

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior

GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE TELECOMUNICACIÓN



Trabajo Fin de Grado

**ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE
NAVEGACIÓN POR SATÉLITE EN EL SECTOR
DE LA AUTOMOCIÓN**

ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR

Autor: Ángel Díaz-Guerra Ortega

Tutor: Francisco Javier Escribano Aparicio

2021

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ
Escuela Politécnica Superior

**GRADO EN INGENIERÍA EN SISTEMAS DE
TELECOMUNICACIÓN**

Trabajo Fin de Grado
ANÁLISIS DE LA TECNOLOGÍA DE NAVEGACIÓN POR
SATÉLITE EN EL SECTOR DE LA AUTOMOCIÓN

Autor: Ángel Díaz-Guerra Ortega

Tutor/es: Francisco Javier Escribano Aparicio

TRIBUNAL:

Presidente: José Bienvenido Sáez Landete

Vocal 1º: Pilar Martín Martín

Vocal 2º: Francisco Javier Escribano Aparicio

FECHA: 25 de junio de 2021

Índice de contenido

Índice de contenido	5
Índice de figuras	8
Índice de tablas	11
Acrónimos	13
Resumen	16
Resumen extendido	18
Agradecimientos	20
1 Introducción	22
1.1 Motivación del proyecto	22
1.2 Objetivos del proyecto y enfoque	22
2 Historia y contexto de la navegación en la automoción	24
2.1 Introducción	24
2.2 Historia de la navegación en la automoción	24
2.2.1 Historia y desarrollo del sistema “Honda Electro Gyrocompas”	27
3 Fundamentos de los navegadores GNSS	35
3.1 Introducción	35
3.2 Triangulación	35
3.3 Terminología de la navegación	36
3.4 Características en los navegadores	38
3.5 Perturbaciones en recepción de señales	39
3.6 Descripción de los componentes	39
4 Sistemas de navegación por satélite	44
4.1 Introducción	44
4.2 Programas europeos de navegación por satélite Galileo y EGNOS	44
4.3 Frecuencias de operación	47
5 Antenas en los sistemas de navegación por satélite	50
5.1 Introducción	50
5.2 Polarización	50
5.3 Tipos de Antenas GNSS	51
5.4 Selección de antenas	52
5.5 Diseño de una antena GNSS compacta para aplicaciones vehiculares	52
5.5.1 Estudio con antena dipolar cruzada de banda ancha	54

5.5.2	Estudio con antena dipolar cruzada de banda dual.....	56
5.5.3	Simulación con antena dipolar cruzada de banda ancha.....	56
5.5.4	Simulación con antena dipolar cruzada de banda dual.....	59
6	Mejoras de los sistemas de navegación por satélite en vehículos.....	63
6.1	Introducción.....	63
6.2	Mejoras de los sistemas de navegación en vehículos con ADR y UDR.....	63
6.3	GPS Mejorado. Sistemas de Aumentación.....	66
6.3.1	GPS Diferencial (DGPS).....	67
6.3.2	SBAS (Satellite Based Augmentation Systems).....	69
6.3.3	A-GPS (Assisted-GPS).....	70
6.3.4	Receptores GPS Multifrecuencia.....	71
6.4	Mejoras de los sistemas de navegación en vehículos con GPS 3.....	72
6.5	Mejoras para aplicaciones de GNSS en vehículos.....	74
6.5.1	Sistema eCall.....	74
6.5.2	Estudios sobre mejoras para aplicaciones de GNSS en vehículos.....	77
7	Sistemas y tecnología de navegación por satélite en vehículos autónomos.....	79
7.1	Introducción.....	79
7.2	Sistemas y tecnología de navegación aplicada en vehículos autónomos.....	79
7.3	Estimación precisa de la posición de un vehículo autónomo basada en coincidencia de mapas (<i>Map-Matching</i>).....	84
8	Conclusiones y líneas futuras de trabajo.....	94
	Bibliografía.....	97

Índice de figuras

FIGURA 2.1 Asistente para lectura de rutas en carretera por J.W. Jones (1909)	25
FIGURA 2.2 Iter Avto (1930)	25
FIGURA 2.3 Auto Mapa (1954).....	26
FIGURA 2.4 Ford Aurora Concept (1964)	26
FIGURA 2.5 Honda Electro Gyrocat (1981)	27
FIGURA 2.5.1 Sensor de kilometraje	28
FIGURA 2.5.2 Sensor de giro de velocidad de gas	28
FIGURA 2.5.3 Composición del sensor de giro de velocidad de gas.....	29
FIGURA 2.5.4 Diagrama de configuración del sistema del Honda Electro Gyrocat ..	29
FIGURA 2.5.5 Hojas de ruta.....	30
FIGURA 2.5.6 Ejemplo de ajuste del trayecto recorrido	30
FIGURA 2.6 Etak Navigator (1985).....	32
FIGURA 2.7 Mazda Eunos Cosmos Navigation (1990).....	33
FIGURA 3.1 Esquema de la triangulación de señales con satélites	36
FIGURA 3.2 Ejemplo de pantalla de navegador para vehículos.....	37
FIGURA 3.3 Historia de los displays en los vehículos de Mercedes-Benz.....	40
FIGURA 3.4 Funcionamiento del sensor del ángulo de viraje sobre los elementos piezoeléctricos superiores	42
FIGURA 4.1 Constelación de satélites GPS	45
FIGURA 4.2 Constelación de satélites Galileo	45
FIGURA 4.3 Mapa de cobertura de la constelación de satélites de EGNOS.....	46
FIGURA 4.4 Constelación de satélites de GLONASS	46
FIGURA 4.5 Bandas de frecuencia para los sistemas GPS, GLONASS y Galileo	48
FIGURA 5.1 Ecuación para el cálculo del AR.....	51
FIGURA 5.2 Bandas de frecuencia para los sistemas BeiDou, Galileo, GLONASS y GPS	53
FIGURA 5.3 Estructura de la antena dipolar cruzada de banda ancha.....	55
FIGURA 5.4 Estructura de la antena dipolar cruzada de banda dual	56
FIGURA 5.5 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda ancha	57
FIGURA 5.6 Simulación del AR (Axial Ratio) de la antena dipolar cruzada de banda ancha	58

FIGURA 5.7 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda ancha con resonancias cercanas.....	58
FIGURA 5.8 Simulación del AR (Axial Ratio) de la antena dipolar cruzada de banda ancha con resonancias cercanas.....	58
FIGURA 5.9 Simulación de la ganancia en polarización circular de la antena dipolar cruzada de banda ancha para ambos sentidos de la polarización en el zenith.....	59
FIGURA 5.10 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda dual.....	59
FIGURA 5.11 Simulación del AR (Axial Ratio) de la antena dipolar cruzada de banda dual.....	60
FIGURA 5.12 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1200 MHz.....	60
FIGURA 5.13 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1230 MHz.....	61
FIGURA 5.14 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1590 MHz.....	61
FIGURA 6.1 Concepto básico del UDR (Untethered Dead Reckoning).....	64
FIGURA 6.2 Comparativa de precisión con sistema sólo GNSS y con UDR.....	65
FIGURA 6.3 Comparativa de precisión entre sólo GNSS y UDR con señal atenuada ..	66
FIGURA 6.4 Ejemplo de comunicación con GPS Diferencial (DGPS).....	68
FIGURA 6.5 Diferencia de uso de receptor con DGPS Y SBAS.....	69
FIGURA 6.6 Área de cobertura de distintos sistemas de aumentación.....	70
FIGURA 6.7 Esquema de recepción de datos de ayuda basado en A-GPS.....	71
FIGURA 6.8 Satélite GPS 3 en órbita.....	73
FIGURA 6.9 Esquema del funcionamiento del sistema eCall.....	75
FIGURA 7.1 Ford probando su coche autónomo sobre la nieve.....	80
FIGURA 7.2 Estructura del coche autónomo conectado.....	81
FIGURA 7.3 Audi Q7 autónomo desarrollado junto a Nvidia basado en inteligencia artificial (2017).....	83
FIGURA 7.4 Estructura del Audi A8 autónomo.....	84
FIGURA 7.5 Visión general de los equipos experimentales.....	86
FIGURA 7.6 (a) Vista general del ejemplo expuesto y (b) Mediciones del sensor en la situación del ejemplo expuesto.....	87
FIGURA 7.7 Estimación del resultado de las alineaciones en las marcas de carril.....	87
FIGURA 7.8 Cálculo del error de deriva en la dirección lateral del vehículo.....	88
FIGURA 7.9 Vista general de la estimación de la desviación del vehículo.....	88
FIGURA 7.10 (a) Resultado de la localización en la carretera local. (b) Vista general de la intersección. (c) Resultado en la intersección.....	89

FIGURA 7.11 Precisión de la localización	90
FIGURA 7.12 Comparación de las trayectorias al final del recorrido	90
FIGURA 7.13 (a) Visión general del recorrido. (b) Comparación de trayectorias con GNSS/INS y la estimada por el método propuesto al final del recorrido	91
FIGURA 7.14 (a) Error de deriva lateral. (b) Error de deriva longitudinal. (c) Error de deriva longitudinal en una curva abierta	92
FIGURA 7.15 Trayectorias estimadas y corregidas del vehículo en una curva.....	93

Índice de tablas

TABLA 5.1 Tipos de antenas con sus ventajas e inconvenientes	52
TABLA 5.2 Parámetros de la antena dipolar cruzada de banda ancha.....	55
TABLA 5.3 Parámetros de la antena dipolar cruzada de banda dual	56
TABLA 6.1 Tipos de sistemas de radio difusión	68

Acrónimos

ABS	<i>Antilock Brake System</i>
ADR	<i>Automotive Dead Reckoning</i>
A-GPS	<i>Assisted-GPS</i>
AR	<i>Axial Ratio</i>
ARNS	<i>Aeronautical Radio Navigation Services</i>
BAS	<i>Brake Assist System</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CE	Comisión Europea
CRT	<i>Cathode Ray Tube</i>
DGPS	GPS Diferencial
DGT	Dirección General de Tráfico
DMI	<i>Distance Measuring Instrument</i>
eCall	<i>Emergency Call</i>
EGNOS	<i>European Geostationary Navigation Overlay Service</i>
ERTMS	<i>European Rail Traffic Management System</i>
ESA	<i>European Space Agency</i>
GNSS	<i>Global Navigation Satellite System</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
GSM	<i>Global System for Mobile</i>
IDPS	<i>Intrusion Detection and Prevention System</i>
IMU	<i>Inertial Measurement Unit</i>
INS	<i>Inertial Navigation System</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation Systems</i>
LHCP	<i>Left Hand Circular Polarization</i>
LIDAR	<i>Laser Imaging Detection and Ranging</i>
LORAN	<i>LOng-RANge Navigation</i>

MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i>
MLA	<i>Meander Line Antenna</i>
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NG-eCall	<i>Next Generation emergency call</i>
OBD	<i>On Board Diagnostics</i>
PPS	<i>Precise Positioning System</i>
PSAP	<i>Public Safety Answering Point</i>
PYME	Pequeñas y medianas empresas
RHCP	<i>Right Hand Circular Polarization</i>
RKT	<i>Real Time Kinematic</i>
RNSS	<i>Radio Navigation Satellite Services</i>
RTOS	<i>Real Time Operating System</i>
SAR	<i>Search and Rescue</i>
SBAS	<i>Satellite Based Augmentation System</i>
SDARS	<i>Satellite Digital Audio Radio Service</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNCF	Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses
SPS	<i>Standard Positioning Service</i>
TGV	Tren de Gran Velocidad
TPS-eCall	<i>Third party services emergency call</i>
TTF	<i>Time to First Fix</i>
UDR	<i>Untethered Dead Reckoning</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
VIN	<i>Vehicle Identification Number</i>
WAAS	<i>Wide Area Augmentation System</i>

Resumen

Entre los avances tecnológicos más importantes desarrollados en los últimos tiempos, destacan los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) por su especial utilidad, especialmente dentro del mundo de la automoción, que empleamos a diario millones de usuarios en todo el mundo.

El presente TFG trata de detallar los fundamentos, historia y desarrollo de los sistemas de navegación basados en satélite. De esta forma, en el presente trabajo se expondrán algunos ejemplos de aplicaciones que se apoyan en dichos sistemas, tales como la conducción autónoma. Se plantearán los diferentes problemas relacionados con la precisión, la circulación en zonas de baja o nula cobertura, etc.

Se estudiará cómo funcionan en estos sistemas la propagación de las señales, posicionamiento, cobertura, vulnerabilidades, seguridad, etc. En suma, sus fundamentos principales. El trabajo finaliza con unas conclusiones sobre el estado del arte y su posible evolución en el futuro próximo.

Palabras clave

GNSS, Navegación, Posicionamiento, Satélite, Automoción

Abstract

Among the most important technological advances developed in recent times, we highlight the GNSS (Global Navigation Satellite System) systems due to their usefulness, especially in the automotive world, employed everyday by millions of users around the world.

The present TFG aims to detail the fundamentals, history and development of satellite-based navigation systems. In this way, this document will present some examples of applications that rely on such systems, such as autonomous driving. We will address the different problems related to precision, circulation in areas of low or null coverage, etc.

We will study how the propagation of signals, positioning, coverage, vulnerabilities, security, etc. work in these systems. In short, their main fundamentals. The report ends with some conclusions about the state of the art and its possible evolution in the near future.

Keywords

Global Navigation Satellite System, Navigation, Positioning, Satellite, Automotive

Resumen extendido

La navegación por satélite ha experimentado un enorme crecimiento en los últimos años, esto ha permitido la aparición de numerosas aplicaciones que tienen un gran impacto en nuestra sociedad. Los sistemas GNSS (*Global Navigation Satellite System*) comienzan con el desarrollo del sistema GPS (*Global Positioning System*) propuesto para uso militar por parte de los Estados Unidos, que posteriormente fue introducido en aplicaciones de uso civil. Este primer sistema abrió camino para la aparición de nuevos sistemas más modernos, con mayores prestaciones y capacidades.

Entre la multitud de aplicaciones, destaca la importancia que tienen estos sistemas en el mundo de la automoción y la amplia tecnología que emplean.

En este trabajo se estudian las diferentes tecnologías que implementan los vehículos apoyados en los sistemas GNSS. Se presentan los sistemas de navegación por satélite más importantes, su funcionamiento y aplicaciones en este campo. Se exponen diversos estudios de carácter técnico de aplicaciones para automóviles basados en estos sistemas, y se estudian los diferentes problemas que surgen, como la falta de precisión en zonas de escasa cobertura, las perturbaciones que pueden sufrir las señales, etc.

También se abordan elementos imprescindibles para que se pueda producir la comunicación entre los satélites y los vehículos, entre ellos destacan las antenas. Se explicarán los parámetros más relevantes, tipos existentes y sus prestaciones en aplicaciones vehiculares.

Entre los grandes avances conseguidos, juega un papel fundamental la mejora en la seguridad. Gracias a los sistemas como eCall se da un salto cualitativo en este aspecto.

Además se exponen distintas mejoras de estos sistemas destinados a vehículos. A lo largo del trabajo se pone de manifiesto la gran evolución tecnológica que ha sufrido este campo, desde los primeros navegadores hasta el nacimiento de los vehículos autónomos y el gran potencial que tendrán en los próximos años. Se explica la implementación de estos sistemas en los vehículos autónomos, con varios modelos a modo de ejemplo.

La navegación por satélite aplicada a la automoción es un éxito y presenta un horizonte muy esperanzador, permitiendo nuevas oportunidades de negocio en los próximos años y mejorando la vida de las personas.

Agradecimientos

En primer lugar quiero agradecer a mi tutor, Francisco Javier Escribano Aparicio, por permitirme la oportunidad de realizar este proyecto de fin de carrera. Darle las gracias por su inestimable ayuda y consejos dados a lo largo de todo el trabajo, siempre disponible para cualquier tipo de duda que necesitase resolver.

