm that detects whether a satellite is in LOS or in NLOS, called from now on the NLOS detection algorithm is applied. Inputs of that process are the satellite measurements, the EEMap, and an estimate of the vehicle position obtained for instance from a simple extended Kalman filter. NLOS satellites are discarded, and only satellites in LOS are used as inputs of the second step, the GPS problem solving algorithm, that provides the position of the antenna. For this step, two different approaches are developed: the most common Least Squares (LS) algorithm, and the Bancroft approach. The use of two different positioning algorithms helps avoiding the possible influence of the particularities of an algorithm on the results. In our work both appear to be consistent providing in general similar results. Let us remark here that ionospheric and tropospheric error corrections are not considered in order to emulate the function of a simple GPS receiver. For the same reason, the GLONASS constellation is not exploited.



Figure 3. Flowchart scheme of the positioning process.

## **NLOS DETECTION ALGORITHM**

With the aim of taking into account only satellites in direct view for GPS position calculation, a multipath detection algorithm is proposed for efficiently reject satellites that are in NLOS. Since satellite positions can be obtained with the GPS receiver and the coordinates of the corners of the buildings nearest to the road are stored in the EEmap, the following algorithm determines if a satellite signal is received through a direct path. Otherwise the proposed method rejects it. It is important to note that an initial estimate of the receiver position is required in order to determine satellite visibility in a given area. Let us define  $\mathbf{u}_1$ ,  $\mathbf{u}_2$  as the position vectors from the estimated position of the receiver to both the corners of a given building and v the vector from the same estimated position of the receiver to a "potentially" visible satellite captured by the receiver. As that the height of the building has been obtained by the algorithm formerly described, the interval of non-visibility for a given building can be calculated just determining the angles between both  $\mathbf{u}_1$  and  $\mathbf{u}_2$  and  $\mathbf{w}_2$ , being  $\mathbf{w}$  the imaginary line from the initial estimate of the receiver position and the upper corners of the building. Once the angles for which a building blocks a path are known, we compute visibility angles for each of the satellites detected by the GPS receiver. As mentioned before, we denote  $\mathbf{v}$  the position vector from the initial estimate of the receiver position and satellite  $i \{0 \le i \le n\}$ , where *n* corresponds to the total numbers of satellites detected.

The interval of visibility for satellite *i* will be calculated from the angles between **v** and the defined above **w**. Defining  $[\alpha^{l}, \alpha^{2}]$  as the interval of occultation of a given building
(superscripts 1 and 2 stand for each upper corner) and  $[\alpha_{svi}^{l}, \alpha_{svi}^{2}]$  the interval of visibility of satellite *i* regarding the building:

```
\begin{split} & \text{if } [\alpha_{sv_i}^1, \alpha_{sv_i}^2] \leq [\alpha^1, \alpha^2] \\ & \text{then} \Rightarrow \text{Satellite } i \text{ is in NLOS} \\ & \text{else if } [\alpha_{sv_i}^1, \alpha_{sv_i}^2] > [\alpha^1, \alpha^2] \\ & \text{then} \Rightarrow \text{Satellite } i \text{ is in LOS} \\ & \text{end} \end{split}
```

NLOS satellites are flagged as not valid for the GPS computation, while those in LOS are accepted. Applying this concept for each the receiver it is possible to determine visibility of detected satellites along an urban dense area with tall buildings.

## LEAST SQUARES ALGORITHM

Under the assumption that the pseudorange measured with a GPS receiver,  $P_{observed}$ , is the sum of a modeled observation,  $P_{model} = P_{x,y,z,\tau}$ , plus an error term v, it can be written  $P_{observed} = P_{x,y,z,\tau} + v$ . Applying Taylor's theorem, the residual observation is defined to be the difference between the actual observation and the observation computed using the provisional parameter values:

$$\Delta P \equiv P_{observed} - P_{computed} = \frac{\partial P}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial P}{\partial y} \Delta y + \frac{\partial P}{\partial z} \Delta z + \frac{\partial P}{\partial \tau} \Delta \tau + v$$

what can be written with matrix notation as  $\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{v}$ , which depicts a linear relationship between the residual observations  $\mathbf{b}$  and the unknown correction to the parameters  $\mathbf{x}$ . The column matrix  $\mathbf{v}$  contains all the noise terms, which are also unknown at this point. The least squares solution can be found by varying the value of  $\mathbf{x}$  until the sum of squares of the estimated residuals,  $J(\mathbf{x})$  is minimized. More details of the LS method can be found in [6].

#### **BANCROFT ALGORITHM**

The direct version of the algorithm Bancroft provides an algebraic and non-iterative solution to the measurement equations. To avoid an excessive paper length, it is not possible here to include the whole description of the algorithm. Interested readers can find details in [7].

Neglecting refraction effects, satellite clock offsets and measurements errors, the pseudorange measured with a GPS receiver,  $P_i$ , is the sum of the satellite-to-receiver distance, and the receiver clock offset, dt, multiplied by the speed of light, c, where the subscript i identifies the satellite.

$$P_i = \sqrt{(X_i - X)^2 + (Y_i - Y)^2 + (Z_i - Z)^2} + c \, dt$$

The following  $1 \times 4$  column data vectors are defined:

$$\mathbf{a}_i = (\mathbf{r}_i^T P_i)^T \qquad r_i : \{1 \le i \le n\}$$

With

$$\mathbf{A} = (\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2, \mathbf{a}_3 \dots \mathbf{a}_n)^T$$
$$\mathbf{I} = (1, 1, 1 \dots 1)^T$$
$$\mathbf{r} = (\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \mathbf{r}_3 \dots \mathbf{r}_n)^T$$

Where  $\mathbf{r}_i$  is computed from

$$\mathbf{r}_i = \langle \mathbf{a}_i, \mathbf{a}_i \rangle / 2$$

And given that the Minkowski functional 4-space and two given vectors **m**,**n**, can be written as:

$$\langle \mathbf{m}, \mathbf{n} \rangle = m_l n_1 + m_2 n_2 + m_3 n_3 - m_4 n_4$$

The generalized inverse can be computed

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{W}$$

where W is a symmetric positive definite weighted matrix. In this case we assign W the identity matrix and the expression becomes

$$\mathbf{B} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T$$

Following the notation of [7] we compute the  $1 \times 4$  column vectors **u** and **v** from  $\mathbf{u} = \mathbf{B} \mathbf{l}$ ,  $\mathbf{v} = \mathbf{B} \mathbf{r}$ , together with the scalar coefficients E, F and G defined by:

$$E = \langle \mathbf{u}, \mathbf{u} \rangle$$
  

$$F = \langle \mathbf{u}, \mathbf{v} \rangle - 1$$
  

$$G = \langle \mathbf{v}, \mathbf{v} \rangle$$

Then, solving the quadratic equation

$$E\lambda^2 + 2F\lambda + G = 0$$

The receiver position is obtained

$$\mathbf{y}_{1,2} = \lambda_{1,2}\mathbf{u} + \mathbf{v}$$

Where the subscripts 1 and 2 denote the two solutions obtained from this equation. To distinguish the good position, we substitute back into the equations defining the original pseudoranges. There is agreement in only one case.

# **EXPERIMENTS**

The concept introduced in this paper was validated by means of real tests in different urban scenarios in Spain. The data were collected by a DGPS receiver onboard the vehicle, with the antenna installed on the top of the car. The ground truth reference is obtained in post-processing with a double frequency DGPS.

## **TYPES OF SCENARIOS**

For the analysis of GPS coverage and multipath effects, scenarios can be classified as:

- *Open*: urban residential streets with townhouses and little or no foliage (excellent satellite visibility).
- *Medium*: suburban to city scenarios with wide avenues and buildings of eight stories or more on one or both sides (good satellite visibility).
- *Built-up*: urban canyons with four or less lanes in the carriageway, sidewalks, and buildings of eight or more stories on both sides (Figure 5.a)

*Medium* and *built-up* scenarios are the most interesting ones for multipath analysis and for that reason were selected for our experiments.



Figure 4. Scenario with good visibility and multipath-free: P (green) stands for the ground truth reference;  $P_R$  (cyan), the receiver output;  $_{PLSQ}$  (red), the least squares solution;  $P_{BK}$  represents the solution obtained employing the Bancroft algorithm.

#### **FIELD TESTS**

Experimental trials along a run in a highly masked environment in Murcia, Spain, were performed for proving the concept. Fig. 4 shows results in a situation in which the algorithm determines that nearest buildings do not affect satellite views. Thus, satellites are received with a direct path and the receiver solution taking them into account is well calculated. Similar results to the solution given by the receiver (cyan) have been obtained from both Bancroft (yellow) and Least Squares (red) methods. Position estimates presented in this image do not account for the ionospheric and tropospheric errors, with a consequent reduction of the position accuracy for all the solutions.



 Image: state stat

b)

Figure 5. Built-up scenario where multipath appears. a) Image of the scenario. b) Aerial view: P (green) stands for the ground truth reference;  $P_{RX}$  (cyan), the receiver output;  $P_{NLOS}$  (red), the two best GPS solutions combining 4 satellites being one in NLOS;  $P_{DV}$  (yellow) represents the solution obtained employing the only combination of 4 satellites in direct view (LOS).

Fig. 5 represents a scenario with a typical situation where some of the satellites used by the receiver for computing GPS position are not in direct view because the nearest buildings block the path. Consequently, position solutions (shown in bottom image) that employ faulty pseudoranges (in red) are far from the ground truth (green), not meeting the GPS specifications. Also the receiver output (cyan), that uses 5 satellites but including one in NLOS, is far from the Bancroft solution calculated with the satellites in LOS (yellow).

Fig. 6 shows the value of the horizontal positioning error (HPE) estimated comparing GPS solutions employing Bancroft along a short period of time in a test performed in Murcia downtown (an image of the test scenario can be seen in Fig. 5.b. Results obtained with the Least Squares algorithm offer similar conclusions and will not be discussed. During this trajectory, the receiver detected 4 satellites in view during the first 3 seconds. These satellites are identified for the sake of simplicity as 2, 3, 4 and 5. One more satellite, numbered 1, is detected at instant t = 3s. The proposed NLOS detection algorithm reports that satellite 1 is in NLOS situation, although the receiver did not detect it. For that reason, the receiver output is aberrant, as shown in Fig. 5.a with a cyan circle. On the right side of Fig. 6 are depicted the 4 different GPS solutions calculated using satellite 1 with different symbols and colors. Since the pseudorange value of satellite 1 is erroneous, the consequent position estimates are wrong. The EEMap-based algorithm under consideration informs that the solution obtained employing satellites 2, 3, 4 and 5 is the only one that uses exclusively satellites in LOS, offering consistency in the solution by removing the multipath effects from the GPS output.

# CONCLUSIONS

Multipath mitigation can benefit from the information regarding building location and size stored in digital elevation-enhanced maps (EEmaps). The work presented in this paper aims at proving that a simple characterization of the vehicular environment can support the detection of faulty positions affected by multipath effects. To do it so, simple models of buildings were developed. The process of extraction of building features presented in the paper is relatively easy, flexible and fast. Highly precise, heavy and detailed models of buildings are disregarded in favor of light maps with only the most fundamental information. Among some other benefits, the proposed EEMap can be easily updated and downloaded where demanded. Additionally, an algorithm that exploits the information stored in the process of GPS positioning estimation. For that purpose, two GPS algorithms were developed and tested. The EEMap-based positioning algorithms were successfully applied in several field tests in scenarios with different features, proving the validity of our concept, although further tests are required before offering more detailed conclusions.



Figure 6. Horizontal Positioning Error (HPE) during a period of 4 seconds. From t = 0s till t = 2s, the receiver detects only four satellites available (2 - 5). Therefore, there is only a possible combination and unique GPS solutions at each epoch during this period. At instant t = 3s a new satellite (1) becomes available, resulting 5 satellites in view. The colored symbols (green \*, magenta +, blue  $\times$ , red  $\square$  and black  $\bigcirc$ ) identify the 5 different combinations of 4 satellites that lead to different positioning estimates.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank José Santa, Miguel Ángel Zamora, Benito Úbeda and Pedro Pablo Martínez for their support in the test campaigns in Murcia. This work has been carried out inside the Intelligent Systems and Telematics group of the University of Murcia, awarded as an excellence researching group in frames of the Spanish Plan de Ciencia y Tecnología de la Región de Murcia (04552/GERM/06). It has been supported by the Spanish Ministry of Transportation and Ministry of Science and Innovation under the projects SATELITES (FOM/2454/2007) and SEISCIENTOS (TIN2008-06441-C02) respectively, and the European Commission under the project PELGRIN CIPS/AG/C2-069.

#### REFERENCES

- (1) GfK, "Portable satellite navigation systems on the road to success", www.gfk.com/group/pressinformation/pressreleases/002095/index.en.html, 2008.
- (2) M. Tsakiri, M. Stewart, T. Forward, D. Sandison, and J. Walker, "Urban fleet monitoring with GPS and GLONASS", *The Journal of Navigation*, vol. 51, pp. 382-393. Sep. 1998.

- (3) Bétaille, D., Toledo-Moreo, R. "Creating Enhanced Maps for Lane-Level Vehicle Navigation". *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. Dec. 2010 Vol: 11 Issue:4.Pp: 786 – 798.
- (4) CVIS project. Cooperative Vehicle Infrastructure Systems. European Project of the 6th Framework Program. <u>www.cvisproject.org</u>
- (5) John Canny. "A computational Approach to Edge Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Inteligence*. Vol. 8. NO. 6, November 1986.
- (6) G. Blewitt. "Basics of the GPS Technique: Observation Equations". Department of Geomatics, University of Newcastle. Technical Report.
- (7) S. Bancroft. "An algebraic solution of the GPS equations". *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System*, Vol. AES-21, pp. 56-59. 1985.



Article

# A Two-Layers Based Approach of an Enhanced-Map for Urban Positioning Support

Carolina Piñana-Díaz $^1$ , Rafael Toledo-Moreo $^{2,\star}$ , F. Javier Toledo-Moreo $^2$  and Antonio Skarmeta $^1$ 

- <sup>1</sup> Department of Information and Communication Engineering, Facultad de Informática, Universidad de Murcia, Campus de Espinardo, Murcia, Spain;
   E-Mails: carolina.pinana@um.es (C.P.-D.); skarmeta@um.es (A.S.)
- <sup>2</sup> Department of Electronics and Computer Technology, Universidad Politècnica de Cartagena, ETSIT, Cartagena, Spain; E-Mail: javier.toledo@upct.es
- \* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: rafael.toledo@upct.es; Tel.: +34-9683-25948; Fax: +34-9683-26400.

Received: 10 September 2012; in revised form: 19 October 2012 / Accepted: 19 October 2012 / Published: 29 October 2012

**Abstract:** This paper presents a two-layer based enhanced map that can support navigation in urban environments. One layer is dedicated to describe the drivable road with a special focus on the accurate description of its bounds. This feature can support positioning and advanced map-matching when compared with standard polyline-based maps. The other layer depicts building heights and locations, thus enabling the detection of non-line-of-sight signals coming from GPS satellites not in direct view. Both the concept and the methodology for creating these enhanced maps are shown in the paper.

Keywords: mapping; enhanced maps; positioning

#### 1. Introduction

Many applications based on vehicle localization, such as navigation systems, fleet management or Electronic Toll Collection (ETC), are a reality today thanks to the so-called Global Navigation Satellite Systems (GNSS) and digital maps. GNSS devices are exploited to estimate the vehicle location, while digital maps are used to refer this location to the road segments where the vehicle drives.

However, location-based applications must face serious drawbacks in urban environments, where perhaps safety systems and location-based services become of more necessity. Main drawbacks can be summarized as follows:

- In urban built-up areas, the satellite signals used by GNSS sensors to estimate the vehicle location are strongly affected by the environment. GNSS signals are reflected, dispersed and attenuated by buildings, other vehicles, trees, *etc.* [1].
- While in highways and interurban areas the road layout trends to be simple and the most common approach to define the road shape based on polylines works well [2], in cities the road layout is far more complex and the polylines lack the necessary flexibility to accurately define the road shape. Therefore, standard digital maps are not always suitable as location reference.
- Map-matching algorithms must perform an extremely challenging task if we consider the large number of possible road segments to match the position of the vehicle, the GNSS errors and the lack of completeness and accuracy of the digital maps [3].

The concept of Enhanced Digital maps (EDmaps), also known as Enhanced Maps (Emaps), appeared with the purpose of creating better maps that could satisfy the needs of some vehicular applications with requirements of terms of map accuracy and completeness higher than those offered by standard maps [4]. Emaps are meant to be more complete and accurate than standard maps. To do so, Emaps may store more detailed data or some parameters that are not usual in standard maps based on polylines.

Our Emap proposal aims at supporting positioning and map-matching in urban areas, for which it stores information in two different layers:

- A road layer, dedicated to describe urban road layouts that is flexible enough to model complicated shapes. When developing Emaps, most of the authors focus their efforts on the accuracy of the centerline of the lane and the estimate of the road curvature. However, in this work another relevant aspect of the map is covered: the accurate representation (in our case, at submeter accuracy) of the road borders in an urban environment, which is contrary to the most common approach of depicting the centerlines, the number of lanes and their widths. This allows further possibilities in map-matching algorithms that can benefit from a more complete description of the road, providing more precise allocations of the vehicles, that are not necessarily referred to the centerline.
- An elevation layer that contains locations and heights of the buildings along the road. This way, when a vehicle is on a given point of the road, it will be feasible to create a visibility map of the GNSS satellites, detecting whether a satellite is in Line-Of-Sight (LOS) or in Non-Line-Of-Sight (NLOS). When solving the calculation of the vehicle positioning, NLOS satellites can be then removed, avoiding the biases introduced by the multipath effects caused by faulty measurements coming from NLOS satellites. Due to the elevation information stored in the map, the model presented in this paper is named Elevation-Enhanced map, or simply EEmap.

The rest of the paper goes as follows: Section 2 presents most relevant works published in this field. Section 3 introduces the EEmap concept and model. Next, Section 4 explains the creation process of the EEmap. Section 5 shows some relevant considerations in terms of accuracy and memory use. Finally, Section 6 concludes the paper.

#### 2. Related Works

Due to its benefits, the concept of enhanced road map has been exploited in former works of the authors in order to achieve lane-level positioning [5], lane-change detection [6] or position integrity [7]. This work follows this research line, adding new contributions to this field.

Some other authors have exploited the information stored in navigable maps for map-aided positioning [8,9]. Also, new developments are under progress in the R&D teams of most map providers [10,11] to bridge the gap between the mapping standards and the requirements of advanced driving assistance applications (ADAS).

To the best of the authors' knowledge, there are no works in the literature that cover within the same EEmap concept the two problems addressed in this paper: modelling the vehicle drivable space, and supporting NLOS with a previously created digital map.

Most commonly, Emaps with an emphasis on the road layer focus on the accurate description of the road centerline or its curvature. Bétaille *et al.* [12] present a lane-level Emap based on clothoids with submeter accuracy at the lane-centerline, although complex crossroads and roundabouts are not included as a part of the Emap. Wang *et al.* in [13] include intersection points aiming at better describing the road curvature at them. Following a different approach, the French Institut National de l'Information Géographique et Forestière (IGN) has developed a triangle-based road/street model available only in certain areas, introducing an interesting alternative to the centerline based description [14]. Although triangles represent the most general geometrical shape for describing a surface, it is the authors' opinion that some other figures may represent the road shape with better accuracy and less memory demand.

With regard to the elevation layer, some related works such as [15] introduced the idea of creating a map of the obstacles for sky visibility, in this occasion applied to the railways domain. In [16], a fish-eye infrared camera was used to map the satellite positions with respect to the surrounding buildings. More recently, Marais *et al.* [17] addressed this issue for guided transport in urban environments, using also a fish-eye camera on the vehicle and aiming at building in real-time a 3D model from the successive images.

Contrary to the approach of creating visibility maps of the sky on the spot while driving, our work focuses on previously created and stored maps that can be accessed when needed. In particular, only the road elevation itself plus buildings are considered, since buildings are the elements that play the most relevant role in multipath effects [18–20]. In this line, Costa [18] employs a simulation model that includes a digital elevation model, building databases and a vegetation model to process an azimuth-elevation map of path states (clear, shadowed and blocked) for a large number of observers. This simulation model is exploited for studying and planning satellite-based location and navigation applications. In [20], the authors employ a sophisticated 3D city model to determine the building boundaries for GPS visibility, although the 3D model itself and its creation are not explained in the paper. Peyret *et al.* in [21] exploit a GIS map and a graphic tool to estimate the heights of the buildings, what is further applied to NLOS detection. The map employed in the tests carried out in [21] is a project of the French IGN that adds information about the buildings along the urban streets. At the time of developing our work, a few districts of France were covered by the IGN Batimap project. A comparison between this map and our proposal is presented later on in the paper.

Finally, let us remarks that a first concept of the elevation layer presented in this work was introduced in [22].

#### 3. EEmap Concept

An schematic vision of the EEmap and its two layers is shown in Figure 1. The road layer is presented in dark grey and it depicts the road flooring, opposite to the light grey color of the sidewalks (or more precisely any non-drivable space). The characteristics of our road layer model makes it feasible to describe the surface of such shapes as the one presented in this figure, with both straight and rounded elements. This will be described in more details in Section 3.1. Buildings are drawn in blue and represent the obstacles that block the GPS satellite signals from reaching the receiver antenna in a direct ray. The principle of how this layer can support positioning is also shown in Figure 1. For a given vehicle position, the azimuth and elevation angles of each *i* GPS space vehicle (SV<sub>i</sub>) are calculated, respectively  $As_i$ ,  $Es_i$ . Then, a first comparison between the  $As_i$  and the blockage azimuth angle of a given *j* building,  $Ab_j$ , is performed. If  $As_i$  is within the  $Ab_j$  interval, a second comparison is made between the elevation angle of  $Es_i$  and the elevation angle of the building  $Eb_j$ . In the image of Figure 1, examples of two different cases are represented. SV<sub>1</sub> is blocked by building 1 and therefore SV<sub>1</sub> is classified as in NLOS at that instant. On the contrary, no buildings block the SV<sub>2</sub> signal and consequently this satellite is assumed to be in LOS. This is the concept of the NLOS detection algorithm based on our EEmap.

Both layers complement each other and may be exploited at different instants of the positioning and map-matching loop. A scheme of this process is presented in Figure 2. After the GNSS receiver collects measurements from tracked satellites, the NLOS detection algorithm decides whether a satellite is in LOS or in NLOS. Inputs of this algorithm are the satellite measurements, the EEMap, and a prior estimate of the vehicle position obtained for instance from a particle filter (PF). NLOS satellites are discarded, and only satellites in LOS are used as inputs of the second step, the GPS solving algorithm, that provides the position of the antenna. For this step, a Least Squares algorithm was developed and presented in [22]. After that, it is evaluated whether or not the estimated position belongs to the drivable road. Following the example of the PF, particles that are out of the road limits will be eliminated. This will lead to a new PF centroid that considers only feasible options. Finally, this best estimate is reintroduced in the positioning loop to be used in the next step. This way, the road layer of the EEmap supports the NLOS detection by adding more information into the loop, both horizontally (the vehicle shall be within the road bounds) and vertically (the vehicle shall be on the road and not over or under it). Consequently, thanks to the road layer, NLOS detection can be more accurate, resulting in a more accurate location estimate of the vehicle.