También por supuesto, agradecer a la Escuela Politécnica Superior de la Universidad de Alcalá de Henares sus enseñanzas impartidas durante toda mi etapa académica y de la que siempre guardaré un grato recuerdo. Dar las gracias a profesores y todo el personal que trabaja en la Escuela a diario para que los alumnos puedan estar en las mejores condiciones posibles.

Por último, dar las gracias a todas las personas que me han apoyado y han contribuido a mis logros a lo largo de todos estos años, por estar ahí en los momentos difíciles y animarme, creyendo en mí. En especial a mi familia y amigos que he hecho durante esta etapa, haciendo posible alcanzar mis objetivos y que me han hecho pasar tan agradables momentos en la Universidad.

Ángel Díaz-Guerra Ortega

1 Introducción

1.1 Motivación del proyecto

La navegación por satélite ha experimentado una gran evolución en los últimos años gracias al desarrollo de la tecnología empleada para ello, permitiendo la aparición de numerosas aplicaciones de todo tipo que se basan en dicha tecnología y entre las que cabe destacar su uso en el mundo de la automoción.

Esta tecnología ha tenido un gran impacto en dicho sector, la cual permite continuas evoluciones en la seguridad, fiabilidad, comodidad, etc. de todos los usuarios a nivel mundial de los sistemas de ayuda en la navegación, sistemas de emergencia implementados en el vehículo, conducción autónoma, etc.

Como hemos mencionado anteriormente, esta tecnología aplicada en el sector de la automoción vive un permanente desarrollo, lo que la hace especialmente atractiva en el mercado y la cual proporcionará nuevas oportunidades de negocio y ofrecerá un gran abanico laboral para los ingenieros de telecomunicación. Todo ello permitirá una mayor oferta de puestos de trabajo en distintas empresas como, por ejemplo, desarrolladores de software para los diferentes sistemas que se implementan en los vehículos.

Así, este proyecto nace motivado por la búsqueda de un mayor conocimiento y entendimiento sobre el empleo de esta tecnología en este campo de aplicación, las perspectivas profesionales de negocio y el mercado laboral que están generando (y continuará haciéndolo) nuevas oportunidades a nivel internacional.

1.2 Objetivos del proyecto y enfoque

Este proyecto está dedicado a estudiar y comprender cómo funciona la navegación por satélite aplicada al campo de la automoción con toda la tecnología que conlleva. El trabajo pretende adquirir un conocimiento de la aplicación de esta tecnología y los diversos elementos que intervienen en la misma además de analizar diversos documentos técnicos, de carácter científico y de investigación y el impacto tanto económico como social que tiene y tendrá en la industria en un futuro.

Para poder llevar a cabo el trabajo, se aborda en varios capítulos sucesivos:

Para comenzar, se hará un recorrido por la historia y contexto de la navegación en la automoción, donde se podrá ver cómo eran dichos sistemas en los primeros vehículos en los que se implementaron.

Después se dedicará un capítulo en especial para explicar el funcionamiento de los sistemas GNSS desde el punto de vista del conductor, mediante el navegador. Se expondrá la tecnología empleada, la terminología que se usa con los distintos menús y características que ofrece, también se describen algunos de sus componentes más importantes que rigen su funcionamiento.

Posteriormente se tratarán algunos de los sistemas de navegación por satélite más importantes, describiendo otros sistemas fundamentales y más modernos que GPS, que cuentan con un enorme potencial para su uso en el campo de la automoción.

El siguiente capítulo tratará de hacer comprender al lector la gran importancia de un elemento básico en los sistemas de navegación por satélite, como son las antenas. Se explicarán los tipos utilizados, las diferentes ventajas e inconvenientes de cada una de ellas y su aplicación en el campo de la automoción con diversos estudios prácticos.

Una vez descritos los sistemas de navegación por satélite y las antenas, se expondrán algunas mejoras de estos sistemas en los vehículos actuales. Se hará mención especial al sistema más común y conocido por los usuarios, como es el GPS y las mejoras que ofrece con los sistemas de aumentación. Además se explicará el sistema eCall, a modo de ejemplo del gran impacto que tienen estos sistemas de navegación en los vehículos de hoy en día y, también se expondrán algunas evoluciones futuras de dicho sistema.

Después se tratará el tema del funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite en los vehículos autónomos, los sistemas que utilizan para tener la capacidad de autonomía, y se expondrán ejemplos de modelos de vehículos actuales.

Uno de los principales objetivos del trabajo siempre ha sido tratar de aprender sobre un tema que me despierta mucho interés y poder transmitir ese mismo interés al lector. Por ello, finalmente se dedicará un apartado para poder ofrecer las conclusiones que se han obtenido a lo largo de la realización del proyecto y las líneas futuras de trabajo.

2 Historia y contexto de la navegación en la automoción

2.1 Introducción

Este proyecto comienza con un pequeño repaso a la historia de la navegación en la automoción para poner en contexto todo lo que se describirá y estudiará posteriormente en el trabajo y el porqué del interés y motivación de su realización.

El objetivo de esta introducción es que el lector obtenga una idea general de los sistemas de navegación en la automoción y que le sirva como base para luego comprender mejor el resto del proyecto.

2.2 Historia de la navegación en la automoción

El sistema de navegación por satélite en la automoción más común y extendido es el sistema GPS (*Global Positioning System*), y su uso en el automóvil se incorpora desde finales del siglo XX.

Desde hace años, cualquier usuario ha tenido la necesidad de utilizar sistemas de navegación para guiarse de la mejor manera por calles y carreteras por las que no está habituado a circular, y hoy en día es un elemento indispensable en la conducción.

Los primeros sistemas de seguimiento de ruta y navegación aplicados al automóvil se empezaron a desarrollar a principios del siglo XX y en nuestro país a mediados de dicho siglo, y evidentemente estos sistemas de seguimiento de ruta no estaban basados en GNSS (*Global Navigation Satellite System*), ya que la tecnología en esos tiempos era mucho más rudimentaria que la tecnología avanzada de la que disponemos en nuestros días.

Procedamos a hablar de los hitos históricos de los navegadores más antiguos hasta los más modernos. Cabe destacar que el uso en su máximo provecho de la tecnología GPS no estuvo disponible hasta alrededor del año 2000 ya que este sistema fue desarrollado poco antes por los Estados Unidos para uso militar y posteriormente fue liberado para uso civil. Desde entonces ha tenido una progresión fulgurante.

En los primeros años, a principios del siglo XX, sólo estaban disponibles los mapas de carretera sobre papel, que tenían la gran desventaja de que bajo posibles modificaciones no se podía actualizar el mapeado de forma rápida y automática, teniendo que volver a imprimir dichos mapas. Posteriormente gracias a la tecnología que proporciona la navegación por satélite, disponemos de sistemas de cartografía avanzados siendo los más utilizados, OpenStreetMap predecesor de Google Maps y DigitalGlobe [1].

El primer inventor de un sistema de navegación para rutas en carretera fue el norteamericano J.W.Jones en 1909, evidentemente era sobre papel, como se puede ver en la Figura 2.1, y consistía en hacer girar un disco de papel con información codificada y con una ruta entre dos ciudades en el cual había marcados distintos elementos de interés tales como puentes, ríos, etc. Este disco giraba cuando el coche estaba en movimiento, una aguja indicaba la posición en ese momento y cada disco abarcaba 100 millas. A pesar de lo rudimentario del sistema, permitía orientarse en la conducción.

Como ya hemos mencionado anteriormente, la evolución constante de las carreteras hizo imposible actualizar los mapas al mismo ritmo por lo que dejó de ser utilizado.

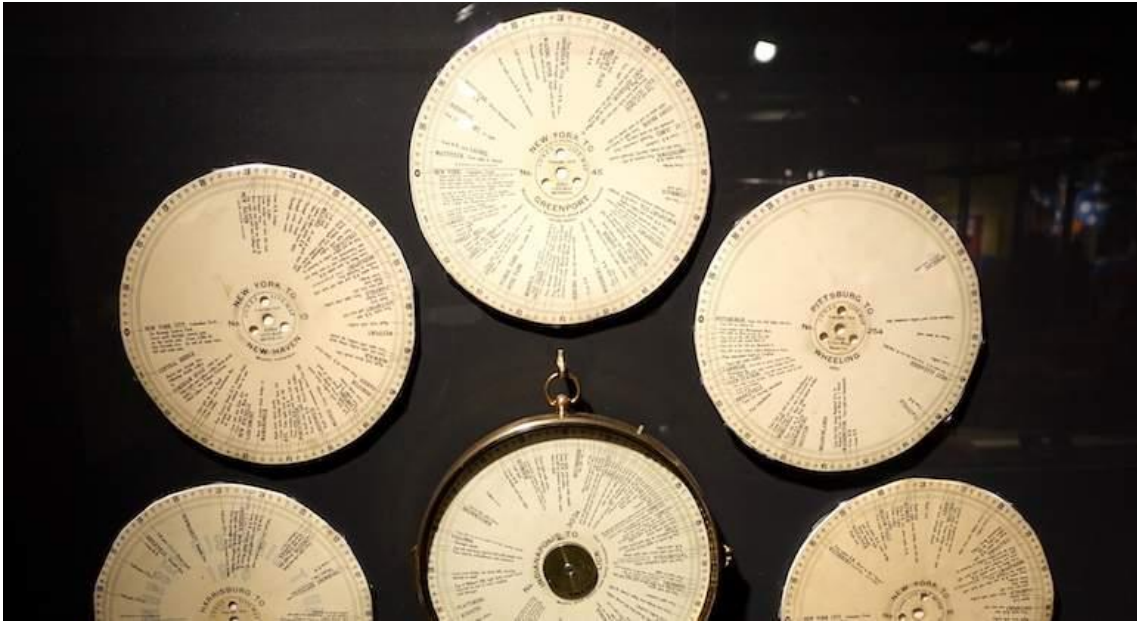


FIGURA 2.1 Asistente para lectura de rutas en carretera por J.W. Jones (1909). Fuente [2].

Posteriormente en 1930 se diseñó en Italia el Iter Avto, el cual disponía de una serie de mapas en papel que iban mostrándose en la pantalla del dispositivo donde estos mapas iban enrollados, y un cable conectado al velocímetro regulaba el mecanismo interno de tal manera que el mapa se desplazaba en función de la velocidad que el vehículo llevaba en ese momento, como se observa en la Figura 2.2. Pero de nuevo teníamos el mismo problema: los mapas no se podían actualizar de manera automática.

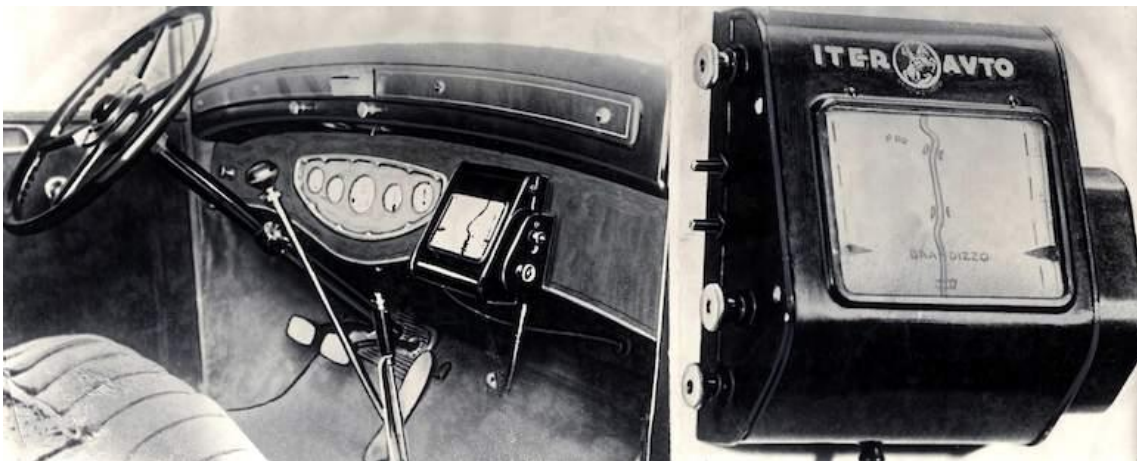


FIGURA 2.2 Iter Avto (1930). Fuente [2].

Más tarde en 1954 se creó el primer sistema de navegación diseñado por un español, Antonio Martín Santos, llamado Auto Mapa y que, de forma similar al anterior, tenía algunas mejoras como, por ejemplo, su carácter portátil, como se ve en la Figura 2.3. Dicho sistema fue patentado en once países europeos y consiguió la medalla de oro en el VI Salón Internacional de Inventores en Bruselas tan sólo tres años más tarde de su

creación, despertando el interés de numerosas marcas de automóvil. Sin embargo, tras el fallecimiento de su inventor en el año 1961, quedó en desuso.



FIGURA 2.3 Auto Mapa (1954). Fuente [2].

Pocos años más tarde en 1964, EEUU creó el sistema Ford Aurora Concept, como se muestra en la Figura 2.4, donde se ve un mapa más detallado que en los modelos anteriores. Ya son implementados avances en sistemas de geolocalización y digitalización de mapas como los del Departamento de Desarrollo Rural, y que ya habían sido desarrollados en 1962 por Roger Tomlinson y ciertos organismos estadounidenses, como los desplegados por su departamento de Defensa además de la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). La marca Ford fue pionera dentro del mercado norteamericano en la incorporación de sistemas de navegación en la automoción, y el mencionado sistema ya permitía un navegador integrado de manera cómoda en el salpicadero del vehículo y cuya cartografía se actualizaba a medida que se circulaba. No se llegó a comercializar, pero ya marcó la línea a seguir por los futuros navegadores.



FIGURA 2.4 Ford Aurora Concept (1964). Fuente [2].

En la década de los 80 y 90, surgieron varios modelos bastante avanzados y hemos de recordar que el auge de la electrónica ya era considerable, lo que permitió una evolución más rápida que sus predecesores. A continuación, se comentan brevemente algunos de ellos.

En 1981 el fabricante japonés Honda creó el Electro Gyrocom, el cual disponía de numerosa electrónica, con múltiples botones de configuración, como se observa en la Figura 2.5, que le permitía ser un sistema fiable para la época. Vamos a detenernos a explicar de manera más amplia este sistema de navegación, por la importancia y relevancia que tuvo.



FIGURA 2.5 Honda Electro Gyrocom (1981). Fuente [2].

2.2.1 Historia y desarrollo del sistema “Honda Electro Gyrocom”

Este sistema fue diseñado antes de la aparición del GPS. Honda inventó un sofisticado mecanismo capaz de mostrar el recorrido de un vehículo en movimiento en pantalla usando CRT (*Cathode Ray Tube*) mediante la cual el conductor pudiera ver su ubicación actual, basándose en la idea inspirada en la inercia de sistemas de navegación desarrollados por entonces en aviones. En la década de 1970, hubo grandes avances en la tecnología automovilística donde Japón, se erigió como una de las grandes potencias en esa época. Sin embargo, el aumento masivo de vehículos a motor produjo un elevado tráfico en las carreteras, además de un gran aumento de la movilidad de la población. Por este motivo, el gobierno japonés lanzó el proyecto conocido como: Sistema integral de control del tráfico de automóviles (*Comprehensive Automobile Traffic Control System*), con el objetivo de equipar al vehículo en movimiento con una función capaz de proporcionarle una guía de ruta dinámica a través de la pantalla a bordo, con indicaciones de la situación real del tráfico en ese momento.

El proyecto tenía como objetivo crear un sistema de navegación con capacidades hardware, tales como poder transmitir la información sobre la ubicación actual del

vehículo en movimiento y la visualización de la ruta hasta el destino mostrada en pantalla con las referencias de las condiciones del tráfico. Sin embargo la posibilidad de realizar un sistema que ofreciera tales prestaciones era algo complicado, ya que en esa época no había una tecnología suficiente capaz de soportar tal cantidad de información.