Although both EEmap layers can be exploited by independent algorithms with different purposes, it is the authors' intent to present them as a single EEmap concept, in which the interaction between both layers may bring extended benefits to the positioning estimate thanks to the redundant information.



Figure 1. EEmap concept with relevant angles for the NLOS detection algorithm.

**Figure 2.** Positioning loop with the NLOS algorithm, the GPS algorithm and the position feasibility algorithm.



In the next two sections, the principles of both the road and the elevation layers models are described.

#### 3.1. Road Layer

The concept of road layer is based on a small set of plane figures located in a 3D environment and defined by a certain number of descriptors. Each figure represents a portion of roadway and the succession of these figures arranged next to one another defines the complete form of the road.

In our model, there are four basic types of figures to describe the road shape. Figure 3 shows a small area of the city of Murcia, Spain, where these four elements are depicted. The next sections describe these figures in detail.

**Figure 3.** Superposition of some EEmap figures (in green, blue, red and yellow) over the roads of the city of Murcia, Spain.



#### 3.1.1. Trapeze

This figure is used to define straight portions of the road (see green figures in Figure 3). These stretches can vary in width along the longitudinal axis, which is being modelled by adapting the width of the trapeze bases v and w, as shown in Figure 4(a). Its descriptors are as follows:

- w: width of the base opposite to the reference point.
- v: width of the base containing the reference point.
- x, y, z: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the central point of the base.
- *j*: argument (between 0 and  $2\pi$ ) of the vector joining the midpoints of the bases with respect to the plane *XY*.
- jz: argument (between  $+\pi/2$  and  $-\pi/2$ ) of the vector joining the midpoints of the bases with respect to the Z axis.
- *l*: distance of the projection of the trapeze height with respect to the plane *XY*.



Figure 4. EEmap road figures with descriptors.

#### 3.1.2. Crown Sector

The crown sector aims to describe roundabouts with both an outer and an inner radius that adjust to the width of the road (see yellow figures in Figures 3 and 4(b) for a description of its parameters). Values of j and k, measured in radians, are used to determine the argument of the polar coordinates of the crown lateral bounds in the radial direction of the crown sector with respect to its center. The descriptors of a crown sector are:

- x, y, z: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the central point of the roundabout.
- *j*: argument (between 0 and  $2\pi$ ) of the vector joining one side of the crown to the center of the roundabout.
- k: argument (between 0 and  $2\pi$ ) of the vector from the other side of the crown to the center of the roundabout.
- *jz*: argument (between +π/2 and -π/2) of the vector from the center of the roundabout to the side described by *j* with respect to the *Z* axis.
- kz: argument (between +π/2 and -π/2) of the vector from the center of the roundabout to the side described by k with respect to the Z axis.

- *r*1: radius of the inner arc.
- r2: radius of the outer arc.

#### 3.1.3. Arrowhead

The borders of the road in an intersection are rarely composed of sharp-pointed or well-defined angles but are described by rounded shapes (see red figures in Figure 3). This figure is similar to a triangle, but having one of its sides curved, making it easy to describe those portions of the road by varying point (cx, cy) and radius r as shown in Figure 4(c).

- x, y, z: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the main vertex (between both straight sides).
- *j*: argument (between 0 and  $2\pi$ ) of the vector that describes one side of the arrowhead with respect to the main vertex in the plane *XY*.
- k: argument (between 0 and  $2\pi$ ) of the vector that describes the other side of the arrowhead with respect to the main vertex in the plane XY.
- jz: argument (between  $+\pi/2$  and  $-\pi/2$ ) of the vector described by j with respect to the Z axis.
- kz: argument (between  $+\pi/2$  and  $-\pi/2$ ) of the vector described by k with respect to the Z axis.
- cx, cy: coordinates East, North (UTM) of the center of the circle that describes the lateral curve.
- r: radius of the arc whose center is cx, cy.
- v: this parameter represents the largest of the lengths of the straight sides in the arrowhead. Although its inclusion is not necessary, it is introduced to improve the computational efficiency when checking if a point is inside the figure.

#### 3.1.4. Triangle

Since the triangle is the cornerstone of any polynomial geometric figure, its inclusion is necessary to complete the remaining portions of the roadway that cannot be well depicted by the three aforementioned EEmap elements (see blue triangles in Figure 3). The triangle data descriptors define its vertices in a three-dimensional environment (Figure 4(d)).

- xA, yA, zA: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the vertex A.
- xB, yB, zB: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the vertex B.
- xC, yC, zC: coordinates East, North, Elevation (UTM) of the vertex C.

#### 3.2. Elevation Layer

The elevation layer stores information of the buildings' location and heights. For each building, the UTM coordinates of the two corners nearest to the road are stored, as well as its width and height (Figure 1). The description of the buildings follows the format given in Table 1, where subscripts 1 and 2 stand for the 2D position ends of the facade under consideration. In this approach, both corners of the facade share a single value of altitude. This can be done since buildings are normally horizontal, even if the road is tilted, and it will be the roof of the building (and not the ground) that defines the sky visibility.





#### 4. EEmap Creation

#### 4.1. Road Layer

The creation of this layer is carried out by means of computer-assisted photogrammetry. To do so, a specific web tool that was presented in [23] was created. The application uses AJAX technology [24] to maintain communication with the server, and contains a database where the descriptors of the figures of the map are stored. The images used to carry out the task of photogrammetry are supplied by Google Maps, offering a resolution in the satellite images suitable for the purpose of this work. This web tool is quite simple and fast to use without detriment to the accuracy. The process of map-making exploits a set of drawing tools of the web application that assist the manual draw of figures on a map image. An overview of it is shown in Figure 5.

**Figure 5.** Overview of the web tool developed to create the road layer of the EEmap. On the right, the toolbar and drawing assistant; on the left, the map drawing overlaying the aerial image of an urban area of Murcia, Spain.



#### 4.2. Elevation Layer

Two methods for extracting the model parameters of the buildings presented in Table 1 were developed and are presented in the next sections. The first method, named Building Image-based Method, depends on the complete visibility of the building. Building images are obtained from Google Earth using the Street Viewer tool. This allows fast prototyping, avoiding extensive field campaigns for extracting the building features. However, since the complete view of the building is not always available, a second method named Story-based Method based on the number of stories is proposed. It consists in applying the same art as the "Building Image-based Method" in images that only show isolated parts of buildings, such as the ground or the first floor, something common in urban canyons. In subsequent discussions, a comparison of both methods will show the consistency of our approach.

#### 4.2.1. Building Image-Based Method

A dedicated algorithm based on Google Earth images processing is proposed for simply and efficiently obtaining building heights. The first step employs a frontal view of the building facade provided by the Street Viewer tool of Google Earth. Then, a border detector algorithm is implemented to get an edge intensity image. The small-scale model obtained with the low-level detector provides edge information of the scene, which is used to calculate the relationship between the width and the height of the building. Since its real width can be measured in the aerial image provided by Google Earth, it is possible to extrapolate feature information to calculate the real height of the building. As it will be shown later on in the paper, experimental results show that the proposed algorithm works well in cases where a complete frontal view of the building is available in the Street Viewer tool of Google Earth.

#### 4.2.2. Story-Based Method

An entire view of the facade of the building is not always available in Google Earth, especially in narrow streets with limited visibility where the only visible features correspond to the ground and first floors. In these cases, it is possible to use the prior algorithm to detect edges only of available parts and then extrapolate measurements to the whole building just by counting the number of stories. Given that the heights of the regular stories of a building are all the same, by applying this technique the height of the entire building can be computed as follows:

$$h = k_1 \times s + k_2$$

where s denotes the number of stories,  $k_1$  represents a constant value of the height of an arbitrary floor and  $k_2$  is the height of the ground floor along with any extra element not included in a standard story of the building. Both parameters are obtained with the detector estimation method.

#### 5. Considerations of Accuracy and Memory Use

The EEmap concept presented in this paper will be valid as long as the information stored in it is accurate enough and the corresponding memory needs will not be a stopper. These two aspects are analyzed in the next sections.

#### 5.1. Accuracy

#### 5.1.1. Road Bounds

The main purpose of this layer is to describe urban roadways with better accuracy than standard maps based on polylines. In particular, since the area to be mapped is modelled with figures that adapt to the road shape, the borders of the roadways are defined with much more accuracy. This results in interest for vehicle positioning and map-matching algorithms, especially when techniques based on particle filters, bounded-errors, interval analysis or belief theory are used [7,25].

The final accuracy of the EEmap depends on several factors:

- The quality and accuracy of the aerial image. The web tool developed for EEmap creation is supported by Google Maps. In the tests made in several cities of Spain, its quality was found sufficient to achieve at least sub-meter accuracy at the road border. Although there may be some absolute errors caused by drifts in the aerial view, in the tests carried out no significant errors were found. Nevertheless, solving this problem is out of the scope of this work. In addition, occasionally trees and other objects may block the view of the road border although these situations are very unusual.
- Model limitations. The figures presented in this work have been selected because they can represent the road shape with good accuracy and they complement one another. In addition to that, the computational complexity of determining whether certain UTM coordinates are within the figures was also taken into consideration. Due to the limited number of figures, there may be situations where the suitability is not optimal. Although these situations are unusual in urban environments, even in these cases the intended accuracy can be achieved by means of modelling the road with the option *free drawing*, where the polygon entered by the user is automatically broken down in an optimal number of triangles.
- The operator skills. As with any other human-driven process, the capabilities of the EEmap web tool user to develop the best strategies will condition the final quality of the EEmap. Nevertheless, it is the authors' belief that the tool developed is simple to use.

The benefits in terms of accuracy achieved when characterizing urban roadways with the EEmap model compared with the conventional maps based on polylines depend on the area under consideration, the shape of its roadway and the quality of the standard maps there.

Figure 6(a) shows an example of an interesting area near a roundabout. In the upper image, the EEmap (in blue) is superimposed on the aerial view of the area. In the lower image, the polyline-based map is displayed together with the EEmap figures in blue. It can be observed that the polyline-based map differs from the middle of the street, which would add errors in map-matching. Some errors caused by the map model are also visible (remarked with red arrows in the image).

Figure 6(b) shows another example of this situation. At the bottom of the image, lanes on the direction from right to left are represented in the commercial map with a common centerline (solid black) and the road width (black dashed line). Two intersecting roads are also depicted in the same way. The EEmap of this area is superimposed in green. Brown areas are overlaps between both the commercial and the enhanced maps.

**Figure 6.** (a) Top: aerial view of the scenario under consideration with superimposed EEmap (in blue); Bottom: inaccuracies in the polyline-based map with an overlaying EEmap (in blue). (b) Black: centerline of the polyline-based map. The inaccuracies committed in the assumption of a fixed lane-width can be seen (superimposed in red) together with the imprecision of the mid-lane. Black-dash lines show the limit of these lanes. Green: superimposed EEmap.



In our tests performed in the South of Spain, it was usual to detect errors of several meters in commercial city maps. Most commonly, errors are at the level of 4 or 5 meters, but in some situations its value can reach more than 10 meters. These error values in the maps entail insuperable barriers for positioning and map-matching algorithms, especially when lane-level is aimed.