Por lo tanto, Honda decidió idear un sistema innovador de navegación basado en mapas capaz de visualizar el recorrido en pantalla incluyendo su ubicación actual como hemos mencionado, sin tener que depender de ningún tipo de instalación externa como una estación de radio. El problema fundamental de este sistema, es la dificultad de buscar datos de posicionamiento en la ubicación actual del vehículo en movimiento. Recordemos que se habla de una época anterior a GPS, Honda trató de desarrollar un procedimiento complejo para tratar de abordar este problema mediante la detección de la distancia del vehículo y su dirección en movimiento, a través del sensor de kilometraje y el sensor de giro de velocidad de gas que se muestran en la Figura 2 y Figura 3 respectivamente. Cabe destacar que ambos sensores fueron utilizados en vez de los sistemas de navegación operativos en ese momento como LORAN (*LOng-RAnge Navigation*), Omega System, etc., porque estos no funcionaban de manera correcta en entornos urbanos con altos edificios o túneles.



Fig. 2 'Mileage' sensor.

FIGURA 2.5.1 Sensor de kilometraje. Fuente [3].



Fig. 3 'Gas-rate gyro' sensor.

FIGURA 2.5.2 Sensor de giro de velocidad de gas. Fuente [3].

El sensor de kilometraje de la Figura 2.5.1 fue utilizado para la transmisión de señales eléctricas, las cuales informan a la unidad informática de la Figura 2.5.4 del número de revoluciones de las ruedas del vehículo en movimiento usando un módulo de detección de revoluciones. Además, el sensor de giro de velocidad de gas de la Figura 2.5.2 fue usado para la transmisión de señales eléctricas que, como antes, informan a la unidad informática de la Figura 2.5.4 pero en este caso, de la orientación de la dirección del

vehículo en movimiento. Era un giroscopio que se componía de una bomba piezovibradora que ayudaba a la circulación de gas de helio, una boquilla de inyección para el gas, y dos cables calientes para poder saber cuándo se producía la desviación del flujo del mismo, tal y como se muestra en la Figura 2.5.3.

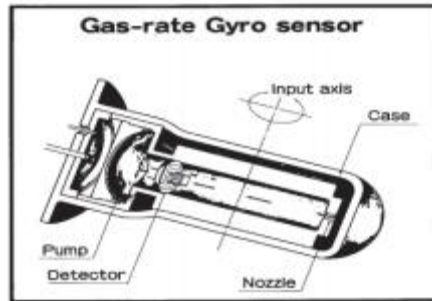


Fig. 4 Composition of gas-rate gyro sensor.

FIGURA 2.5.3 Composición del sensor de giro de velocidad de gas. Fuente [3].

A la hora de circular el vehículo hacia delante, el gas de helio golpeaba ambos cables calientes manteniéndolos a la misma temperatura. En el momento en el que el vehículo giraba, el flujo de gas se desviaba produciendo una diferencia de temperatura entre los dos cables, lo cual generaba una variación en la potencia de salida que significaba un cambio en la dirección del vehículo. Posteriormente la unidad de control de la Figura 2.5.4, calcula los datos de posicionamiento sobre la ubicación actual en coordenadas bidimensionales y el ángulo de la dirección actual respectivamente, para almacenarlos en memoria. En la Figura 2.5.4 se muestra el diagrama de configuración del sistema del Honda Electro Gyrocat, en el que se pueden observar los diferentes componentes que lo forman.

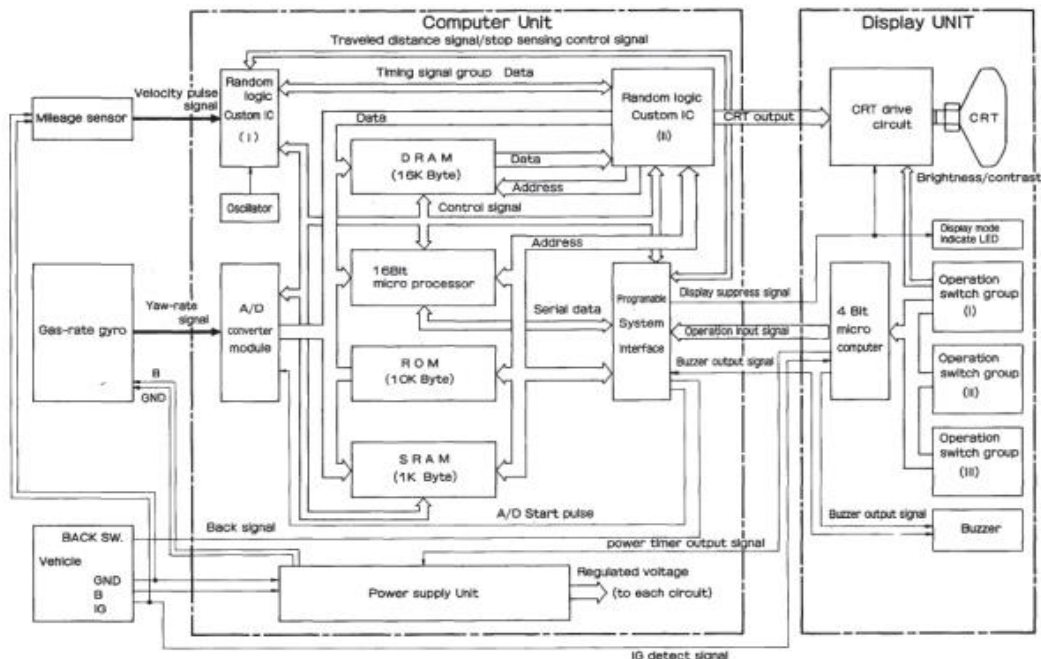


Fig. 1. System configuration diagram of 'Honda Electro Gyrocat'.

FIGURA 2.5.4 Diagrama de configuración del sistema del Honda Electro Gyrocat. Fuente [3].

Por otro lado, la unidad de visualización muestra la imagen del trayecto recorrido en la pantalla de CRT a través de un complejo mecanismo de procesamiento de los datos anteriores previamente almacenados, pudiendo ampliar la imagen o desplazarla a elección del conductor. Además el sistema mitiga los errores de precisión, ya que la unidad de control es capaz de realizar los cálculos evitando que los errores acumulados sean significativos.

A finales de la década de 1970, el volumen total de datos digitales que contiene un libro de hoja de ruta es muy elevado para ser transportado en un vehículo, de manera que los datos de la hoja de ruta debían de ser preparados por separado del sistema de visualización. De tal manera como se muestra en la Figura 2.5.5, las hojas de ruta transparentes, se elaboraron sobre la base de los mapas a escala 1/250000.

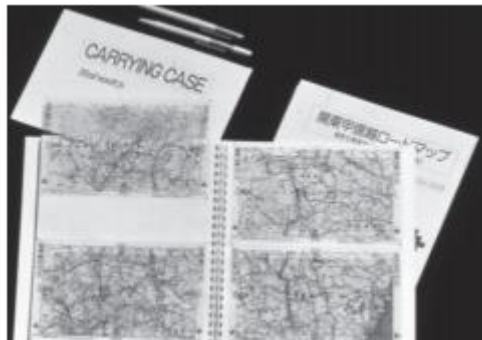


Fig. 5 Road-map sheets and marking pens.

FIGURA 2.5.5 Hojas de ruta. Fuente [3].

Estas hojas de ruta transparentes debían superponerse sobre la pantalla de CRT, para que el conductor pudiera visualizar la ubicación actual haciendo coincidir el trayecto recorrido en la pantalla CRT con la hoja de ruta. La distribución de colores para las hojas de ruta, se decidió en contraste al verde de la luz de CRT.

De esta manera, si alguna parte del trayecto recorrido se desviaba del camino que dibujaba la hoja de ruta, la imagen debía ser modificada para mostrarse correctamente. Esto puede ser solucionado por el conductor, ajustando la imagen para enfocarla sobre la carretera por la que circulase como se muestra en la Figura 2.5.6, donde se puede ver que el trayecto indicado se ha desviado ligeramente de la carretera por la que circula, y debe ser corregido a su sitio correcto.



Fig. 6 Example of adjusting a traveled course.

FIGURA 2.5.6 Ejemplo de ajuste del trayecto recorrido. Fuente [3].

Para poder ajustar la imagen, el sistema permitía dos funciones. Una de ellas, permitía al conductor mover de forma vertical, horizontal o rotacional la imagen del trayecto recorrido en la pantalla CRT y la otra función, permitía ajustar las posiciones de las carreteras en la hoja de ruta mediante deslizamiento o rotación.

La unidad de control debía de ser capaz de atender a las demandas del conductor incluso mientras ejecutaba operaciones de búsqueda extensas de datos de posicionamiento del vehículo en movimiento en tiempo real, siendo difícil controlar correctamente los cambios de tareas requeridas mediante el proceso de interrupciones. Con lo cual el Sistema Operativo en Tiempo Real RTOS (Real Time Operating System) era fundamental, y por lo tanto Honda se vio obligado a desarrollar todos los sistemas para programas de aplicación para el sistema operativo, lo cual es una función que no tendría que recaer en un fabricante de automóviles, pero tuvo que hacerlo.

Como consecuencia de lo anterior, se tuvo que adoptar un nuevo esquema de hojas de ruta transparentes que se superponían a las imágenes del trayecto recorrido que se muestran sobre la pantalla de CRT, siendo Honda el precursor de esta manera de trabajar con guías de rutas basadas en mapas. A medida que avanzaron los años, el sistema fue mejorado hasta evolucionar definitivamente en el sistema de navegación basado en mapas del que trata este apartado, el “Honda Electro Gyrocator” lanzado en 1981.

Posteriormente al lanzamiento, había un sistema de navegación capaz de detectar la distancia y la dirección en movimiento de un vehículo mediante sensores de revolución de las ruedas y sensores geomagnéticos, respectivamente. Sin embargo, dicho sistema no podía guiar una ruta por navegación basada en mapas, y contaba con los siguientes inconvenientes:

- La navegación se detiene cuando el vehículo se encuentra con un obstáculo delante tal como un río, ya que sólo se mostraba una dirección al destino.
- Era común que se produjeran grandes errores en la navegación cuando el vehículo estaba en presencia de grandes sustancias magnéticas como puentes de hierro, las vías ferroviarias, etc., que producían la magnetización del vehículo debido a los sensores geomagnéticos que tenía para la detección de la dirección en movimiento del mismo.
- El conductor no podía darse cuenta de un error ni podía ajustarlo o corregirlo manualmente, debido a que la información sobre la posición del vehículo no era accesible para él, ya que sólo se encontraba en el propio sistema interno.

Comparándolo con los sistemas anteriores a este, el “Honda Electro Gyrocator” presentaba las siguientes ventajas:

- El nuevo sistema de navegación desarrollado por Honda basado en mapas, podía seguir la búsqueda de ruta a lo largo de todos los caminos posibles hacia el destino, evitando todos los obstáculos que hubiera.
- El sistema tenía la capacidad de detectar el trayecto del vehículo, incluyendo la ubicación actual.

- En el caso de que la ubicación actual mostrada en pantalla no fuese la correcta, el conductor podía corregirlo de manera manual.

Estas tres características fueron adaptadas para los sucesivos sistemas de navegación basados en GPS.

Como se ha dicho en numerosas ocasiones, el uso de esta tecnología de navegación por satélite ha crecido de manera exponencial, pudiendo desarrollar e implementar nuevas funciones tales como información sobre el tráfico actual en las carreteras, búsqueda de rutas alternativas evitando el congestionamiento de una manera eficaz, vehículos autónomos, etc., en muy poco tiempo. Esta tecnología en constante crecimiento, contribuirá en un futuro cercano a la comunicación entre vehículos e infraestructuras, mejorando los sistemas de transporte inteligente ITS (*Intelligent Transportation Systems*) a través de una conducción más segura y eficiente.

El “Honda Electro Gyroator”, contribuyó de manera esencial a los actuales sistemas de navegación por satélite en el automóvil basados en mapas. La idea de buscar datos de posicionamiento para la ubicación de un vehículo en movimiento, fue tomada por todos los sistemas posteriores hasta los actuales, que buscan optimizar la búsqueda de rutas además de mejorar la precisión en condiciones de conducción adversas [3].

Cuatro años más tarde en 1985, llega Etak Navigator proveniente de EEUU, lo que se podía considerar un pequeño ordenador y ya eran sistemas digitales más avanzados, como se ve en la Figura 2.6, y no manuales como al principio de siglo.



FIGURA 2.6 Etak Navigator (1985). Fuente [2].

En 1987 Toyota, de nuevo un fabricante japonés, crea el Toyota CD-ROM donde guarda la información además de un monitor con pantalla a color.

En 1990, ya aparece por primera vez el uso del GPS en estos sistemas de navegación. Como hemos mencionado anteriormente, la electrónica y el mundo digital ya empezaba a aparecer en la mayoría de los sistemas y dispositivos, y su uso en la navegación era imparable. En la Figura 2.7, se muestra el sistema de navegación implementado en el

salpicadero del Mazda Eunos Cosmos, tal y como suelen ir la mayoría en la actualidad. Con todas estas evoluciones tecnológicas, el fabricante japonés Mazda creó en ese año el primer sistema de navegación en el automóvil en tiempo real empleando el uso de los satélites, este ya sería el paso fundamental para la vertiginosa evolución de estos sistemas y otros apoyados en la continua evolución de las tecnologías relacionadas.



FIGURA 2.7 Mazda Eunos Cosmos Navigation (1990). Fuente [2].

En 1992, General Motors, que es una compañía estadounidense de mucho peso en el mundo de la automoción, también empezó a crear sistemas basados en el GPS, aunque de forma incipiente.

Ya a finales del siglo XX, en 1997, la marca francesa Alpine presenta al mercado el primer equipo portátil de navegación por GPS. Como hizo Toyota a finales de 1980, se seguía empleando los CD como sistema para guardar la información, de forma que los usuarios pudieran usarlos en sus distintos vehículos.

Un año más tarde, en 1998, la empresa estadounidense Garmin, que es una potencia en equipos móviles de geolocalización, creó el Early Garmin StreetPilot que fue el primer sistema GPS verdaderamente portátil destinado a la automoción [2].

Hasta aquí se ha dado una breve exposición de la historia de los sistemas de navegación, desde los más primitivos en papel con escasas funcionalidades apoyados en electrónica muy básica, hasta posteriormente cuando con el avance de la tecnología se empiezan a utilizar los satélites como sistema de navegación, conformando el sistema global GNSS. En ese momento entra en juego uno de los sistemas de navegación por satélite más conocidos y comunes como es el GPS, el cual fue en un principio destinado para uso militar y posteriormente fue ampliado al mundo civil en la década de los años noventa, liberando su potencial de manera completa en el año 2000. Desde entonces, la tecnología relacionada ha sufrido un crecimiento exponencial y ello ha permitido dar grandes pasos en el mundo de la navegación por satélite. Todo ello permitirá futuras evoluciones que ayudarán y mejorarán la comodidad y seguridad de millones de usuarios en todo el mundo.

Una vez recorrida la historia de la navegación en la automoción, es momento de exponer la tecnología que ofrece uno de los mayores hitos logrados en este ámbito, como son los navegadores. Este sistema fue la base sobre la que se apoyan los sistemas de navegación por satélite más modernos implementados en los vehículos, y es por ello que requiere un capítulo específico debido a su interés.

3 Fundamentos de los navegadores GNSS

3.1 Introducción

El sistema de navegación por satélite más común y utilizado es el sistema GPS, pero las distintas características y funcionalidades de los navegadores que se muestran a continuación son aplicables a los demás sistemas GNSS conocidos. En este capítulo, abordaremos diferentes temas tales como la triangulación, los modos de configuración del navegador en el vehículo, características, perturbaciones de las señales y algunos de los componentes más importantes.