#### 5.1.2. Elevation

As aforementioned, two different methods named building image-based method and story-based method are used to create the EEmap, depending on the visibility of the buildings in the Google street viewer. The former will be used when there is good visibility of a building in the Google Street Viewer, and the latter will be used when only the height of the lower stories and its number are available. To disentangle the possible influence of using one method or another on the accuracy of the EEMap, both techniques have been compared with buildings located in Murcia, Spain. A sample of the results is given in Table 2. As it can be seen, the difference between heights computed using one or another method is

only slightly different with a median relative difference of 0.0048. Therefore, it can be assessed that the use of one method or another makes no significant difference.

The goodness of the buildings' measurements obtained following our methodology has been validated by using the data of the French IGN Batimap, formerly introduced in Section 2. The differences in ten buildings of France are shown in Table 3. Heights are always consistent, and the relative difference between both datasets is always lower than 0.05 with an average of 0.032. In absolute terms, maximum differences are around half a meter.

Bldg Id	Method 1	Method 2	Absolute Difference	Relative Difference
1	26.27	26.36	0.09	0.0034
2	38.99	38.70	0.29	0.0074
3	26.65	26.85	0.20	0.0075
4	25.07	25.01	0.06	0.0025
5	19.92	19.98	0.06	0.0033

**Table 2.** Comparison of building height estimates between image-based method and story-based method.

Table 3. Comparison of building height estimates with the French IGN Batimap reference.

Bldg Id	Method 1	Method 2	Absolute Difference	<b>Relative Difference</b>
1	13.40	13.98	0.58	0.043
2	15.32	15.89	0.57	0.037
3	15.20	15.16	0.33	0.002
4	15.60	15.71	0.11	0.007
5	14.29	14.62	0.33	0.023
6	5.79	6.06	0.27	0.047
7	15.71	15.42	0.29	0.018
8	14.99	15.39	0.40	0.027
9	7.60	7.06	0.54	0.071
10	14.66	15.28	0.62	0.042

#### 5.2. Memory Use

#### 5.2.1. Road Layer

With regard to the memory storage of maps, enhanced maps usually require more memory than conventional cartographic systems. This is because a larger amount of data descriptors is needed. An example of this can be seen in Figure 7(a). This example has been used to perform a numerical comparison between a polyline-based map and our EEmap. To do so, it is assumed that polylines employ four descriptors (x, y, z and lane width) to describe the stretches between nodes and/or shape

points (separated by black dashes in the image of Figure 7(a)), with the exception of the last section that will also have three extra values, x, y, z, corresponding to the end of the polyline. Table 4 shows the results of this comparison. While 264 values are needed to describe this area with the EEmap, the polyline-based map requires only 78 values. However, depending on the shape of the road, the use of our EEmaps can lead to a reduction of the amount of memory use, as shown in Table 5. This table shows the results obtained when carrying out the same analysis made in Table 4, but this time for the image presented in Figure 7(b). In this case, only 36 values are needed to describe the roundabout with the new enhanced maps, while 123 values are needed in order to make a description based on polylines.

**Figure 7.** (a) Situation where the use of our EEmap leads to an increase in memory requirements. Left image: polyline-based map where black dashes indicate nodes or shape points; Right image: EEmap of the same area. (b) Example of a roundabout area where the figure-based EEmap uses a lower number of figures than a polyline-based map. Left image: polyline image with black dashes that separate the lines at the shape points; Right image: EEmap split of the same area that uses less parameters.



**Table 4.** Comparison of the number of parameters needed to describe the image shown in Figure 7(a) with a polyline-based map and our EEmap.

Мар Туре	Elements	Descriptors	Total
		by element	Descriptor
Polyline-based	29 segments	4	
Map	6 final	7	78
	segments		
Figure-based	10 Trapezes	8	
EEmap	18 Triangles	9	264
	2 Arrowhead	11	

Мар Туре	Elements	Descriptors by element	Total Descriptor
Polyline-based	29 segments	4	
Map	1 final	7	123
	segment		
Figure-based	4 Crown	9	36
EEmap	Sectors		

**Table 5.** Comparison of the number of parameters needed to describe the image shown in Figure 7(b) with a polyline-based map and our EEmap.

A detailed comparison of the demanded storage capacity is strongly dependent on the layout of the urban roadways. Nevertheless, since in most cases the description based on an EEmap will cause higher memory occupation, the decision of whether its exploitation is worthy will depend on the accuracy requirements of the intended application.

#### 5.2.2. Elevation Layer

The memory needed to store the elevation layer of an EEmap depends on the density of buildings in the area under consideration. Since the focus of this paper is urban scenarios, let us consider the case of a dense built-up area.

Along one kilometer of street in the city center of Murcia, Spain, we counted 139 relevant facades considering both sides of the road. For this count, relevant facades are those that could block the direct view of a GPS satellite from a receiver installed in a vehicle on this road. Typically, for a building with four facades, only three are relevant since the fourth is hidden behind the other three. Each facade needs eight parameters according to Table 1, which results in 1112 parameters per kilometer in a highly dense built-up scenario.

Considerations about the compression of these data or its optimization are out of the scope of this paper.

#### 6. Conclusions

A new model of enhanced map, called Elevation-Enhanced map (EEmap), was presented. Our EEmap is based on two layers. The first layer, which is the road layer, includes accurate information of the road bounds, thus enabling advanced positioning and map-matching techniques to provide more accuracy and consistency. Secondly, the elevation layer complements the road layer with the description of the elevation environment, which in urban areas (the focus on this paper) consists of mostly buildings. By knowing the location and height of the buildings, an azimuth-elevation map of the GPS satellites visibility can be built for a given vehicle position. Therefore, satellites in direct view (LOS) can be distinguished from those in NLOS, supporting multipath detection and elimination. The concept and the creation process of the EEmap have been presented in the paper. The paper is completed with the analysis of accuracy and memory use for both layers of the enhanced map. Results show how the concept

and methodology for creating EEmaps can provide accurate maps of urban roads and its environment that are also affordable in terms of memory use.

#### Acknowledgments

This work has been supported by the Spanish Ministerio de Economía y Competitividad under the grant TIN2011-27543-C03-02.

#### References

- 1. Le Marchand, O.; Bonnifait, P.; Iba nez-Guzmán, J.; Bétaille, D.; Peyret, F. Characterization of GPS multipath for passenger vehicles across urban environments. *ATTI dell'Istituto Italiano di Navigazione* **2009**, *189*, 77–88.
- 2. Quddus, M.A.; Ochieng, W.Y.; Noland, R.B. Current map-matching algorithms for transport applications: State-of-the-art and future research directions. *Elsevier Trans. Res. Part C* 2007, *15*, 312–328.
- 3. Grush, B. The case against map-matching. Eur. J. Navig. 2008, 6, N3.
- Janausch, T.; Gern, A.; Linder, F.; Maile, M.; Wilson, C.; Wolermann, B.; Pilutti, T.; Ahmed-Zarid, F.; Palmer, M.; Shulman, M.; Waldis, A.; Sadekar, V.; Deering, R.; Grimm, D.; Hamilton, B.; Kellum, C.; Krishnan, H.; Haskitt, P.; Nyczak, G.; Uehara Y.; Goudy, R.; Sanislow, D.; Torres, R. *et al.*, *Enhanced Digital Mapping Project—Final Report*; US Department of Transportation: Washington, DC, USA, 2004.
- 5. Toledo-Moreo, R.; Bétaille, D.; Peyret, F.; Laneurit, J. Fusing GNSS, dead-reckoning and enhanced maps for road vehicle lane-level navigation. *IEEE J. Sel. Top. Signal Process.* **2009**, *3*, 798–809.
- 6. Toledo-Moreo, R.; Zamora-Izquierdo, M.A. IMM-based lane-change prediction in highways with low-cost GPS/INS. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2009**, *10*, 180–185.
- Toledo-Moreo, R.; Bétaille, D.; Peyret, F. Lane-level integrity provision for navigation and map matching with GNSS, dead reckoning, and enhanced maps. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2010, 11, 100–112.
- 8. Cui, Y.; Ge, S.S. Autonomous vehicle positioning with GPS in urban canyon environments. *IEEE Trans. Robot. Autom.* **2003**, *19*, 15–25.
- Fouque, C.; Bonnifait, P.; Bétaille, D. Enhancement of Global Vehicle Localization Using Navigable Road Maps and Dead-Reckoning. In *Proceedings of the IEEE ION Position, Location Navigation Symposium Conference*, Monterey, CA, USA, 5–8 May 2008; pp. 1286–1291.
- Zott, C.; Yuen, S.Y.; Brown, C.L.; Bertels, C.; Papp, Z.; Netten, B. Safespot Local Dynamic Maps: Context-Dependent View Generation of a Platform's State and Environment. In *Proceedings of the 15th Intelligent Transport Systems World Congress*, New York, NY, USA, 16–20 November 2008; Paper nb. 20260.
- 11. Wevers, K.; Dreher, S. Digital Maps for Lane Level Positioning. In *Proceedins of the 15th Intelligent Transport Systems World Congress*, New York, NY, USA, 16–20 November 2008.
- 12. Bétaille, D.; Toledo-Moreo, R. Creating enhanced maps for lane-level vehicle navigation. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* **2010**, *11*, 786–798.

- Wang, C.; Hu, Z.; Uchimura, K. A Precise Road Network Modeling and Map Matching for Vehicle Navigation. In *Proceedings of the 11th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, Beijing, China, 12–14 October 2008; pp. 1084–1089.
- 14. Institute National de L'Information Geographique et Forestier. Available online: http://www.ign.fr/ (accessed on 10 October 2012).
- 15. Marais, J.; Berbineau, M.; Frimat, O.; Franckart, J.P. A New Satellite-Based Fail-Safe Train Control and Command for Low Density Railway Lines. In *Proceedings of the TILT Seminar (Technological Innovations for Land Transportation)*, Lille, France, December 2003.
- Meguro, J.I.; Murata, T.; Takiguchi, J.I.; Amano, Y.; Hashizume, T. GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2009, 10, 22–30.
- Marais, J.; Ambellouis, S.; Flancquart, A.; Lefebvre, S.; Meurie, C.; Ruichek, Y. Accurate localisation based on GNSS and propagation knowledge for safe applications in guided transport. *Transp. Res. Arena* 2012. 48, 796–805.
- Costa, E. Simulation of the effects of different urban environments on GPS performance using digital elevation models and building databases. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2011, *12*, 819–829.
- 19. Marais, J.; Berbineau, M.; Heddebaut, M. Land mobile GNSS availability and multipath evaluation tool. *IEEE Trans. Vehicular Technol.* **2005**, *54*, 1695–1704.
- Groves, P.; Wang, L.; Ziebart, M. Shadow matching: Improved GNSS accuracy in urban canyons. GPS World. Available online: http://www.gpsworld.com/wireless/personal-navigation/shadowmatching-12550 (accessed on 10 September 2012).
- Peyret, F.; Bétaille, D.; Florian, M. Non-Line-of-Sight GNSS Signal Detection Using an on-Board 3D Model of Buildings. In *Proceedings of the IEEE ITST*, Saint-Petersburg, Russia, 24–25 August 2011.
- 22. Pinana-Diaz, C.; Toledo-Moreo, R.; Bétaille, D.; Gomez-Skarmeta, A. GPS Multipath Detection and Exclusion with Elevation- Enhanced Maps. In *Proceedings of the IEEE ITSC*, Washington, DC, USA, 5–7 October 2011.
- 23. López-Pérez, D.; Toledo-Moreo, R. An Approach to Road Enhanced Maps in Urban Areas. In *Proceedings of the 2012 IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops*, Henares, Spain, 3 June 2012.
- 24. Garrett, J.J. Ajax: A New Approach to Web Applications. Available online: AdaptivePath.com (accessed on 25 October 2012).
- Abdallah, F.; Nassreddine, G.; Denoeux, T. A multiple-hypothesis map-matching method suitable for weighted and box-shaped state estimation for localization. *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.* 2012, doi:10.1109/TITS.2011.2160856.