3.2 Triangulación

El correcto funcionamiento de cualquier sistema de navegación por satélite depende de la triangulación y es parte imprescindible de estos. La triangulación, consiste en determinar el ángulo de cada una de las tres señales respecto al punto de medición, una vez que se conocen cuáles son estos ángulos, ya se puede conocer la posición relativa respecto a en este caso, a los tres satélites. Y además, al conocer las coordenadas de cada uno de ellos a través de la señal que emiten, se obtiene la posición absoluta con las coordenadas exactas del punto de medición. Se tienen en cuenta cuatro factores fundamentales, como son:

- Distancia, el receptor mide las distancias utilizando el tiempo de viaje de las señales de radio.
- Tiempo, para lograr medir el tiempo de viaje de las señales, el sistema GNSS debe tener un control muy exacto del tiempo.
- Posición, el sistema GNSS tiene que conocer la posición de los satélites de manera exacta en el espacio. Puede hacerlo gracias a las órbitas de gran altura y con un monitoreo preciso.
- Corrección, el sistema GNSS tiene que corregir cualquier retardo que haya sufrido la señal en el tiempo de viaje.

La triangulación en los sistemas GNSS, como hemos mencionado anteriormente, se basa en utilizar al menos tres satélites como puntos de referencia para poder triangular la posición en la Tierra.

¿Pero cómo se determina la posición exacta? Para explicarlo de manera sencilla e intuitiva, vamos a hacerlo mediante un ejemplo.

Vamos a imaginar que nuestra distancia al primer satélite es de (d_1), conocida esta distancia está claro que nos localizamos en un punto cualquiera de una esfera de ese radio. Después imaginemos que la distancia al segundo satélite es de d_2 , luego por el mismo razonamiento anterior, nos localizamos en un punto de otra esfera con ese radio pero también de la primera esfera, con lo cual nos localizamos en un punto de la circunferencia que queda dibujada de la intersección de las dos esferas anteriores.

Posteriormente imaginemos que la distancia al tercer satélite es de d_3 , de nuevo esto implica que nos localizamos en un punto de la esfera con ese radio y a su vez a los puntos donde la esfera correspondiente a este tercer satélite corta la circunferencia anterior que se formó por la intersección de las dos esferas anteriores. Estos puntos resultan ser solamente dos, luego con solamente la medición de distancias a tres satélites se consiguen establecer dos posiciones posibles. ¿Pero cómo sabemos cuál de estos dos puntos es verdaderamente el correcto? En la mayoría de los casos, uno de esos dos puntos, se descartan ya que tienen una localización bastante alejada de la superficie terrestre y estamos en algún punto de la superficie terrestre, luego el otro punto es el exacto, tal y como se muestra en la Figura 3.1. De todas formas, la medición de la distancia a un cuarto satélite resulta ser recomendable por razones técnicas.

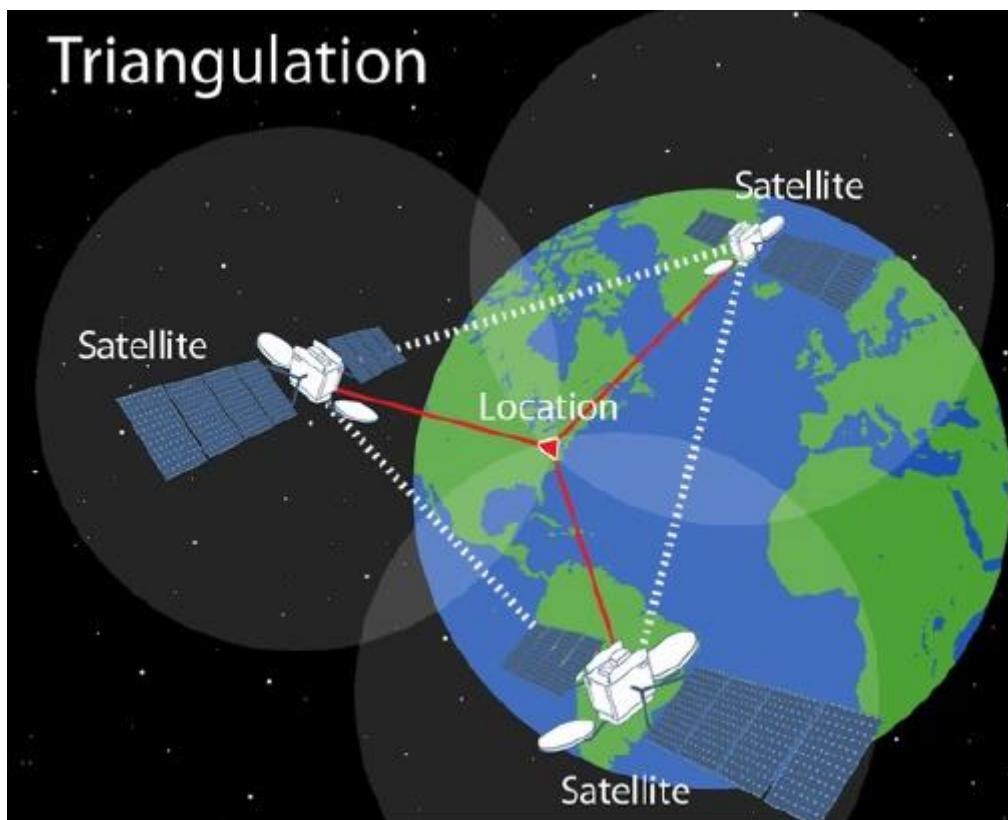


FIGURA 3.1 Esquema de la triangulación de señales con satélites. Fuente [4].

3.3 Terminología de la navegación

En este apartado, se muestran algunas de las principales funcionalidades disponibles en cualquier navegador comercial que utilice sistemas GNSS, así como la terminología básica para saber utilizarlos e interpretarlos.

El sistema de navegación muestra y sigue la posición y el movimiento del vehículo en la pantalla de visualización de mapa en movimiento. Al introducir un destino, dicho sistema calcula una de las posibles rutas y le guía por la misma a través de diferentes representaciones e iconos gráficos en la pantalla además de indicaciones de voz, para que el conductor no tenga la necesidad de mirar la pantalla en plena conducción a lo largo de la ruta hasta su destino.

En lo que respecta a la posición actual del vehículo, el sistema de navegación utiliza las señales recibidas del sistema que junto con la información de mapa almacenada en la memoria del dispositivo, permite mostrar la posición y dirección del vehículo. Dicho sistema, también contiene un giroscopio y un sensor de velocidad permitiendo mostrar la posición del vehículo.

Los puntos de ruta, son como su propio nombre indica, el marcado de los puntos a lo largo de la ruta por los que quiere circular con el vehículo y estos son indicados mediante iconos en la pantalla.

Uno de las funcionalidades más útiles es el poder guardar en la memoria del dispositivo los lugares que son más visitados por el usuario tales como su domicilio, lugar de trabajo, etc.

De la variedad de rutas por las que se puede circular desde el origen hasta el destino, el usuario puede elegir cualquiera de ellas pudiendo priorizar distintos aspectos como por ejemplo la selección de autopistas o carreteras convencionales en función del tráfico o los gustos del propio usuario.

También la concordancia de mapa resulta de importancia al circular, la cual permite corregir el error de precisión del sistema, mostrando la posición del vehículo dentro de la carretera y no fuera de esta.

Otras visualizaciones que se muestran en la pantalla del dispositivo serían el destino, la ruta establecida de manera automática o la elegida por el usuario además de la ruta recorrida, mostrando las carreteras por las que se ha circulado. Hay un límite de kilómetros de ruta almacenados en memoria, que depende de la capacidad de cada dispositivo y al llegar a este, las rutas recorridas se eliminan empezando desde el punto de origen.

La Figura 3.2 muestra un ejemplo de pantalla típica de navegador comercial para vehículos, donde se pueden ver algunas de las funcionalidades mencionadas anteriormente.



FIGURA 3.2 Ejemplo de pantalla de navegador para vehículos. Fuente [5].

3.4 Características en los navegadores

En el apartado que se verá a continuación, se explican algunas de las principales características que ofrece cualquier navegador para poder entender mejor su manejo en la carretera.

- Cálculo automático de rutas, es una característica fundamental y aunque parezca obvia, la más importante. El sistema es capaz de buscar automáticamente la ruta hasta el destino elegido pudiendo ser, la más rápida, evitando picos de tráfico, diferentes carreteras congestionadas o ralentizadas por cualquier circunstancia, etc.

- Fijación de rutas alternativas, en relación a la característica anterior, hay dos tipos de fijación de ruta. Una de ellas es la opción de fijación rápida de rutas alternativas en los momentos de mayor tráfico en la carretera, y la otra es la opción de fijar la distancia para proporcionar una ruta de desvío alternativa, la cual puede ser elegida por el usuario.

- Introducción del nombre de una calle o lugar de interés, el sistema tiene registrado todos los mapas actualizados de manera regular y por ello es capaz de encontrar cualquier calle, avenida o dirección en general, con sólo introducir el nombre de esta.

- Posibilidad de cambiar el orden de los puntos de ruta, el sistema de navegación es capaz de clasificar de manera automática el orden de los puntos de ruta por diferentes criterios, también da la posibilidad que el usuario pueda configurar manualmente los puntos de ruta, eligiendo el orden que desee.

- Guía de voz en tiempo real, el sistema permite la opción de activar una guía de voz la cual, va indicando al usuario la dirección que debe seguir por la carretera, además de avisarle con suficiente distancia de la proximidad de un giro que debe realizar y otros consejos o ayudas que puedan resultar de utilidad para el conductor durante la conducción. Esta ayuda es opcional y puede ser activada o desactivada por el usuario en cualquier momento.

- Zoom de las intersecciones, uno de los problemas que puede darse en la pantalla del dispositivo es, la dificultad de distinguir la ruta que queremos entre las posibles rutas de intersección al llegar a un giro. Para evitar o minimizar dicho problema, en el mapa se producirá automáticamente un zoom en esa intersección al aproximarse a ella, evitando además que el conductor tenga hacerlo de manera manual.

- Información de autopistas, el sistema ofrece al usuario diversa información de las autopistas para facilitar la circulación por ella, donde se visualiza de manera automática las distancias a la estación de servicio más próxima.

- Vista aérea en 3D, al viajar por primera vez a un lugar existe la posibilidad de visualizar la vista aérea en 3D, para que el usuario pueda tener una idea de las características del terreno que va a tener, para así poder planificar mejor la ruta.

- Giroscopio y sensor de velocidad son dos de los elementos más importantes para que el sistema funcione correctamente. El giroscopio es necesario para medir la orientación y en este caso la dirección del vehículo, y el sensor de velocidad para poder determinar la distancia del vehículo sobre los distintos lugares en la carretera. Ambos elementos,

posibilitan visualizar la posición y dirección del vehículo, hasta en las zonas donde menos cobertura puede tener la señal.

3.5 Perturbaciones en recepción de señales

En este apartado, se abordará uno de los problemas más comunes que se producen con los sistemas de navegación, que son las perturbaciones que sufren las señales. Durante el trayecto el vehículo puede llegar a recorrer diversos entornos, desde entornos abiertos en los cuales no habría problemas de perturbaciones en la recepción de las señales por ausencia de obstáculos o que en el caso de haberlas, serían mínimas. En cambio, en entornos más cerrados o parcialmente cerrados, se producen numerosas perturbaciones que en ocasiones pueden resultar críticas para el correcto funcionamiento del sistema de navegación.

Las perturbaciones se producen cuando el transmisor del satélite no llega a tener contacto “visual” con el receptor, que en este caso es el sistema de navegación. También, cuando la señal se refleja en diferentes elementos del entorno, como edificios u otras construcciones en zonas urbanas o montañas, en su mayoría, en zonas más rurales.

Las situaciones más comunes donde se producen dichas perturbaciones porque falle la radiocomunicación con los satélites son, entre otras, calles estrechas, túneles, valles, etc.

Todas estas perturbaciones producen que no se pueda determinar la posición exacta del vehículo.

La localización mediante satélites, es la principal fuente de información para los sistemas de navegación. Aun así, el sistema es capaz de compensar algunas de estas perturbaciones que se producen inevitablemente. La dirección y el sentido del vehículo se determinan gracias al ángulo de viraje de las ruedas y diferentes sensores. Durante el período de tiempo que se produce la perturbación en la recepción de las señales, se produce una disminución de la precisión en determinar la posición, y cuando se vuelven a recibir las señales de manera correcta, el sistema es capaz de corregir la posición que se había calculado hasta ese momento.

3.6 Descripción de los componentes

En el apartado que viene a continuación, se van a describir algunos de los componentes de navegación por satélite más importantes aplicados a los vehículos, así como una explicación sencilla para poder entender mejor cómo funcionan estos componentes.

En el capítulo anterior de este trabajo, se hizo una exposición de la historia de la navegación en la automoción y ahora lo que se va a hacer, es una descripción de los componentes más importantes de la navegación aplicada en este campo.

En el año 1994, el Audi A8 fue el primer vehículo que disponía de un sistema completo de navegación, que ya implementaba una tecnología similar a la actual, aunque menos desarrollada evidentemente, y que contaba con muchas de las funcionalidades que

ofrecen los sistemas en la actualidad. Como ya se habló en el capítulo anterior, los primeros sistemas fueron manuales y sobre papel, hasta que poco a poco la tecnología fue desarrollándose y permitiendo nuevos sistemas electrónicos mucho más eficientes. Pero podemos decir, que el sistema que presentaba este vehículo en el año 1994, fue el precursor de los sistemas de navegación tal y como los conocemos hoy en día, y fue la línea a seguir para todas las marcas y futuros modelos del mercado.

La visualización de las indicaciones y ayudas para la conducción ya estaban disponibles en este modelo de manera muy similar a como pueden ser las que disponen los vehículos actuales. Dichas ayudas, se muestran a través de un display matricial de puntos en la pantalla, donde se visualizan los diferentes elementos y configuraciones del sistema. Además, disponía de un altavoz para ofrecer conducción asistida, de manera independiente. Posteriormente, en el año 1997, este sistema fue implementado en el Volkswagen Passat. La unidad de control de navegación, con unidad CD-ROM, se colocaba en el maletero de dichos vehículos.

Dos años más tarde, en el año 1999, de nuevo Volkswagen incorpora en sus modelos de Golf y Passat el sistema de radionavegación. También, la marca alemana Audi incorpora un sistema de navegación, llamado Audi Plus, en los modelos A4, A6 y A8 [6].

En la Figura 3.3 se muestra la evolución de los visualizadores en los vehículos de Mercedes-Benz desde el año 1975 hasta el año 2016. Se observa que cada vez son de mayores dimensiones y cuentan con un mayor número de menús implementados, acorde al desarrollo de la tecnología a lo largo de esos años.

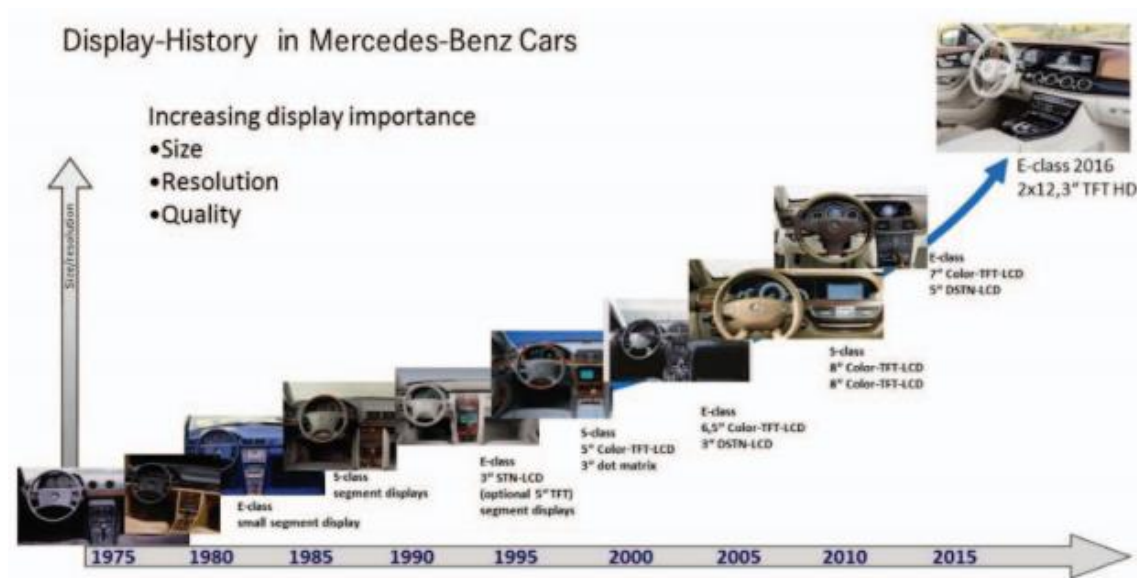


FIGURA 3.3 Historia de los displays en los vehículos de Mercedes-Benz. Fuente [7].

Entre los elementos más importantes destacan el sensor del ángulo de viraje, el cual está colocado en la carcasa del sistema de navegación, y es el encargado de determinar y registrar los cambios de dirección a izquierda y derecha.

Entre las ventajas que tiene, es que es inmune a interferencias magnéticas parásitas, además de que tiene unas dimensiones compactas, gran precisión y no necesita calibración.

El sensor del ángulo de viraje registra los giros que realiza el vehículo, cuando cambia su dirección a lo largo del trayecto, girando en torno a su eje geométrico vertical. Dicho giro se comunica a la unidad de control de navegación, la cual es la encargada de calcular el ángulo del cambio de dirección del vehículo.

La manera en la que se distingue entre la marcha adelante y la marcha atrás es mediante un conmutador, el cual manda una señal a la unidad de control cuando las luces de marcha atrás son encendidas.

Para poder calcular el radio de las curvas recorridas es necesario conocer, como es lógico, el trayecto que ha efectuado el vehículo, y este queda registrado con las señales que transmite el sensor de régimen del ABS.

A continuación, se va a explicar el funcionamiento del sensor del ángulo de viraje.

El sensor del ángulo de viraje es similar en la forma, a un diapasón. Posee dos partes alargadas y separadas, como dos patas, que están diseñadas para funcionar como cuerpos oscilantes. Al arrancar el vehículo, el sensor se activa y aplica tensión en los elementos piezoeléctricos inferiores, los cuales convierten esa electricidad en vibraciones mecánicas y comienzan a oscilar, transmitiendo las oscilaciones a ambas patas.

Cuando el vehículo cambia de dirección en una curva, se produce la fuerza de Coriolis sobre la pata oscilante del sensor. Dicha fuerza, se genera en contra del sentido de giro en que se produce el trayecto del vehículo en torno a su eje geométrico vertical, haciendo que en los elementos superiores de las patas, se produzca un efecto de torsión añadido a la oscilación que ya tenían.

La torsión producida en las patas, se transmite a los elementos superiores piezoeléctricos, en los cuales se genera una tensión, y el nivel de esta tensión es el que utiliza la unidad de control de navegación para determinar el ángulo de viraje.

Cuando el vehículo recorre una curva, los elementos superiores de las patas sufren la fuerza Coriolis a lo largo de toda la curva. En los elementos piezoeléctricos se genera una tensión, donde cuanto más pronunciada sea la curva, más nivel de tensión se genera, y el signo de la tensión cambia al realizar un giro a derechas o a izquierdas. En la Figura 3.4 se muestra el funcionamiento del sensor del ángulo de viraje sobre los elementos piezoeléctricos superiores con las acciones que se producen.

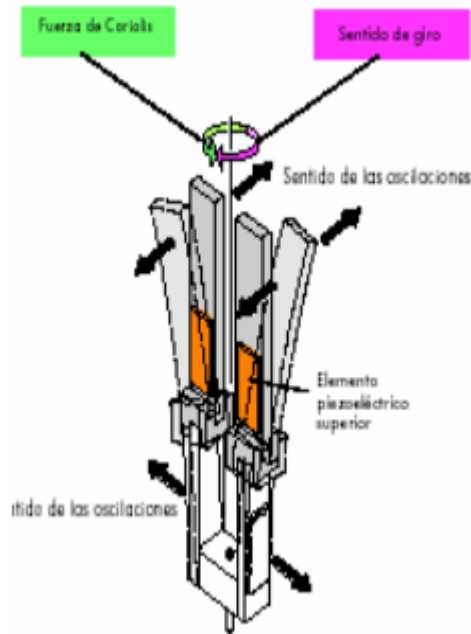


FIGURA 3.4 Funcionamiento del sensor del ángulo de viraje sobre los elementos piezoeléctricos superiores. Fuente [6].

En una recta, no se produce ninguna fuerza de Coriolis, por lo tanto los elementos superiores de las patas no sufren ninguna tensión ni tampoco se genera ninguna tensión en los elementos piezoeléctricos.

El sensor del ángulo de viraje, registra el ángulo de cambio de dirección que realiza el vehículo. Para que el sensor pueda determinar de manera correcta el ángulo, el vehículo debe completar el giro. La unidad de control de navegación únicamente puede determinar en ese caso, el radio de la curva dibujada por el vehículo, tomando los datos que le proporciona el sensor del ángulo de viraje y el sensor de régimen del ABS.

La unidad de control de navegación recibe información de la unidad de control de ABS, a la que llegan impulsos que emiten uno de los sensores de régimen del ABS, que se encuentran en el eje trasero del vehículo, y que permiten determinar el recorrido que ha realizado. En caso de que la señal no se reciba correctamente, no sería posible que se ponga en funcionamiento la navegación. El sistema es capaz de realizar un autodiagnóstico, el cual comprueba de manera automática si la conexión de la unidad de control de navegación con la de ABS es correcta o si se ha producido algún fallo.

Para que la unidad de control de navegación, pueda distinguir cuando el vehículo se desplaza hacia delante o marcha atrás, se utiliza el conmutador de luces de marcha atrás. Cuando está engranada la marcha atrás, el conmutador de luces de este envía una señal a la unidad de control, y así es capaz de distinguir el sentido de la marcha. En el caso en el que la señal no se envíe correctamente a la unidad de control, no podría detectar que el vehículo circula marcha atrás y el sistema avisaría al conductor, indicándolo como una avería con el testigo correspondiente.

Un elemento fundamental es la antena para radio, navegación y teléfono. Es una antena que se coloca sobre el techo del vehículo, y en ella están agrupadas las tres antenas para las funciones antes mencionadas. En algunos modelos de Audi, la configuración de las

antenas se dispone de manera individual, la antena para navegación sobre el capó del maletero, la de radio en la luna trasera y por último para el teléfono, la antena de varilla encima del vehículo sobre la aleta. La manera de detectar un fallo, es percibiendo demasiadas interrupciones a la hora de escuchar la radio por ejemplo, y a veces es porque simplemente se ha desplazado debido a algún golpe de viento al no estar bien enroscada.

Los avisos sonoros en la conducción son comunicados mediante los altavoces de la radio.

En los primeros vehículos con sistema de navegación disponible, los mapas y el software del sistema operativo estaba grabado en el CD-ROM de navegación, y estos se actualizaban dos veces al año pudiendo ser obtenidos en los concesionarios de las marcas correspondientes. Además con un CD-ROM especial, se podían añadir más funcionalidades como menús guiados, más contenidos de la pantalla o mejores detalles gráficos en la visualización del mapa [6].

Uno de los sistemas de navegación por satélite más populares e importantes es el sistema GPS, pero existen otros igual de relevantes y que es fundamental conocerlos, los cuales se abordarán en el siguiente capítulo. Entre ellos, resalta un sistema europeo de gran potencial en la actualidad y con una gran capacidad de desarrollo en el futuro, que sirve como soporte para algunas aplicaciones para automoción muy útiles como es el sistema eCall, el cual se explicará en un capítulo posterior.

4 Sistemas de navegación por satélite

4.1 Introducción

Como se ha comentado en anteriores capítulos, el sistema de navegación por satélite más común y usado es el GPS que fue desarrollado por el Departamento de Defensa de Estados Unidos, pero existen otros sistemas más actuales de los que aún no se ha hablado y tras haber hecho hincapié en el sistema GPS, es momento de hablar de otros sistemas que quizás son menos comunes pero igualmente válidos. Entre los sistemas GNSS más importantes aparece un sistema europeo como es Galileo, aunque es importante destacar que existen otros como el sistema QZSS japonés y otros sistemas que están siendo desarrollados por otras potencias mundiales como China, como en el caso del sistema BeiDou. Pero nos centraremos en Galileo que es el que más nos afecta.

Pero, ¿por qué Galileo? Principalmente mejora de manera significativa la precisión con respecto a GPS, además que igual que GPS inicialmente fue creado para un uso militar, Galileo está concebido para un uso principalmente civil y cuenta con características importantes aplicables a la automoción. Además de mejorar la precisión, cuenta con una mayor disponibilidad para los usuarios permitiendo ofrecer de manera continua la localización de vehículos. Galileo ayudará a mejorar la seguridad y eficiencia en el transporte ferroviario, marítimo, aéreo y por carretera. Ofrecerá nuevos servicios para las personas o bienes en movimiento, por ejemplo el control del transporte de pasajeros en los autocares o de las mercancías peligrosas, la información en tiempo real sobre las condiciones de transporte y la ayuda al conductor [8].

4.2 Programas europeos de navegación por satélite Galileo y EGNOS

Los sistemas Galileo y EGNOS son sistemas de navegación por satélite desarrollados principalmente por la ESA (*European Space Agency*). Galileo está formado por treinta satélites geoestacionarios que otorgarán cobertura total en cualquier punto de la Tierra. Debido a la disposición de sus satélites se obtendrá una cobertura y precisión más alta que los sistemas más antiguos como el GPS [9], que cuenta con veinticuatro satélites operativos que transmiten señales unidireccionales que proporcionan la posición y la hora de cada satélite GPS. Galileo seguirá siendo compatible con GPS y también con el sistema GLONASS ruso, no siendo este considerado como un sistema europeo. En las Figuras 4.1 y 4.2, se muestran las constelaciones de los satélites GPS y Galileo respectivamente.

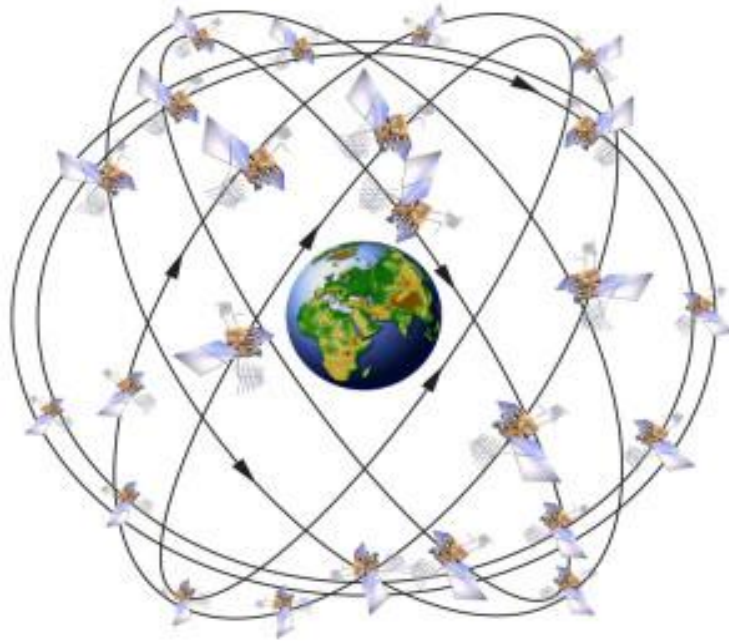


FIGURA 4.1 Constelación de satélites GPS. Fuente [10].

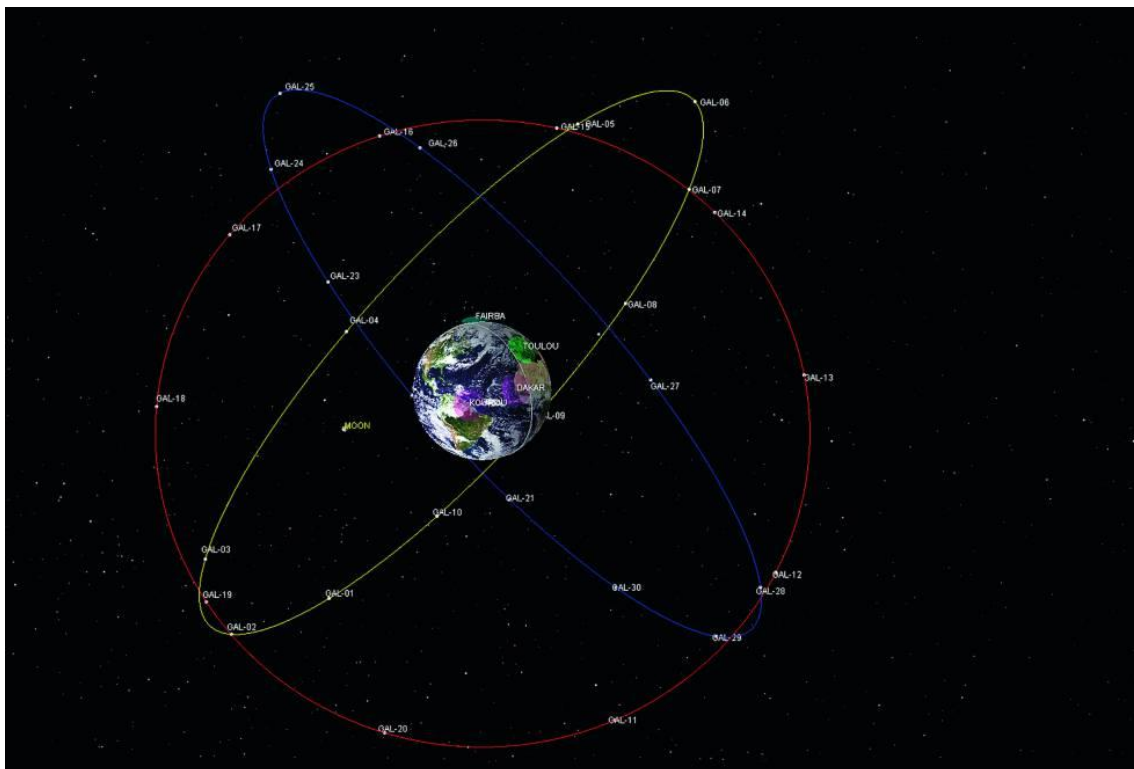


FIGURA 4.2 Constelación de satélites Galileo. Fuente [11].

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*) está formado por tres satélites geostacionarios y está pensado como apoyo para los sistemas GPS y GLONASS, proporcionando mayor precisión y seguridad en las señales. El segmento espacial de EGNOS está formado por tres satélites geostacionarios con cobertura global terrestre (Artemis, Inmarsat 3F2 e Inmarsat 4F2), además de una red de cuarenta estaciones terrestres de posicionamiento interconectadas, y cuatro centros de control que abarcan casi la totalidad de la Unión Europea [12]. En la Figura 4.3, se puede ver el

mapa de cobertura de la constelación de satélites, donde AOR e IOR son los satélites Inmarsat 3F2 e Inmarsat 4F2 respectivamente.