© 2012 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/).

# **GNSS Autonomous Localization**

NLOS Satellite Detection Based on 3-D Maps



By F. Peyret, D. Bétaille, C. Piñana, R. Toledo-Moreo, A. Skarmeta, and M. Ortiz

ne of the main drawbacks of global navigation satellite systems (GNSSs) in urban environments is that signals may arrive at the receiver antenna only in nonline-of-sight (NLOS) conditions, leading to biased pseudorange estimates when they are taken for granted by the receiver and, eventually, wrong positioning. This article presents a study on the benefits of using three-dimensional (3-D) maps of cities to decide whether the GNSS signal coming from each tracked satellite is reliable. Based on this principle, two different 3-D maps and two methodologies are presented and compared. The results show the benefits of this approach.

Digital Object Identifier 10.1109/MRA.2013.2295944 Date of publication: 12 February 2014

#### Introduction

GNSSs have the potential to advance the development of intelligent transport systems (ITSs) and associated services. A major technical issue with respect to safety and liabilitycritical missions is the quality of service (QoS), not only in terms of accuracy, continuity, and availability but also in terms of integrity, which is the level of trust in the positioning solution. Satellite-based augmentation systems (SBASs), like the European Geostationary Navigation Overlay Service, propose a method [1] to compute position-velocitytime (PVT) solutions, together with horizontal and vertical protection levels, customized to the civil aviation needs. This method assumes certain levels and probability laws for the pseudorange errors that are not satisfied in many terrestrial and especially urban environments. In strongly constrained environments, the propagation phenomena surrounding the antenna, more precisely diffraction and multipath, are responsible for severe errors in the raw observables (pseudoranges and—to a lesser extent— Doppler measurements) that are computed by receivers. Dif-

# GNSSs have significant potential in the development of intelligent transport systems (ITSs) and associated services.

fraction is a usual error source in GPS positioning if obstruction exists and occurs whenever the direct signal is obstructed, but a diffracted signal is received and processed. However, the most severe deviations (up to several tens of meters) occur with multipath, especially when the reflected path is only tracked and the

direct one is blocked. These signals, coming from invisible satellites, are called NLOS signals and are relatively frequent in cities. A recent study carried out in the Nantes city center, with 15-m-high buildings and narrow streets (10-m maximum), has shown a rate of NLOS signals, among all the measurements output by the receiver, between 20 and 25% for a standard high-sensitivity GPS receiver [2].

This article describes a new technique for improving the QoS of GNSS positioning in deep urban environments through the detection of the NLOS signals by using digital maps describing the 3-D environment. The scope of this article will be limited to the map-aided NLOS detection principle and methods; the usage of this detection into PVT computation algorithms will be addressed in further articles.

#### **Related Articles**

It goes beyond the scope of this article to detail the various techniques that were designed by the manufacturers of GNSS receivers for multipath mitigation. We will just mention that they generally address either antenna or correlator technologies. For further information, a summary can be found in [3]. Most receivers, even mass-market original equipment manufacturer ones, already have embedded multipath rejection tracking loops. Antennas also benefit from polarity-selective gain patterns, notwithstanding that low-cost patch antennas still remain highly sensitive to any signal, whether it is direct or reflected.

Navigation algorithms as well as GNSS hardware design are important for multipath mitigation. Once pseudoranges have been made available for position and time computation, failure detection is the first integrity test level: the normalized sum of the squared residuals is compared with a  $\chi^2$  threshold with N-4 degrees of freedom (with N being the number of satellites in view) in association to a given probability of false alarm. At a more advanced integrity test level, fault detection and exclusion (FDE) consists in identifying one faulty measurement in the redundant data set. It has to be underlined that a unique default assumption is made and that redundancy is needed. However, none of the outlined techniques works well in cities, where satellite availability is low and where multipath can cause several faulty measurements at the same time. The authors of [4] suggest an alternative approach to the standard FDE that cannot work under a limited number of satellites, consisting in a characterization of the solution error (based on residuals) and the provision of a protection level with all satellites in view. This protection level is generally larger than if exclusion was done, which leads to reduced application availability. However, at least five satellites are required to figure out positioning system residuals.

For a few years, in addition to navigation process improvements, researchers have addressed the use of 3-D models of the environment to analyze reception conditions and mitigate multipath phenomena.

The LocoPROL project [5] has already used an obstacle elevation model from both sides of a railway acquired by video cameras. In [6], a fish-eye infrared camera is used to map satellite positions with respect to the surrounding buildings. More recently, the CAPLOC project [7] addresses this issue for guided transport in urban environments, using a fish-eye camera on the train to build a 3-D model from the successive images in real-time.

Our approach relies on using 3-D models without extra video sensor and image processing techniques, i.e., digital maps that can be used in real time by an on-board equipment. Two different maps with two different ways to use them will be presented and discussed in this article: the first map is built by hand from Google Earth while the second one is much more industrial since it is a commercial product from the French survey institute IGN, accessible through a dedicated geographical information system (GIS).

#### Method 1: Elevation-Enhanced Map Using Google Earth

#### **EEmap Creation**

The fundamental paradigm of the elevation-enhanced map (EEmap) proposal is to include only the most basic information needed to detect whether or not a facade blocks the direct view of a GNSS satellite from the receiver antenna. For that purpose, the description of the buildings follows the format given in Table 1, where subscripts 1 and 2 stand for the two upper corners of the facade under consideration, and *Lat, Lon, w,* and *H* stand for, the latitude, the longitude of the corners, the width, and the height of the building, respectively.

The process of creating an EEmap is essentially manual and it is based on the exploitation of Google Earth images. The first step to create the EEmap is the extraction of the geodetic coordinates of the two upper corners of the facade of the

Table 1. Building model parameters.						
Bldg ID	Lat <sub>1</sub>	Lon <sub>1</sub>	Lat <sub>2</sub>	Lon <sub>2</sub>	W	Н

building under consideration as well as its width. These data are obtained from aerial images of Google Earth. Then, a frontal view of the building is needed to estimate its height. To address the complexity of determining this unknown, a Canny detector algorithm [8] has been programmed. This algorithm processes the frontal view of the facade of the building, which is obtained with the Street Viewer tool of Google Earth, to provide a scale model. The relation between the parameters of both the real object and its model is then used to determine the real height of the building.

Since a complete frontal view of the facade is not always available in Google Earth, a second complementary approach called *story-based method* is foreseen and can be applied when needed. The principle of this latter method is the application of the prior algorithm only to the parts of the buildings which are visible in the Google Earth image, normally the ground floor and the first few stories. Then, a straightforward computation is used to extrapolate results for the entire building, with the common assumption that upper stories have the same height as those at the lower part of the building. More details of this can be found in [9].

#### EEmap-Based Method

With the purpose of classifying signals from satellites according to their visibility, an appropriate NLOS detection algorithm has been developed. The principle is to combine the information stored in the EEmap described before and the data from GPS, particularly the satellite positions, to determine whether nearby buildings are blocking a given satellite signal. It is important to know that an initial estimate of the receiver position, more precisely of the position of the antenna, is required to define the relative geometry between the rover and the surrounding buildings. In the frame of this study, this position is interpolated from the reference trajectory (see the "Test Equipment" section).

Both elevation and azimuth angles are delivered by the receiver for each satellite. Then, the coordinates of the corners of the facade of the building and the estimated height stored in the EEmap are used to compute its elevation and azimuth angles. Finally, the geometrical interval of blockage of the obstacle is obtained. This concept is depicted in Figure 1.

Let *i* and *j* denote the identifiers of a satellite and a building, respectively. If the elevation and azimuth angles of satellite *i* ( $E_{si}$  and  $A_{si}$ , respectively) are inside the region of nonvisibility of building *j*, satellite *i* is determined to be in an NLOS situation.

The elevation  $(E_{si})$  angle for satellite *i* is calculated

$$\cos(E_{\rm si}) = \frac{\sin(\gamma)}{\left[1 + \left(\frac{r_e}{r_{\rm si}}\right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{r_e}{r_{\rm si}}\right) \cdot \cos(\gamma)\right]^{\frac{1}{2}}}$$
(1)

with

$$\cos(\gamma) = \cos(L_e) \cdot \cos(L_{si}) \cdot \cos(l_{si} - l_e) + \sin(L_e) \cdot \sin(L_{si}),$$
(2)



Figure 1. The EEmap concept for an NLOS detection.



Figure 2. The geometry of elevation angle.

where:

- $r_{\rm si}$  = radius of satellite *i*
- $r_e$  = radius of the earth
- $\gamma$  = angle with respect to the earth's center between the subsatellite point and the edge of coverage (see Figure 2)
- $L_{\rm si}$  = latitude of satellite *i*
- $l_{\rm si} =$  longitude of satellite *i*
- $L_e$  = latitude of the reference position
- $l_e =$  longitude of the reference position.

To find the azimuth angle for each satellite, an intermediate angle  $\alpha$  must be used. The intermediate angle allows the correct quadrant to be determined since the azimuthal direction can lie anywhere between 0° (true north) and clockwise through 360° (back to true north again). The intermediate angle is found from

$$\alpha = \arctan\left[\frac{\tan\left|(l_{\rm si} - l_e)\right|}{\sin\left(L_e\right)}\right].$$
(3)

Then, the azimuth angle for each satellite  $A_{si}$  can be obtained as follows:

- Case 1: Current position in the northern hemisphere with
  - a) satellite to the southeast (SE) of the earth station:  $A_{\rm si} = 180^{\circ} \alpha$
  - b) satellite to the southwest (SW) of the earth station:  $A_{\rm si} = 180^{\circ} + \alpha$
- Case 2: Current position in the southern hemisphere with
  - a) satellite to the northeast (NE) of the earth station:  $A_{\rm si} = \alpha$
  - b) satellite to the northwest (NW) of the earth station:  $A_{\rm si} = 360^{\circ} - \alpha$ .

On the other hand, elevation  $(E_{bnj})$  and azimuth  $(A_{bj})$  angles of a building are calculated from the following vector equations:

$$E_{\rm bnj} = \arccos \frac{\overline{P_r C_{\rm nj}} \cdot \overline{P_r C_{\rm nsupj}}}{|\overline{P_r C_{\rm nj}}| \cdot |\overline{P_r C_{\rm nsupj}}|}$$
(4)

n = 1, 2

$$A_{bj} = \arccos \frac{\overline{P_r C_{1j}} \cdot \overline{P_r C_{2j}}}{|\overline{P_r C_{1j}}| \cdot |\overline{P_r C_{2j}}|},$$
(5)

where  $\overline{P_r C_{nj}}$  is the vector from the reference position to the *n*th bottom corner of building *j*,  $\overline{P_r C_{nsupj}}$  is the vector from the reference position to the *n*th upper corner of building *j*, and  $\overline{P_r C_{1j}}$  and  $\overline{P_r C_{2j}}$  represent the vectors from the reference position to both the bottom corners of the building *j* nearest to the road.



Figure 3. The image produced by the virtual camera and the two pixels of interest.