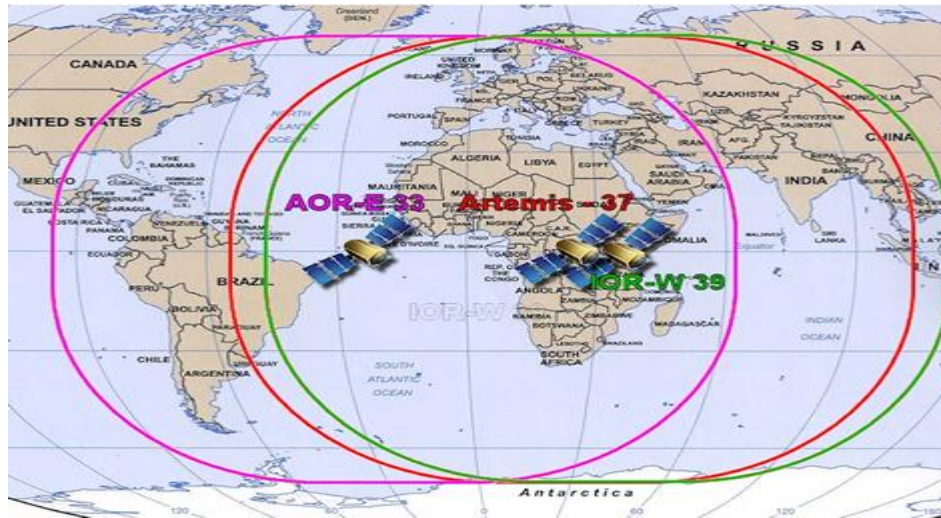


FIGURA 4.3 Mapa de cobertura de la constelación de satélites de EGNOS. Fuente [13].

Se describirá de forma breve la constelación GLONASS ya que ha sido mencionada anteriormente.

Lo primero que hay que resaltar es que GLONASS es un sistema de navegación por satélite desarrollado por la Unión Soviética, así que estrictamente no es europeo. Está formado por treinta y un satélites separados en grupos en diferentes planos. De ellos veinticuatro están en activo en tres planos inclinados a 64.8° , siendo órbitas a mayor altura que las de GPS permitiendo una mejor visión de los polos terrestres. Además, cuenta con otros tres de repuesto, dos en mantenimiento, uno en servicio y otro en pruebas [14]. En la Figura 4.4, se muestra la constelación de satélites.

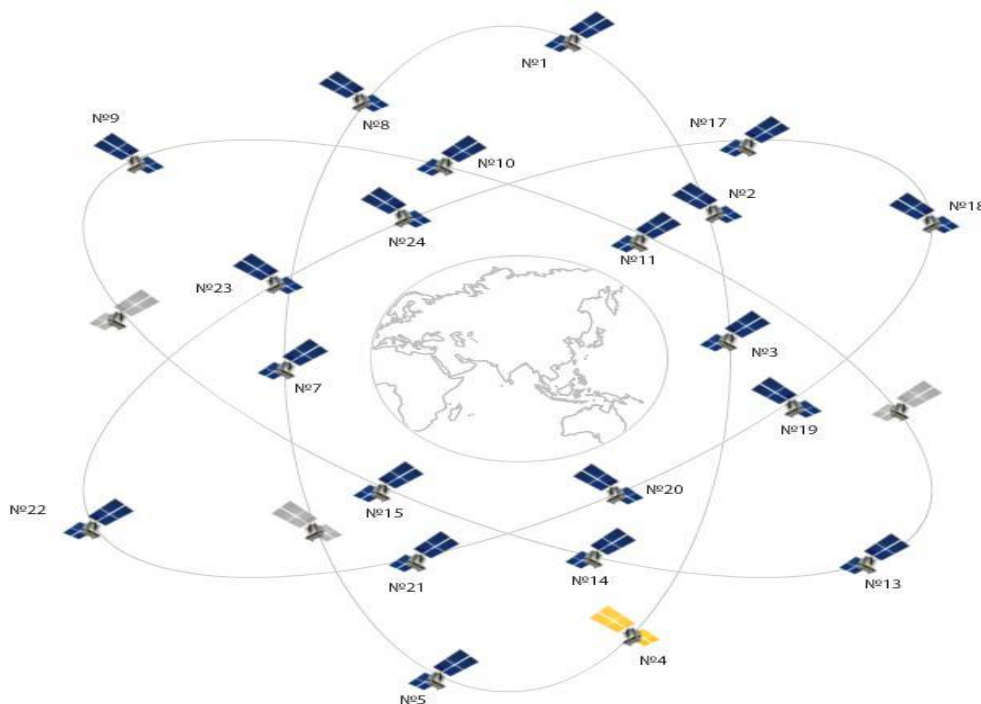


FIGURA 4.4 Constelación de satélites de GLONASS. Fuente [15].

4.3 Frecuencias de operación

En los sistemas de posicionamiento global, las portadoras operan en la banda L (1-2 GHz), aquí se incluyen distintas bandas y constelaciones satelitales. A día de hoy, las constelaciones más importantes que cuentan con mayor número de satélites son: GPS, GLONASS y Galileo.

La constelación de satélites de GPS trabaja en la banda L1, siendo la banda más utilizada para todas las aplicaciones de posicionamiento. En la Figura 4.5, se muestran las distintas bandas de frecuencia para los sistemas GNSS más importantes, donde se puede ver que algunas de las bandas son compartidas por varios sistemas. Con el paso del tiempo, se han creado receptores más modernos como los multifrecuencia y multiconstelación, los cuales son capaces de trabajar en distintas bandas y aumentar la calidad de precisión de los receptores. Todo ello hace que existan muchos tipos de antenas GNSS en el mercado, por lo que se dispone de una gran variedad en función de los requisitos que necesitemos [16].

Las bandas de frecuencia para los sistemas GNSS mencionados, son:

GPS: L1 (1563-1587 MHz), L2 (1215-1239.6 MHz) y L5 (1164-1189 MHz).

La banda L1 se utiliza para aplicaciones militares, sistemas espaciales mediante los receptores de sistema de posicionamiento preciso PPS (*Precise Positioning System*) y comerciales a través de servicios de posicionamiento normal SPS (*Standard Positioning Service*). La banda L2 para uso comercial con una mayor precisión y sistemas militares con PPS. Por último, L5 se emplea para uso civil, navegación aeronáutica y seguridad en sistemas de navegación [17].

GLONASS: G1 (1593-1610 MHz), G2 (1237-1254 MHz) y G3 (1189-1214 MHz).

Las bandas G1 y G2 son utilizadas para uso civil a través de SPS y para uso militar mediante PPS, mientras que G3 tiene un uso mixto teniendo interoperabilidad con la banda E5 de Galileo [17].

Galileo: E1 (1559-1591 MHz), E5a (1164-1189 MHz), E5b (1189-1214 MHz) y E6 (1260-1300 MHz).

La banda E1 es utilizada para servicios de radionavegación aeronáutica ARNS (*Aeronautical Radio Navigation Services*). La banda E5 para servicios ARNS, siendo complementario a GPS. Finalmente, E6 se emplea para uso tanto civil como militar, con servicios de radionavegación por satélite RNSS (*Radio Navigation Satellite Services*) [17].

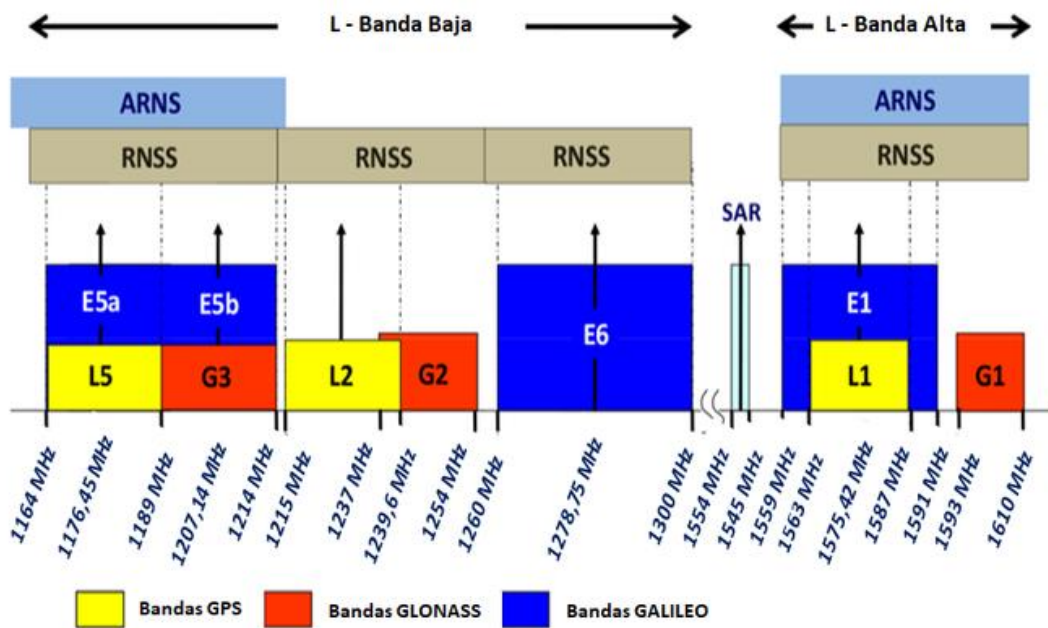


FIGURA 4.5 Bandas de frecuencia para los sistemas GPS, GLONASS y Galileo. Fuente [16].

No vamos a entretenernos en describir de manera detallada los diferentes sistemas, sino su aportación y aprovechamiento en el mundo de la automoción.

El sistema Galileo es más moderno y cuenta con una tecnología más avanzada que el sistema GPS, por lo tanto, posee mayor potencial en el campo que nos interesa. A día de hoy se dispone de un servicio de posicionamiento fiable en el 50% de las ciudades más importantes del mundo pero, debido a la configuración de las carreteras y edificios en las zonas urbanas de mayor densidad de población, los edificios predominantemente altos dificultan la recepción de las señales por satélite. No se puede cambiar la estructura ni las edificaciones en estas ciudades, así que sólo queda mejorar la tecnología de la navegación por satélite teniendo en cuenta estos inconvenientes. Con el sistema Galileo, el servicio puede llegar a mejorar hasta aproximadamente el 90% o 95%, ya que las señales son más robustas ante las interferencias y a los diversos errores debido a reflexiones de señal que se producen por la gran cantidad de edificios.

El sistema EGNOS, como comentamos anteriormente, fue desarrollado con la intención de aumentar la fiabilidad y la precisión sirviendo como apoyo a otros sistemas de navegación por satélite como GPS y GLONASS. EGNOS ayuda a que los servicios que aportan dichos sistemas puedan emplearse en numerosas aplicaciones útiles en el mundo de la automoción y otros ámbitos relacionados. Por ejemplo, en aviación con el control de aterrizaje de los aviones y del tráfico aéreo se permite optimizar la disponibilidad de las pistas y aumentar la eficiencia en el uso de combustible de los aviones. También, en travesías marítimas con barcos que cruzan distintas zonas con dificultad de visibilidad [8].

En este capítulo se han expuesto algunos de los principales sistemas de navegación por satélite más importantes, donde se han mostrado los mapas de cobertura, constelaciones, bandas de frecuencia en las que operan y el impacto que tienen en el campo de la

automoción. Ahora, el siguiente paso es conocer cómo se establece la comunicación, posición e intercambia la información entre los satélites y los sistemas terrestres. El elemento que hace posible esto, es la antena. Por ello, se va a dedicar un capítulo que aborde este tema.

5 Antenas en los sistemas de navegación por satélite

5.1 Introducción

Vivimos en un mundo rodeado de tecnología, en prácticamente cualquier dispositivo electrónico nos encontramos con uno o numerosos tipos de antenas. Los sistemas GNSS, junto con los sistemas de comunicación terrestres tales como la telefonía móvil, se complementan de manera que son de gran ayuda en múltiples aplicaciones como la llamada de emergencia en vehículos, ayudas en la conducción y otros aspectos.

Para que se produzca esta cohesión entre ambos sistemas, y que exista un servicio de posicionamiento y una comunicación entre ellos, es necesario el uso y la implementación de antenas junto con su receptor.

Cualquier antena que actúa como transmisor necesita un receptor que sea capaz de recibir e interpretar la información. Para que al receptor le llegue la información de manera correcta es necesario que la antena emita a una frecuencia determinada.

En el capítulo que se presenta a continuación, se va a hacer hincapié en estos elementos fundamentales e indispensables en cualquier tipo de sistema de navegación por satélite, como son las antenas. Se explicarán de manera breve los parámetros más importantes, para posteriormente exponer algunos ejemplos de diseño de antenas GNSS para aplicaciones vehiculares, donde se podrá demostrar la eficacia y las prestaciones de los distintos tipos de antenas llevadas a la práctica.

5.2 Polarización

Los sistemas de comunicación terrestres más populares como los de radio, telefonía y televisión emplean transmisores con polarización de tipo lineal mientras que los sistemas GNSS utilizan polarización circular en sentido a derechas RHCP (*Right Hand Circular Polarization*). Con este tipo de polarización se consigue evitar el problema de la rotación variable que se produce cuando las señales atraviesan la ionosfera. En el caso de que la polarización fuese lineal, las señales llegarían a los receptores con una polarización rotada respecto a la que se transmitió, con un valor impredecible y dependiendo de la inclinación del trayecto entre el satélite y el receptor, además del nivel de ionización de las capas de aire que forman el camino [16].

En las especificaciones de una antena GNSS, nos encontramos con un valor que mide la calidad de la polarización circular de la antena, el AR (*Axial Ratio*).

La ecuación con la que se calcula este valor es la que se indica en la Figura 5.1, donde:

RHCP: Polarización circular en sentido a derechas (*Right Hand Circular Polarization*)

LHCP: Polarización circular en sentido a izquierdas (*Left Hand Circular Polarization*)

$$RHCP = \frac{(E_{th} + iE_{ph})}{\sqrt{2}} \quad LHCP = \frac{(E_{th} - iE_{ph})}{\sqrt{2}}$$

$$AR = \frac{|LHCP| - |RHCP|}{|LHCP| + |RHCP|}$$

Eth : Componente Vertical

Eph : Componente Horizontal

FIGURA 5.1 Ecuación para el cálculo del AR. Fuente [16].

De la ecuación anterior se deduce que cuanto mayor sea el valor del AR, menor será la calidad de polarización circular radiada por la antena. Por lo tanto, con polarización lineal, el valor de AR será infinito.

5.3 Tipos de antenas GNSS

En la actualidad existen multitud de tipos de antenas que se usan para aplicaciones GNSS, dependiendo de las diferentes bandas de frecuencia en las que operan y la tecnología que soportan. Teniendo en cuenta estos aspectos, englobamos las antenas en tres grupos: antenas tipo parche, tipo hélice y tipo chip o lineales. También hay que destacar la antena más sencilla que es la antena dipolo, que simplemente se compone de un hilo conductor, generalmente de cobre, de media longitud de onda de la frecuencia de trabajo, cortado por la mitad y colocando en el centro del mismo un generador o línea de transmisión.

Como en muchos dispositivos tecnológicos, la mejor antena será aquella que guarde un equilibrio entre prestaciones y dimensiones.

De forma general, la antena tipo hélice consigue prestaciones parecidas a la de tipo parche en lo que a ganancia y AR se refiere, pero dispone de un mayor ancho de banda y ancho de haz en el diagrama de radiación. Otra ventaja que tiene, es que no depende de las dimensiones del plano de masa sobre la que se encuentra. Además, son antenas que ofrecen una gran exactitud en el posicionamiento y ofrecen buena calidad de la señal recibida. En cambio, las dimensiones son mayores que las de tipo parche, con un mayor coste en el proceso de fabricación [16].

5.4 Selección de antenas

La antena ideal o perfecta no existe, depende de las necesidades del consumidor la elección de una u otra, teniendo en cuenta que las prestaciones pueden ser muy diferentes. Hay varios factores que son determinantes, tales como la ganancia, el AR, ancho de banda, etc. Como siempre se ha comentado a lo largo del trabajo, la precisión del sistema es muchas veces el mayor problema que nos podemos encontrar y el más difícil de solucionar. También hay que tener en cuenta las dimensiones de la antena tratando de optimizar y buscar un equilibrio, sin mermar el rendimiento. Se puede decir que la elección es un compromiso entre las prestaciones, dimensiones y por supuesto el coste.