The EEmap-based NLOS detection method is quite light in terms of computational load, having no issues to cope with GPS receivers working at 1 Hz.

#### Method 2: BATI 3-D Model Inside an Embedded GIS

The second method described here is the one that has been developed in the frame of the French CityVIP project, and already introduced in [10]. It is based on the use of an embedded, dedicated GIS, developed by the French SME BeNomad, and contains accurate 3-D digital data of the environment, acquired and preprocessed by the IGN.

#### 3-D Data

The 3-D model has been built by the IGN from aerial pictures at high resolution (10 cm), completed by terrestrial pictures acquired by mobile mapping. This product currently exists for only some parts of French cities but will be extended to the major French cities under the name BATI 3-D [11]. The 3-D model used for the experiments of this article was a first version of BATI 3-D.

#### GIS

The GIS from BeNomad uses a new binary geographical data format compatible with the low power and memory capacities of embedded systems. Its architecture is designed for development of applications, like road navigation or fleet management, thanks to its software development kit (SDK). In particular, the SDK makes a graphic depiction of what a virtual camera would see from perfectly controlled intrinsic and extrinsic parameters (see Figure 3). It also offers the basic measurement functions of distance and depth from the produced image.

#### BATI 3-D-Based Method

The first step—as already mentioned in the "EEmap-Based Method" section—consists in determining the geographical position of the user antenna: in the frame of this article, it is interpolated from the reference trajectory (see the "Test Equipment" section).

Next, the satellite azimuth and elevation are extracted from the NMEA GSV output of the receiver.

Then, we determine the critical elevation angle imposed by the environment, with respect to the azimuth angle of the satellite thanks to the embedded 3-D model.

To achieve this, the extrinsic parameters of the virtual camera are set automatically in the following way:

- the position of the optical center is set at the position of the user antenna
- the orientation is set in a way that the central pixel of the virtual image points at the direction of the considered satellite azimuth
- the roll and pitch angles are set to zero, meaning that the *X*–*Y* plane of Figure 3 is horizontal
- the focal distance is set to have the top of the frontal buildings inside the graphic depiction.

Once the virtual camera is correctly configured, the algorithm determines the coordinates  $(X_{P_c}, Y_{P_c})$  of the critical pixel  $P_c$  situated on the border between sky and front buildings. Knowing the coordinates of this critical pixel  $P_c$  and those  $(X_{P_m}, Y_{P_m})$  of the pixel in the middle of the image  $P_m$ , and using the distance and depth measurement functions denoted getdist and getdepth, we determine the critical elevation  $\beta_c$ :

$$\beta_c = \operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{getdist}(P_c, P_m)}{\operatorname{getdepth}(P_m)}\right).$$
(6)

Finally, we compare the critical elevation angle to the actual elevation angle of the satellite to decide if it has to be considered NLOS or not.

To conclude on this method, it can be summarized that:

- it is based upon the availability of 3-D accurate models
- it necessitates a specific embedded GIS, capable of handling real-time 3-D data
- from the data accessible through the GIS SDK and the GNSS data output by the receiver, it is then possible to detect whether the satellites are masked
- although the processing load is significant due to the 3-D data processing, the first version of the software was able to run in real-time at 1 Hz
- although the reliability of this detection depends on the accuracy of the model, it mainly depends on the accuracy of the estimated position of the user antenna.

This last point, which is a critical point with respect to the efficiency of both methods, will be discussed in the "Conclusions and Perspectives" section.

#### Validation of Method 2 in Terms of an NLOS Detection

In the frame of the CityVIP project, we carried out a first validation in terms of NLOS detection. To do so, one of the five loops performed during the experiment presented in the "Presentation and Experimental Data Set" section has been introduced in a commercial ray-tracing simulator, as well as the IGN BATI 3-D model.

The comparison made consisted in measuring the agreement of the results of our method with respect to the ray-tracing simulator results, both of them using the same 3-D model, meaning that we only validated the computation of the critical angle with a virtual image versus ray tracing. The computation was done from the reference trajectory.

NLOS missed and false-alarm percentages were, 1.6 and 1.7%, respectively, meaning a global disagreement of 3.3%, which let us conclude that the virtual image processing is almost as reliable as the direct geometric ray tracing.

Table 2 gives detailed information and results related to this first validation. In the "Presentation and Experimental Data Set" section, only a representative stretch of this loop will be analyzed, however, we have duly checked that the preceding statistics remain valid on the selected stretch.

# Table 2. Method 2 validation test features.Loop Duration15 ft and 15 inNumber of corresponding epochs at<br/>4 Hz (N<sub>ep</sub>)3,661Number of epochs with four satel-<br/>lites or more actually tracked by the<br/>receiver (necessary for least squares<br/>computation of PVT)3,639 (99.4%<br/>of N<sub>ep</sub>)Total number of received satellites-31,113

i.e., observations– $(N_{obs})$ 

# NLOS detections by virtual image processing or ray tracing, with the same 3-D model.

Method	Virtual Image	Ray Tracing
Number of detected NLOS satellites	7,877 (25.3% of N <sub>obs</sub> )	7,918 (25.4% of N <sub>obs</sub> )
Number of epochs available with four satellites or more after NLOS detection	3,450 (94.3% of N <sub>ep</sub> )	3,442 (94% of N <sub>ep</sub> )

#### **Confusion matrix for Method 2 validation.**

Classification LOS/NLOS	LOS by ray tracing	NLOS by ray tracing
LOS by virtual image	22,687 (72.9%)	549 (1.7%)
NLOS by virtual image	508 (1.6%)	7,369 (23.7%)

#### **Presentation of the Experimental Data Set**

#### Test Site

For validation purposes and comparison of the two methods, a full scale experiment has been carried out in the Nantes city center, an environment with 15-m-high buildings and narrow streets (15-m maximum). The whole test campaign consisted in repeating the same loop five times in the area, under two different constellations. Each loop is approximately 15 min and 10 km long.

A standard automotive U-blox LEA-4T with a patch antenna was configured. The wheel speed sensors were available on the controller area network bus to compute the



Figure 4. The VERT vehicle of IFSTTAR-Nantes.

#### Table 3. Validation and comparison tests features.

Stretch Duration	25 in (Morning Test)	30 in (Afternoon Test)
Number of epochs corresponding to 4 Hz	101	121
Number of epochs with four satellites or more actually tracked by the receiver	101 (100%) between 7 and 10 svs	121 (100%) between 8 and 10 svs
Total number of pseudorange	800	1,080

# NLOS detections using BATI 3-D inside a GIS versus EEmap.

Morning Test	BATI 3-D Inside a GIS	EEmap
Number of detected NLOS satellites	258 (32.3%)	311 (38.9%)
Number of epochs with four satellites or more actually available after NLOS elimination	93 (92.0%)	83 (82.0%)
Afternoon Test		
Number of detected NLOS satellites	408 (37.8%)	544 (50.4%)
Number of epochs with four satellites or more actually available after NLOS elimination	115 (95.0%)	89 (73.6%)

#### **Confusion matrices.**

Morning Test	LOS with EEmap	NLOS with EEmap
LOS with BATI 3-D inside a GIS	460 (57.5%)	82 (10.3%)
NLOS with BATI 3-D inside a GIS	29 (3.6%)	229 (28.6%)
Afternoon Test		
LOS with BATI 3-D inside a GIS	483 (44.7%)	189 (17.5%)
NLOS with BATI 3-D inside a GIS	53 (4.9%)	355 (32.9%)
Global disagreement.		
Global disagreement	13.9%	22.4%

of the EEmap use	(Morning test)	(Afternoon test
respect to the BATI 3-D		
inside a GIS in percent-		
age of observations		
0		

vehicle odometry. The yaw rate was also measured by a single axis fiber optic gyroscope (KVH e-core series).

#### Test Equipment

The VERT vehicle (see Figure 4) was used to acquire the reference trajectory with the measurement of reference trajectory (MRT) equipment within the car. The MRT is based on the hybridization of a navigation grade IMU (LandINS, from IXSEA), phase differential dual frequency GPS/GLONASS receivers (Novatel DLV3), and the odometer of the vehicle, working at 100 Hz and time-stamped with GPS time. Former tests with the MRT equipment proved that the horizontal and vertical errors do not exceed 50 cm and 25 cm, respectively, during a 5-min outage of the GPS signal [12].

# Application of the Two Methods and Comparison of the Results in Terms of an NLOS Detection

Only part of the preceding loop has been selected for the comparison of the methods from the point of view of the 3-D models. This stretch is limited to north of Fouré Street, 250-m long, where the building geometry was captured by hand, using Google Maps, as described in the "Method 1: Elevation-Enhanced Maps Using Google Earth" section. Two different satellite geometries were considered, as one test was conducted in the morning and another was conducted in the afternoon.

#### Results

#### Comments

We have considered a 250-m-long stretch, corresponding to approximately 1,000 observations, repeated under two different constellations, which makes it possible to draw statistically significant conclusions. At the first level, we can observe that the EEmap NLOS detection seems consistent with that made using a much more sophisticated 3-D model.

However, the method using EEmap appears to be more careful or, in other words, more pessimistic than the method based upon BATI 3-D. The consequence is that it reduces the availability of a least squares solution since this solution needs at least four satellites. This disagreement between the two methods, and a striking disagreement between the two test periods, can be explained by the differences between the maps. The EEmap, built by either using pictures of Google Street View or counting the stories of buildings and making assumptions on their height, should be less exact that the IGN model. The difference in the disagreements between the two tests can be explained by the sensitivity of the computation method to the satellite configuration, reinforcing the suggestion that the exactness of the map is the key factor.

#### **Conclusions and Perspectives**

In this article we presented a paradigm based on the exploitation of 3-D maps of cities for the detection of NLOS signals that dramatically affect the quality of the GNSS positioning. Two different 3-D models of the buildings and two corresponding processes to extrapolate data for NLOS detection purposes have been presented. The first approach, EEmap, is based on a light-wise model with the minimum number of descriptors necessary to store and to compute the NLOS algorithm efficiently. The second method uses the IGN BATI 3-D data, a more precise and complete set, which are handled by means of an embedded GIS. The main advantages of EEmaps when compared with the BATI 3-D approach are given below.

- The capability of creating city EEmaps with building elevation information from the information stored in Google Earth, is freely available worldwide.
- The lightness concept of EEmaps makes it easy to download and store on-board vehicles.
- There is a fairly easy computation of the NLOS algorithm (compared with an image processing based approach), thus minimizing the computational demand on-board the vehicle.

The main drawbacks of the EEmaps are given below.

- The quality of Google Earth images used for creating the EEmap is not certified. The BATI 3-D data quality is warranted.
- The simplicity of the EEmap building model may lead to errors in the representation of the building shape. The BATI 3-D model is more complete.
- The tedious work required to create the EEmap if the area to be covered is extended: the process is only automated to a limited extent.

Results obtained in real scenarios with a significant amount of data showed how the use of the fairly simple EEmaps may be of high interest for an NLOS detection and, consequently, preventing wrong vehicle positioning estimates caused by the NLOS effects.

The perspective of this article will be first to complete the comparison in other environments, to confirm the trend observed in this research. Then, an error sensitivity analysis should be done to analyze the sensitivity of the NLOS detection performance to the exactness of the 3-D model used for both methods.

Finally, in this article, we focused on the problems of the building models and the NLOS algorithm. For that, we run the NLOS algorithms from an ideal location, the receiver antenna, calculated by a high-accuracy reference system that we use to provide the ground truth. However, the NLOS detection problem cannot be solved independently of the issue of accuracy of the receiver position we can expect in real time, since it is a closed-loop process. Therefore, only a part of the problem has been assessed in the present article.

Once the problem of 3-D modeling and the NLOS detection algorithm is analyzed into details, the next step is to study the best way to take this information into account in the PVT computation process, knowing that the NLOS detection should be made from an estimated position and not from the true one.

#### References

[1] MOPS for GPS/WAAS Airborne Equipment, Standard RTCA DO-229D, 13-12-2006.

[2] F. Peyret, D. Bétaille, and F. Mougel, "Non-line-of-sight GNSS signal detection using an onboard 3D model of buildings," in *Proc. Int. Conf. Telecommunications*, St. Petersburg, FL, Aug. 2011, pp. 280–286. [3] M. S. Braasch, "Multipath effects," in *GPS: Theory and Applications*, vol. 1,
B. W. Parkinson and J. J. Spilker, Eds (Progress in Astronautics and Aeronautics Series). AIAA: Washington, D.C., 1996, ch. 14.

[4] M. Azaola-Saenz and J. Cosmen-Schortmann, "Autonomous integrity: An error isotropy-based approach for multiple fault conditions," *Inside GNSS*, pp. 28–36, Jan.–Feb. 2009.

[5] J. Marais, M. Berbineau, O. Frimat, and J.-P. Franckart, "A new satellite-based fail-safe train control and command for low density railway lines," in *Proc. Technological Innovations for Land Transportation*, Lille, France, Dec. 2003.

[6] J.-I. Meguro, T. Murata, J.-I. Takiguchi, Y. Amano, and T. Hashizume, "GPS multipath mitigation for urban area using omnidirectional infrared camera," *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 10, no. 1, pp. 22–30, Mar. 2009.

[7] J. Marais, S. Ambellouis, A. Flancquart, S. Lefebvre, C. Meurie, and Y. Ruichek, "Accurate localisation based on GNSS and propagation knowledge for safe applications in guided transport," *Transp. Res. Arena*, vol. 48, pp. 796–805, 2012.

[8] J. Canny, "A computational approach to edge detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 8, no. 6, pp. 679–698, Nov. 1986.

[9] C. Piñana-Diaz, R. Toledo-Moreo, D. Bétaille, and A. F. Gómez-Skarmeta, "GPS multipath detection and exclusion with elevation-enhanced map," in *Proc. 14th Int. IEEE Conf. Intelligent Transportation Systems*, Washington, D.C., Oct. 2011, pp. 19–24.

[10] CityVIP project. [Online]. Available: http://projet\_cityvip.byethost33.com/
[11] Bati-3D. [Online]. Available: http://www.ign.fr/institut/documentArticle. do?idDoc=5591864&indexRoot=8&indexChild=4

[12] D. Bétaille, F. Peyret, O. Nouvel, W. Vigneau, G. Duchateau, and H. Secretan, "How to produce a reference trajectory for studying GNSS errors in urban environments," in *Proc. ENC GNSS*, Toulouse, France, 2008.

*F. Peyret,* Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux, France. E-mail: François.Peyret@ifsttar.fr.

*D. Bétaille*, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux, France. E-mail: david.betaille@ifsttar.fr.

*C. Piñana*, Cartagena University, Spain. E-mail: carolina. pinana@upct.es.

*R. Toledo-Moreo*, Universidad Politécnica de Cartagena, Spain. E-mail: rafael.toledo@upct.es.

*A. Skarmeta*, Departamento de Ingenieria de la Informacion y las Comunicaciones, University of Murcia, Spain. E-mail: skarmeta@dif.um.es.

*M. Ortiz*, Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'aménagement et des Réseaux, France. E-mail: miguel.ortiz@ifsttar.fr.

ER,

# Elevation-Enhanced-Map-based GPS Non-Line-Of-Sight Detection in Urban Environments

Carolina Piñana-Diaz, Rafael Toledo-Moreo, *IEEE Member* Antonio F. Gómez-Skarmeta, *IEEE Member* David Bétaille, *IEEE Member* François Peyret

Abstract-Global Positioning Systems (GPS) may suffer severe errors in urban environments due to the lack of good coverage and the multipath propagation of the satellite signals caused mostly by buildings. Receivers not always are capable of removing multipath signals, especially when satellites are in non-line-of-sight (NLOS) and there are not the corresponding line-of-sight (LOS) signals to compare with and discriminate the faulty one. This leads to wrong pseudorange measurements and errors in the solution of the position computation. This paper presents a solution to the problem of detecting which GPS signals arrive at the receiver in NLOS, thus enabling multipathfree positioning estimates. To it so, elevation-enhanced maps (EEmaps) that model buildings' positions and heights are exploited. The description of the EEmaps, the NLOS detection algorithm and the results obtained in a test campaign are presented in the paper.

#### I. INTRODUCTION

Global Position System (GPS) receivers are the most widely used sensors for global positioning. They perform sufficiently well for many applications and in many scenarios, however problems in built-up areas prevent further exploitation of GPS possibilities in urban environments. Main flaws of GPS positioning in cities are:

- The lack of satellite coverage due to the blockage of the signals caused by buildings.
- Poor satellite geometry in the visible satellites, leading to high values of dilution of precision (DOP), and consequently less accuracy in the positioning estimate.
- Multipath effects due to reflection of the satellite signals in the buildings that surround the GPS antenna.

First problem, lack of coverage, implies that GPS solutions will not always be available, and GPS-based applications may have their service interrupted. Second problem may also cause gaps in the availability of these applications, since normally applications should be configured in such a way that

This work has been sponsored by the European Seventh Framework Program, through the ITSSv6 Project (contract 270519); the Ministry of Science and Innovation, through the Walkie-Talkie Project (TIN2011-27543-C03); and the Seneca Foundation, by means of the GERM program (04552/GERM/06).

Carolina Piñana-Diaz, Rafael Toledo-Moreo and Antonio F. Gómez-Skarmeta are with Department of Information and Communication Engineering, Faculty of Computer Science, University of Murcia, 30100 Murcia, Spain. Rafael Toledo-Moreo is also with the Department of Electronics and Computer Technology, Technical University of Cartagena, Spain. David Bétaille and François Peyret are with IFSTTAR (French Institute of Sciences and Technology for Transport, Development and Networks) Nantes, France. carolina.pinana@um.es, rafael.toledo@upct.es, skarmeta@um.es, david.betaille@ifsttar.fr, francois.peyret@ifsttar.fr when the positioning error exceeds a certain threshold, they should not run. However, it is the final problem, the one caused by multipath effects, the one that may have worse consequences. When the signal from a GPS satellite arrives at the receiver in both line-of-sight (LOS) and non-line-of-sight (NLOS) ways, normally receivers can distinguish between the good and the wrong signals and the position computation is not affected by the NLOS measurement. However, when signals arrive in only NLOS mode, receivers not always understand that the signal is not obtained in direct view and therefore employing faulty pseudorange measurements in the calculation of the positioning solution what leads to remarkable errors. Unfortunately, this situation is often in built-up areas. Fig.1 shows a typical urban scenario where this may happen. Even though some tall buildings block the line-of-sight between the users' antenna and the satellite, the reflected signal does arrive at the receiver, with a longer time of flight (ToF) and consequently a longer estimate of the distance between antenna and satellite. This error may vary from a few meters to tens of meters. In the literature of the field, there are a number of works that aim at solving the multipath problem. In [1] the authors present an algorithm for fault detection and exclusion (FDE) that may support the removal of multipath errors. [2] employs a camera installed on the roof a the vehicle to create a visibility map of the sky and which satellites should be in view by means of image processing algorithms. Our proposal is to eliminate these faulty measurements using the information stored in a digital map, called EEmap for elevation-enhanced-map. The concept of Enhanced Digital Maps (EDmaps), also known as Enhanced Maps (Emaps), appeared with the purpose of creating better maps that could satisfy the needs of some vehicular applications with requirements of terms of map accuracy and completeness higher that those offered by standard maps [3]. Emaps are more complete than standard maps because their model assumptions do not simplify the road shape as much as standard maps do. Due to its benefits, the concept of Emaps has been exploited in different works of the literature in order to achieve lane-level positioning [4], lane-change detection [5] and position integrity [6]. In this occasion, our Emap does not focus on the accuracy of road description, but adds a new layer that contains the positions and heights of the buildings within the area of interest. For that reason we call them elevation-enhanced maps. EEmaps simplify the building geometry to its minimum number of parameters necessary to calculate whether or not the signals coming from the GPS satellites will be in line-of-sight with the



Fig. 1. Scenario with NLOS multipath.

antenna installed onboard the vehicle. Consequently, EEmaps are light (in terms of memory use) and easy to download on demand by means of standard mobile communications. The process of EEmap making is also relatively easy and does not need extensive campaigns for data collection. EEmaps can be made at office as long as the area under consideration is mapped by the Street Viewer service of Google Maps. The idea of using EEmaps as a means to avoid multipath effects was presented by the authors in [7]. That work was meant to be a proof-of-concept and showed the possibilities that EEmap-based multipath detection may have. From that work, the process of EEmap creation has been updated and the NLOS detection algorithm improved. Additionally, the evaluation of the goodness of the NLOS detection algorithm is more sound now. In order to make a sound validation of the NLOS algorithm, multipath-free GPS errors have been characterized employing data collected using the same GPS sensor that will be used in the tests in a wide open area with no coverage or multipath problems. Once these errors are modelled, it is possible to perform an statistical test that determines whether a pseudorange measurement is in fact good (free of multipath errors) or not (pseudorange is biased due to the reflection of the signal). This analysis is also shown in the paper. The rest of the paper is organized as follows: Section II describes briefly the EEmap concept and the process of creating an EEmap. Then, Section III presents the basics of the NLOS detection algorithm. The characterization of the GPS errors necessary for establishing a valid reference for the NLOS algorithm is explained in Section IV. Experiments are shown in Section V, and Conclusions drawn in Section VI.

#### II. EEMAP CONCEPT

The first step in the proposed process of multipath detection implies the creation of a visibility map. In [7] a new concept of this kind of maps, called EEmap for Elevation-Enhanced Map, is introduced. Since buildings are the elements that contribute more remarkably to multipath effects, the purpose is to determine whether these elements hinder signal from a given satellite or not. For that reason, some information of them is stored and used to determine the visibility of a satellite signal. Thus, NLOS (Non-lineof-sight) are discarded for position calculation. The first step to create the EEmap is the extraction of the geodesic coordinates of the two position ends of the facade of the building under consideration as well as its width. These data are obtained from aerial images of Google Earth. Then, an estimation of the height of each building is required to deal with the visibility problem. To address the complexity of determining this unknown, a Canny detector algorithm [8] is developed. This algorithm uses a frontal view of the facade of the building which is obtained with the Street Viewer tool of Google Earth to provide a small scale model. The relation between the parameters of both the real object and its model is then used to determine the real height of the building. Given that a complete frontal view of the facade is not always available in Google Earth, a second approach called storybased method is also applied. The principle of this method is the application of the prior algorithm only to the parts of the buildings which are represented in the Google Earth image like the ground floor and the first few stories. Then, a simple equation is used to extrapolate results to the entire building, with the common assumption that upper stories have same height as those at the lower part of building. More details of this can be found in [7]. Experimental results show that our EEmaps are a powerful tool to simply and efficiently represent buildings located near a GPS receiver and then, discard those satellites whose signals are affected by multipath effects. In this way, only data from satellites which are in LOS (line-of-sight) are used for the next stage: the NLOS detection problem.