En la Tabla 5.1 se muestran a modo de resumen los tipos de antenas descritos, teniendo en cuenta sus ventajas e inconvenientes.

Antenas Hélice		Antenas Parche		Antenas Chip / Lineales	
Ventajas	Inconvenientes	Ventajas	Inconvenientes	Ventajas	Inconvenientes
Alta Ganancia y bajo AR	Mayor dimensiones y volumen de antena	Alta Ganancia y bajo AR	Antena de banda estrecha y menor Ancho de haz	Bajo coste	Antenas de polarización lineal
Mayor Ancho de Haz del lóbulo principal	Mayor coste de fabricación	Bajo coste	Alta dependencia con las dimensiones del plano de masa de instalación	Dimensiones reducidas	Menor ganancia y diagrama no directivo
Menor dependencia con la orientación de la antena	Necesidad de un circuito adicional de polarización	Antena de bajo perfil y fácil instalación			Alta dependencia con las dimensiones del plano de masa de instalación
Menor dependencia con las dimensiones del plano de masa de instalación					Huella de instalación en el circuito impreso y posición en el plano de masa afectan al rendimiento de la antena

TABLA 5.1 Tipos de antenas con sus ventajas e inconvenientes. Fuente [16].

Se ha explicado brevemente algunos de los fundamentos teóricos más importantes de las antenas sin entrar en profundidad ya que el trabajo no concierne directamente sobre ello pero, sí es bueno recordar algunos fundamentos que luego aparecerán en sucesivos apartados. El lector interesado puede encontrar con un mayor detalle los parámetros más importantes de las antenas en el documento [16]. Tras este breve repaso, ahora se van a exponer algunos ejemplos de diseños de antenas GNSS para aplicaciones vehiculares.

5.5 Diseño de una antena GNSS compacta para aplicaciones vehiculares

En este apartado, se describe un estudio sobre dos antenas dipolo cruzado para operaciones GNSS en vehículos. Al final, se presentan otros estudios interesantes de ampliación al tema para el lector interesado. Para este estudio contamos con dos antenas. La primera de las antenas es una antena dipolo cruzado de banda ancha a partir

de dos dipolos ortogonales, y con un desplazamiento de fase de noventa grados entre ellos para producir polarización circular. La otra antena para doble banda se utiliza con una longitud de la varilla asimétrica para generar polarización circular en ambas bandas. Posteriormente, ambas antenas son simuladas sobre un plano de tierra metálico a un metro para poder apreciar su rendimiento al ser colocadas en el techo del vehículo.

Los principales sistemas GNSS utilizados son GPS, GLONASS, Galileo y el sistema chino de navegación BeiDou. Estos cuatro sistemas operan en diferentes bandas de frecuencia. BeiDou comparte banda con Galileo y GPS tal y como se muestra en la Figura 5.2, las demás bandas vienen detalladas en el capítulo 4 junto con la Figura 4.5.

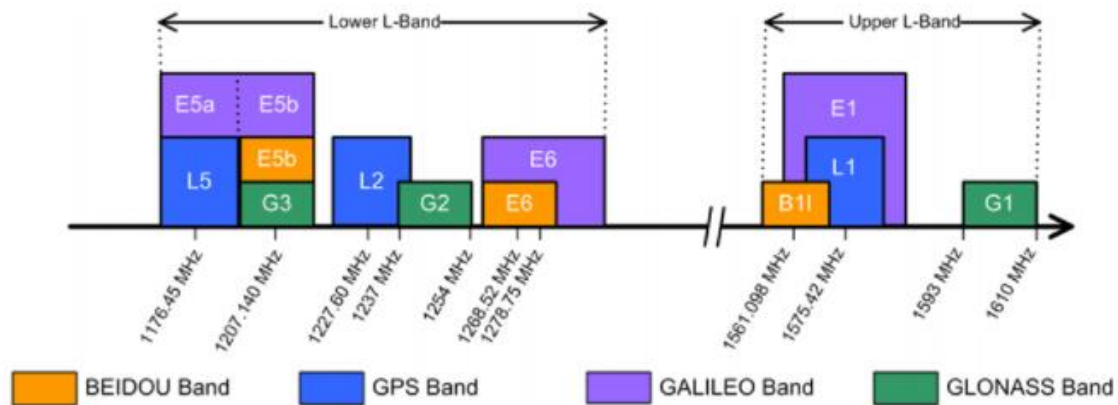


FIGURA 5.2 Bandas de frecuencia para los sistemas BeiDou, Galileo, GLONASS y GPS. Fuente [18].

Precisamente el que todos los sistemas en mayor o menor medida compartan bandas de frecuencia supone una gran ventaja, haciendo posible que los diferentes dispositivos de navegación por satélite comerciales puedan integrar estos sistemas en un mismo dispositivo obteniendo las ventajas que ofrecen cada uno de ellos. Los sistemas GNSS operan en dos grandes bandas diferentes conocidas como la banda L baja y banda L alta tal como se puede ver en la Figura 5.2. Esto complica el diseño de antenas GNSS de tamaño compacto, que es fundamental para dispositivos de mano y los utilizados en vehículos.

Las antenas tipo parche son las más utilizadas a la hora de diseñar antenas GNSS, pero estas tienen un ancho de banda estrecho, motivo por el cual, se propusieron antenas de tipo parche apiladas. Esto solucionó en gran medida los requerimientos necesarios de ancho de banda, pero eran de gran tamaño y suponían una gran complejidad de fabricación de la antena. Se probaron antenas tipo parche circulares, las cuales eran capaces de generar polarización circular, también cumplían los requisitos de ancho de banda y la relación axial en 3dB de ancho de banda, pero seguían teniendo el problema del tamaño. Por todo ello, se pasó a probar la antena tipo parche rectangular convencional, que de nuevo cumplía con el ancho de banda requerido pero el tamaño era demasiado grande.

Las antenas con polarización lineal también pueden ser utilizadas para diseñar antenas GNSS como dipolos, aunque no es lo más común. La polarización circular es otra opción, que se puede lograr utilizando dos dipolos de longitudes diferentes y con un desplazamiento de noventa grados entre ambos. Con los dos tipos de polarización se

cumplió el requisito de ancho de banda, pero no la relación axial en 3dB de ancho de banda.

Otra alternativa fue el uso del dipolo elíptico, el cuál cumplía ambos requisitos, pero con un rendimiento algo bajo. También se probaron antenas en forma circular o anillo disminuyendo en parte el problema del tamaño de las antenas previas, pero aún siguen teniendo un tamaño elevado para los requerimientos necesarios.

Como se ha descrito, el mayor obstáculo en el diseño de antenas GNSS para las distintas aplicaciones es la limitación de tamaño. La mayoría de las antenas cumplían los requisitos de ancho de banda y con polarización circular a derechas a lo largo de toda la banda de GNSS, pero ninguna era capaz de conseguir un tamaño óptimo para poder ser utilizada en un vehículo.

El objetivo que se persigue, es diseñar una antena GNSS compacta para vehículos. La antena debe tener un gran ancho de banda a la vez que un tamaño reducido. La topología de dos dipolos cruzados es la opción elegida en vez de la tipo parche rectangular para el uso de GPS en los vehículos, además de su capacidad de poder compactar su tamaño debido a su estructura. Esta topología fue introducida por primera vez en el año 1961 por Bolster para producir polarización circular mediante el uso de la combinación de dos dipolos de distinta longitud, ortogonales entre sí, y polarizados de manera lineal. Bolster demostró que era posible conseguir polarización circular a partir de dos dipolos ortogonales que tienen admitancias de entrada con idéntica parte real y desplazamiento de fase de noventa grados.

Al elegir la topología de dos dipolos cruzados, se estudian dos antenas dipolos cruzadas. Una será la antena dipolar cruzada de banda ancha y la otra, la antena dipolar cruzada de banda dual. Se va a explicar su estudio por separado. Cabe destacar que se emplean antenas MLA (*Meander Line Antenna*), con una estructura serpenteante para ocupar un menor tamaño.

5.5.1 Estudio con antena dipolar cruzada de banda ancha

En la Figura 5.3 se muestra la configuración de la antena de banda ancha con los diferentes anchos y longitudes de las tiras que la componen. En color azul oscuro se observa la vista superior y en azul claro la inferior. Cada dipolo se compone de dos brazos con tiras metálicas grabadas a ambos lados del sustrato Rogers RO4350 del dipolo para facilitar la resonancia de la antena. Cada dipolo se compone de dos brazos de un cuarto de longitud de onda para construir el dipolo de media longitud de onda estándar, y ambos brazos se colocan en lados opuestos del sustrato en las tiras metálicas. Los dos dipolos de media longitud de onda comparten una tira de metal cuadrada alimentada en el centro del sustrato. En la Tabla 5.2 se muestran los parámetros detallados tanto de anchura como de longitud de las partes de la antena, con unas dimensiones del sustrato de $50 \times 50 \times 0.8 \text{ mm}^3$.

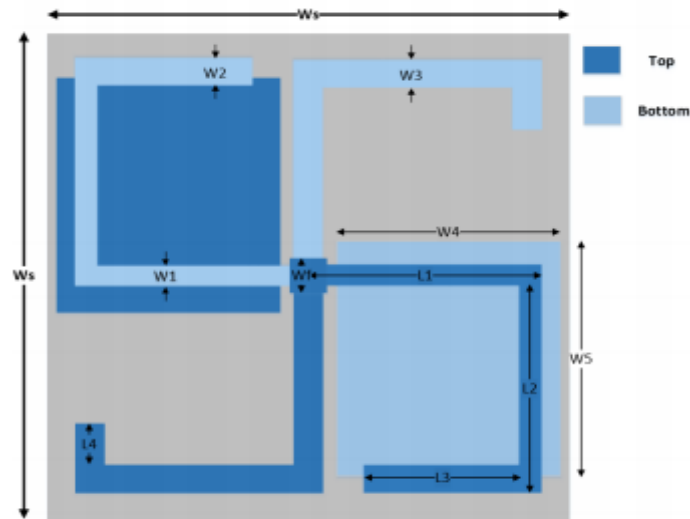


FIGURA 5.3 Estructura de la antena dipolar cruzada de banda ancha. Fuente [19].

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
Ws	50	W2	4
L1	24	W3	4
L2	22	W4	20
L3	17	W5	25
L4	9.5	Wf	4
W1	3		

TABLA 5.2 Parámetros de la antena dipolar cruzada de banda ancha. Fuente [19].

En el estudio hay mucha información detallada sobre los diferentes parámetros y elementos tales como impedancias, coeficientes, etc., así como las fórmulas de los que se obtienen estos valores que no concierne explicar directamente en este trabajo. En la bibliografía se podrá acceder al estudio para que el lector interesado pueda ver con detalle lo dicho anteriormente. Lo que se trata de mostrar es, cómo utilizando diferentes antenas conseguimos diseñar una antena GNSS compacta para vehículos. Se va a proseguir con el estudio teniendo en cuenta que no se va a entrar en profundidad en los propios parámetros, sino en cómo se llega a obtener la antena deseada y su utilidad en vehículos.

Siguiendo con el estudio, el dipolo largo resuena a 1320 MHz con una impedancia previamente calculada, mientras que el dipolo corto resuena a 1500 MHz con otra impedancia de también un valor previamente calculado. Cada dipolo se simula de manera individual, obteniendo los valores de las impedancias y los coeficientes de reflexión. Se observa que la fase del coeficiente de reflexión del dipolo largo es de 110.98°, mientras que el del dipolo corto tiene una fase de 214.23°. Esto se traduce en que la diferencia de fase de ambos dipolos es de 103.25°, un valor muy cercano a los 90° de desplazamiento de fase que se busca para que se produzca polarización circular, teniendo en cuenta que la diferencia de fase puede variar ligeramente cuando ambos dipolos son simulados.

5.5.2 Estudio con antena dipolar cruzada de banda dual

Tal y como se muestra en la Figura 5.4, la antena de banda dual propuesta consiste en dos dipolos ortogonales asimétricos formados por cuatro brazos de distinta longitud.

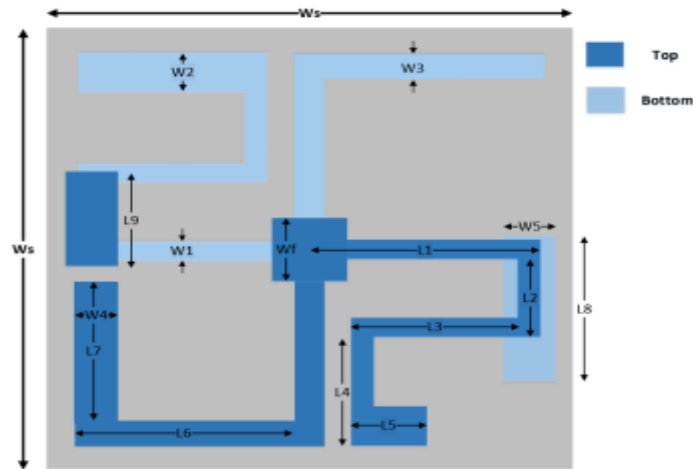


FIGURA 5.4 Estructura de la antena dipolar cruzada de banda dual. Fuente [19].

Se propone una antena dipolar cruzada asimétrica de doble frecuencia y polarización circular en sentido opuesto para operaciones GPS y SDARS (*Satellite Digital Audio Radio Service*). Cabe mencionar que el servicio SDARS está presente en la Región del Atlántico Norte en las frecuencias entre 2.32 GHz y 2.345 GHz [20]. Siguiendo la misma metodología para diseñar un dipolo cruzado de doble banda para GNSS, los cuatro brazos deben tener diferente longitud y anchos de las tiras, como se muestra en la Tabla 5.3. La antena se diseña sobre un sustrato Rogers RO4350 de dimensiones $47 \times 47 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Dicha antena resuena a tres frecuencias distintas, en 1200 MHz, 1230 MHz y 1590 MHz.

Parameter	Value (mm)	Parameter	Value (mm)
Ws	47	L8	19
L1	22	L9	12
L2	10	W1	3
L3	18	W2	5
L4	10	W3	4
L5	8	W4	5
L6	19	W5	5
L7	18	Wf	7

TABLA 5.3 Parámetros de la antena dipolar cruzada de banda dual. Fuente [19].

Ahora se van a mostrar los resultados de las simulaciones para ambas antenas.

5.5.3 Simulación con antena dipolar cruzada de banda ancha

Con los parámetros optimizados que han sido mostrados en la Tabla 5.2, se obtiene la resonancia de la antena de banda ancha de la Figura 5.5. En esta figura, se puede observar que la antena resuena en la banda desde los 1281 MHz hasta los 1600 MHz (Para un valor de S11 de -10dB), lo que significa un ancho de banda de 319 MHz. El

parámetro S11 es el coeficiente de reflexión que se mide en el puerto de entrada, lo cual significa la potencia que se refleja en relación con la potencia que se está aplicando en dicho puerto. Siendo inferior al ancho de banda de frecuencias requerido para GNSS de 470 MHz, desde los 1146 MHz hasta los 1616 MHz.

En la Figura 5.6 se muestra la relación axial simulada, lo que da un valor mínimo de 4,3dB no siendo una antena válida para lograr polarización circular y esto ocurre debido a que el ancho de banda de esta antena como los dipolos, deben estar en resonancias cercanas para que se produzca polarización circular. Recordemos que en dicha antena, el dipolo largo resuena a 1320 MHz mientras que el dipolo corto resuena a 1500 MHz, y en la simulación la antena resonaba en la banda desde los 1281 MHz hasta los 1600 MHz. Para realizar la prueba, en la Figura 5.7 se cambian algunas longitudes del dipolo tratando que la banda superior esté más cerca de la inferior. Se consigue un ancho de banda de 160 MHz (para un valor de S11 de -10dB), disminuyendo a la mitad de la que se tenía anteriormente, pero mejorando la relación axial en 3dB en 30 MHz tal y como se muestra en la Figura 5.8. Estos resultados denotan algunos aspectos interesantes sobre esta antena, teniendo una buena capacidad para conseguir un ancho de banda en frecuencia lo suficientemente grande con un tamaño compacto, pero con un ancho de banda estrecho con polarización circular y justo entre las frecuencias de resonancia de los dos dipolos.