#### **III. NLOS DETECTION ALGORITHM**

This section details the proposed approach to classify signals from satellites according to its visibility. With this purpose, the called NLOS detection algorithm has been implemented. The goal of this method is the detection of those satellites whose signals are affected by multipath propagation hence they are not received as a direct ray by the GPS receiver. The inputs of this process are the information stored in the EEmap described before and data from satellites (see Fig. 2). Given that satellite position coordinates and pseudorange measurements are provided by the receiver, the principle is to combine all the information to know if nearby buildings are blocking a given satellite signal or not. It is important to know that an initial estimate of the receiver position is required to compare both geometric and measured pseudoranges and carry out the study of the visibility. First of all, both elevation and azimuth angles from the receiver are calculated for each satellite. Then, the coordinates of the corners of the facade of the building and the estimated height obtained with the Canny detector method are used to compute its elevation and azimuth angle. Then, the interval of blockage of the obstacle is obtained.

Let us denote i and j the identifiers of a satellite and a building respectively. If elevation and azimuth angles of



Fig. 2. Flowchart scheme of the positioning process that includes NLOS detection.

satellite *i* are inside the region of non-visibility of building *j*, satellite *i* is determined to be in a NLOS situation and, thus it is flagged as not valid and it is discarded. On the contrary, if this satellite is in LOS, its information is used to calculate the position of the receiver. A scheme of this process is depicted in Fig. 2

The output of this stage is the list of satellites which are in direct view. Then, the positioning algorithm computes the position of the receiver multipath-free. Applying this concept for each building located around the initial estimate of the location of the receiver it is possible to determine visibility of detected satellites along an urban dense area with tall buildings.

#### IV. GPS PSEUDORANGE ERROR CHARACTERIZATION

In order to determine the goodness of the NLOS detection method, a sound reference for determining whether or not a satellite is in NLOS must be employed. With that purpose we characterized the error of the GPS receiver employed in the test campaign. This is done in a wide open area, free of multipath effects. Dataset is obtained with the vehicle in movement, and in the same conditions as the final tests will be done. Once the error features of valid pseudorange measurements are obtained during the let us called it error characterization phase, the actual NLOS reference will be given by the comparison of the pseudorange measurements obtained during the algorithm verification phase with a threshold value obtained from these error features. In other words, if a pseudorange value falls within the  $3\sigma$  area around the true distance for a given  $\sigma$  obtained in the error characterization phase, this pseudorange value will be assumed to be good. In the case of being beyond that threshold, then it will classified as a faulty pseudorange that should be detected by the NLOS algorithm.

#### A. Test Equipment and Environment

To prove the validity of the concept introduced in this paper, experimental tests have been made in an urban area located in Nantes, France. A low cost Ublox GPS receiver whose antenna was placed behind the windscreen on the dashboard of the car, was used to collect data from satellites and a high-grade IXSEA inertial navigation system (INS) was employed as a reference for the true trajectory. This



Fig. 3. Histogram of the pseudorange error along the multipath-free test.

sensor-set is used for both the error characterization and the NLOS algorithm verification phases.

#### B. Results and Analysis

In order to carry out a modelling of the GPS error, data were collected in an open area near the city of Nantes, France, where there were not obstacles or elements which hide the received signals from the satellites. Under these circumstances, geometric pseudoranges and satellite positions have been used to compute the mean, m, and the standard deviation,  $\sigma$ , of the pseudorange error values, noted from now on as r. Fig. ?? represents the histogram of the pseudorange error obtained in this open scenario. Results correspond to a number of 2650 samples. As it is shown, the characteristic parameters of the error distribution match well with the normalized Gaussian model often assumed for multipath-free situations, with a mean value of  $\mu = 0.3552$ m and a standard deviation  $\sigma = 1.5379$  m. The  $\sigma$  value will be used later as a threshold to decide whether or not a pseudorange should be valid. Fig. Fig.4 shows the error in the measured pseudoranges as a function of the time. A pseudorange error is estimated as the difference between the distance given by the high-grade INS reference to the corresponding satellite position and the value of pseudorange measurement given by the receiver. As it can been seen, error values vary around zero and no clear bias can be appreciated.

#### V. NLOS ALGORITHM APPLICATION

#### A. Tests and analysis

With the aim of proving the validity of the concepts presented in this paper, the NLOS detection algorithm has been applied in an urban dense area of Nantes with limited visibility. At the same time, the error modelling described before has been used to validate the detection of NLOS satellites.

Given that the pseudorange error distribution can be approximated as a Gaussian distribution, let us define a threshold beyond which a given satellite will be said to be under multipath effects. Since nearly all (99.73%) of the



Fig. 4. Pseudorange error values during a stretch of the route used for the multipath-free error characterization.

values lie within 3 standard deviations of the mean, let us fix the value of this threshold  $3\sigma$ .

Then, theoretically, those satellites whose pseudorange error exceeds this amount are said to be affected by multipath.

Fig.6 represents the absolute value of the pseudorange error. As said before, satellites whose error exceeds 3  $\sigma$  are supposed to be in NLOS. As it can be seen,at the beginning of the test, all satellites are in LOS, with an absolute value of the pseudorange error less than  $3\sigma$ . However, at instant t =1.25 s, satellite with PRN = 7 (cyan) appears to be in NLOS with a pseudorange error much higher that the defined above threshold. At the same instant of time, satellite with PRN = 28 (magenta), which previously was in LOS, disappears and its signal is not captured by the GPS anymore. The rest of satellites detected by the receiver are all in LOS during this test.

Fig.7 depicts the results of the NLOS detection algorithm under the same conditions and instants of time. As it can be observed, at the beginning of the test all detected satellites were in a LOS situation. However, from instant t = 1.25 s satellite with PRN = 28 (magenta) stops being detected by the the receiver and satellite with PRN = 7 (cyan) is detected by the algorithm as a NLOS satellite. The algorithm advices that, although the GPS receiver takes it into account, this satellite signal is being obstructed by a building and, therefore, it should not be taken into account for the positioning problem. In this case, this satellite will be discarded and it will not be used for position computation.

#### VI. EXPERIMENTS

This Section presents the results obtained during the verification phase of the NLOS algorithm. For that, it must be taken into account that:

- The reference of satellite visibility is obtained by comparing the real distance and the measured pseudorange.
- If the difference between these two values is larger than  $3\sigma$ , the satellite is classified as in non-line-of-sight.
- In the difference is lower than  $3\sigma$  then the satellite is considered to be in line-of-sight.



Fig. 5. Test scenario in Nantes, France, used for NLOS detection algorithm validation.



Fig. 6. Absolute value of the pseudorange error as a function of time.

#### A. Description of the test environment

The environment is shown in the image of Fig. 5. In this area there are some nearby buildings with only a few stories, and even though the visibility was expected to be in general good, the position provided directly by the receiver was faulty, since a NLOS satellite was employed for the position calculation as it will be shown later in this Section. As it was aforementioned, the vehicle and the sensor-set are the same used for error characterization.

#### B. Results

With the aim of proving the validity of the concepts presented in this paper, the NLOS detection algorithm has been applied in an urban area of Nantes with limited visibility. At the same time, the error modelling described before has been used to validate the detection of NLOS satellites. Given that the pseudorange error distribution can be approximated as a Gaussian distribution, let us define a threshold beyond which a given satellite will be said to be under multipath effects. Since nearly all (99.73values lie within 3 standard deviations of the mean, let us fix the value of this threshold to 3s.



Fig. 7. Results of the NLOS detection algorithm over time.

Then, theoretically, those satellites whose pseudorange error exceeds this amount are said to be affected by multipath. Fig. 6 depicts the absolute value of the pseudorange error. As it can be seen, at the beginning of the test, all satellites are in LOS, with an absolute value of the pseudorange error less than 3s. However, at instant t = 1:25 s, satellite with PRN = 7 (cyan) appears to be in NLOS with a pseudorange error much higher that the defined above threshold. At the same instant of time, satellite with PRN = 28 (magenta), which previously was in LOS, disappears and its signal is not captured by the GPS anymore. The rest of satellites detected by the receiver are all in LOS during this test. Fig. 7 depicts the results of the NLOS detection algorithm under the same conditions and instants of time. As it can be observed, at the beginning of the test all detected satellites were in a LOS situation. However, from instant t = 1:25 s satellite with PRN = 28 (magenta) stops being detected by the the receiver and satellite with PRN = 7 (cyan) is detected by the algorithm as a NLOS satellite. The algorithm advices that, although the GPS receiver takes the satellite with PRN = 7into account for the position calculation, this satellite signal is being obstructed by a building and, therefore, it should not be taken into account for the positioning problem. In this case, this satellite is discarded and not being used for position computation. In this case, the pseudorange error is significant, probably due to the fact that the buildings across the street are quite apart. In a more narrow situation, it is expected that pseudorange errors of NLOS satellites may be closer to the 3s threshold. For all the positions tested along the street under consideration (shown in Fig. 5), the NLOS detection algorithm obtained a 100or false alarms. These results were obtained with approximately 300 samples.

#### VII. CONCLUSIONS AND FUTURE WORK

The paper has presented a solution to the problem of multipath pseudoranges arriving at GPS receivers in urban environments. Main contributions of this paper are:

- An EEmap model that includes buildings' positions and heights was created and applied to the problem under consideration.
- A NLOS detection algorithm that uses as inputs the current vehicle position estimate, the satellite positions and the building information stored in the EEmap was developed.
- Multipath-free pseudorange measurements were characterized in order to establish a sound reference for performance assessment of the NLOS algorithm.

Results in test campaign with a significant number of samples show excellent results, with null percentages of missed-detections or false alarms. Future work on this topic will focus on the integration of the NLOS detection method into the loop of a positioning algorithm and the execution of more extensive campaigns.

#### ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank Juliette Marais for her valuable comments.

#### REFERENCES

- O. Le Marchand, P. Bonnifait, J. Ibañez-Guzmán, D. Bétaille, F. Peyret "Characterization of GPS multipath for passenger vehicles across urban environments". ATTI dell'Istituto Italiano di Navigazione, 189 pp.77 - 88. 2009
- [2] J. Marais, M. Berbineau, and M. Heddebaut, "Land Mobile GNSS Availability and Multipath Evaluation Tool", IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 54, NO. 5, September 2005
- [3] J. Du et al., "Enhanced Digital Mapping Project Final Report". US DoT, 2004.
- [4] R. Toledo D. Bétaille, F. Peyret, J. Laneurit. "Fusing GNSS, Deadreckoning and Enhanced Maps for Road Vehicle Lane-Level Navigation". IEEE Journal on Selected Topics on Signal Processing, Vol 3 N5. pp: 798-809. Oct. 2009.
- [5] R. Toledo-Moreo and M. A. Zamora-Izquierdo "IMM-Based Lane-Change Prediction in Highways With Low-Cost GPS/INS" IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Vol 10. No. 1, pp: 180-185. March 2009.
- [6] R. Toledo-Moreo, David Bétaille, François Peyret, "Lane-Level Integrity Provision for Navigation and Map Matching With GNSS, Dead Reckoning, and Enhanced Maps", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, vol. 11, No. 1, pp. 100-112, March 2010.
  [7] C. Piñana-Diaz, R. Toledo-Moreo, D. Bétaille, A.F. Gómez-
- [7] C. Piñana-Diaz, R. Toledo-Moreo, D. Bétaille, A.F. Gómez-Skarmeta,"GPS Multipath Detection and Exclusion with Elevation-Enhanced Map", Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems Washington, DC, USA. pp. 19-24. October 2011.
- [8] John Canny. "A computational Approach to Edge Detection". IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. Vol. 8. NO. 6, November 1986.