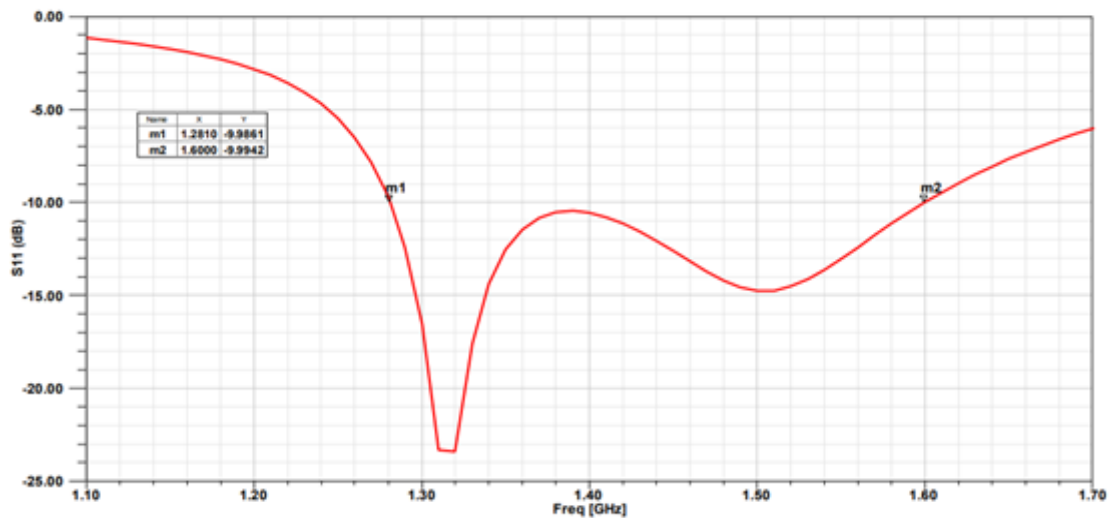


FIGURA 5.5 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda ancha. Fuente [19].

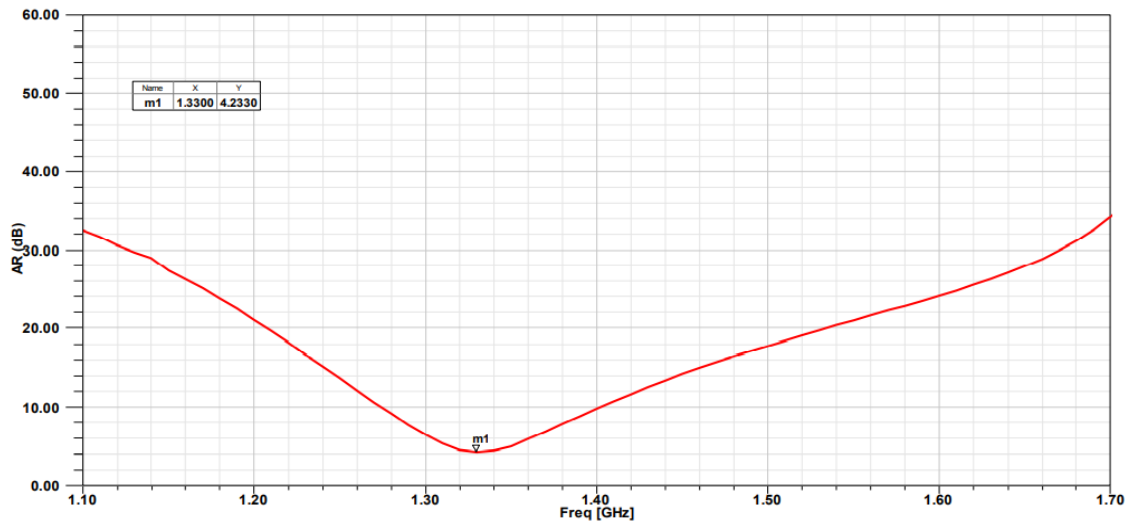


FIGURA 5.6 Simulación del AR (*Axial Ratio*) de la antena dipolar cruzada de banda ancha. Fuente [19].

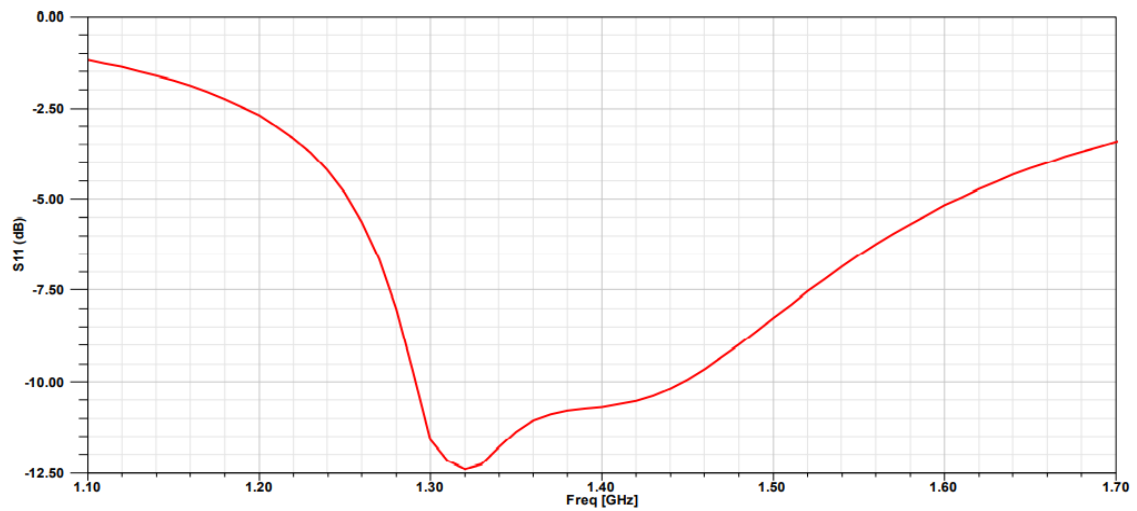


FIGURA 5.7 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda ancha con resonancias cercanas. Fuente [19].

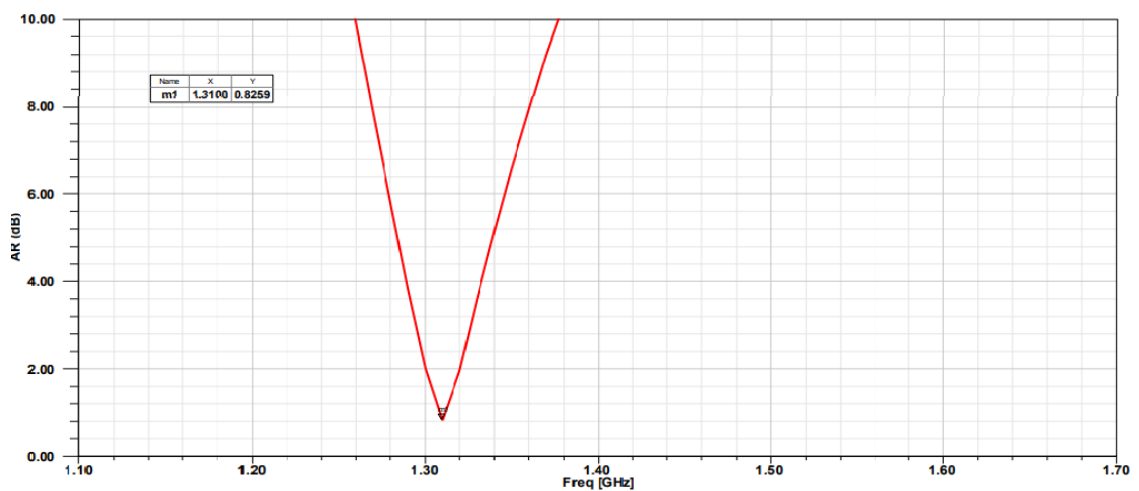


FIGURA 5.8 Simulación del AR (*Axial Ratio*) de la antena dipolar cruzada de banda ancha con resonancias cercanas. Fuente [19].

En la Figura 5.9 se observa la ganancia en polarización circular de la antena para ambos sentidos de polarización en el ángulo zenith. La antena que se ha propuesto muestra polarización circular a derechas (curva en color negro), y a izquierdas (curva en color rojo), en el ancho de banda del AR en 3dB con una ganancia máxima de 2dB en RHCP (a derechas), y algo inferior a -10dB en LHCP (a izquierdas).

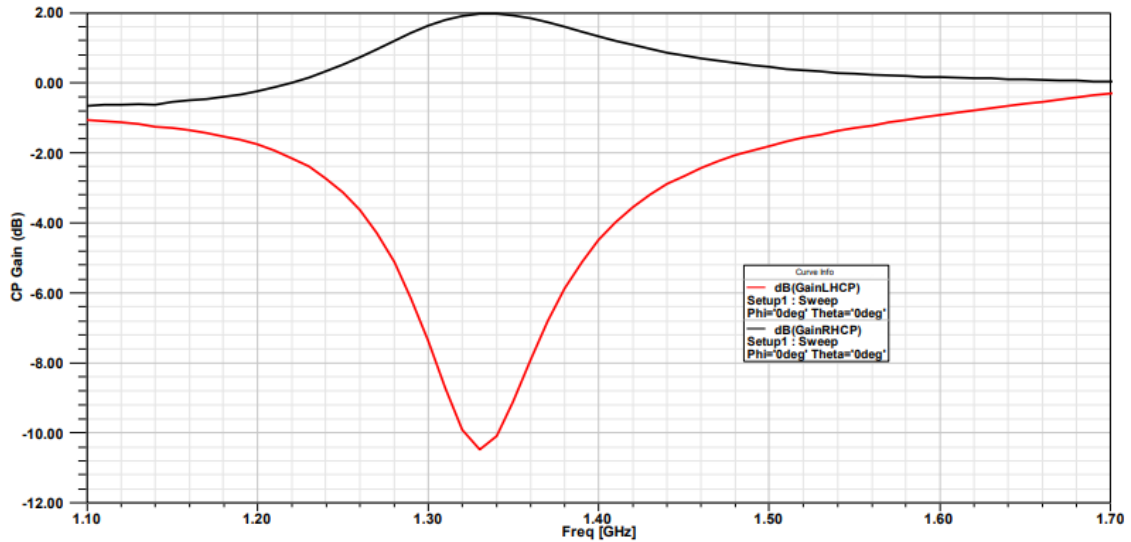


FIGURA 5.9 Simulación de la ganancia en polarización circular de la antena dipolar cruzada de banda ancha para ambos sentidos de la polarización en el zenith. Fuente [19].

5.5.4 Simulación con antena dipolar cruzada de banda dual

En la Figura 5.10 se muestra la resonancia de la antena dipolar cruzada de banda dual propuesta, la cual resuena a 1220 MHz y 1590 MHz con un ancho de banda en frecuencia de 60 MHz y 80 MHz en las bandas inferior y superior respectivamente (para un valor de S11 de -10dB). Con estos datos se cumplían los requisitos de ancho de banda para la banda superior de GNSS, pero no para la banda inferior ya que no abarca las frecuencias más bajas de GNSS. El problema se puede solucionar con dos resonancias combinadas en la banda inferior, haciendo posible ampliar el ancho de banda.

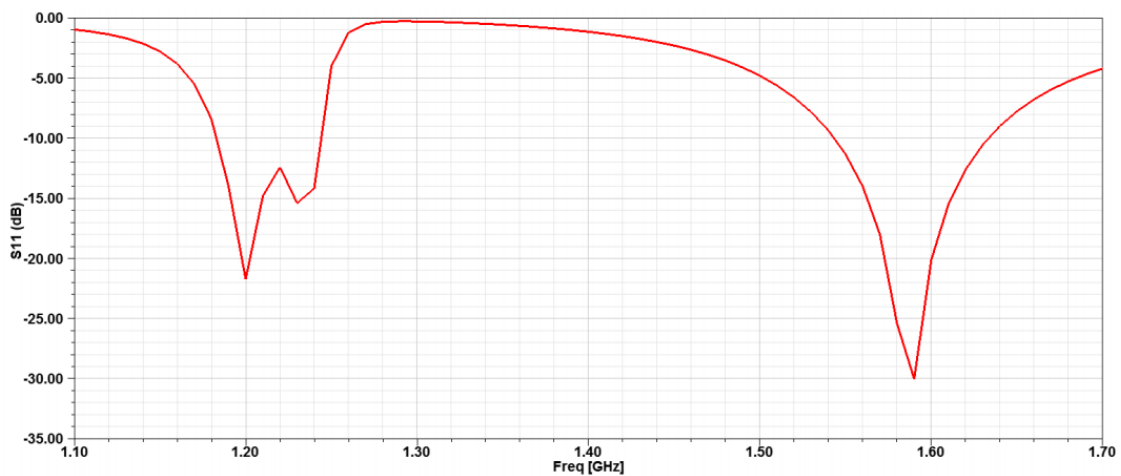


FIGURA 5.10 Simulación del parámetro S11 de la antena dipolar cruzada de banda dual. Fuente [19].

En la Figura 5.11 se puede observar que la antena tiene una relación axial de 2.9dB y 5.6dB en 1230 MHz y 1310 MHz respectivamente, con lo cual dos brazos del dipolo pueden conseguir polarización circular, no siendo necesario usar los cuatro brazos con los que está compuesto. Para que se produzca polarización circular en ambas bandas, cada una de ellas debe tener dos brazos de diferentes dipolos para conseguir el cambio de fase de noventa grados, según lo demostrado por Bolster.

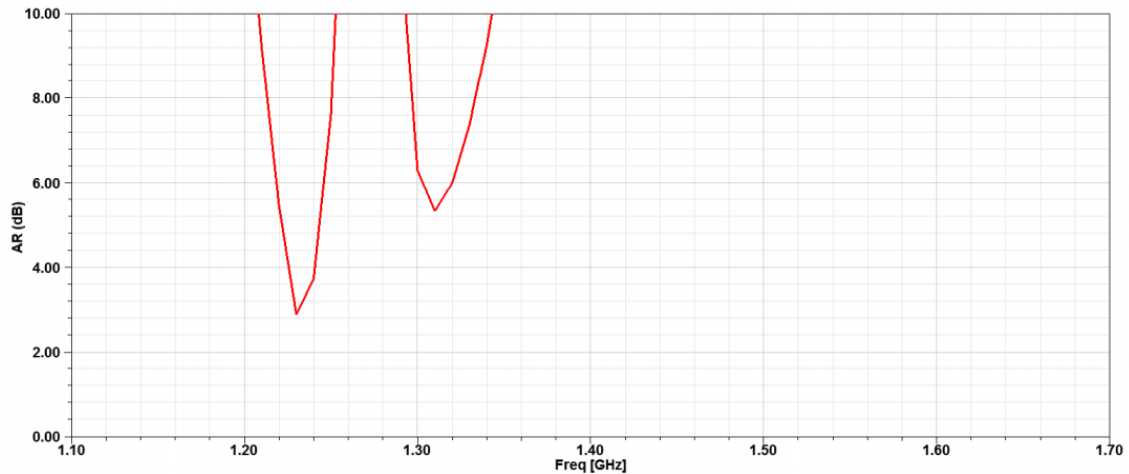


FIGURA 5.11 Simulación del AR (*Axial Ratio*) de la antena dipolar cruzada de banda dual. Fuente [19].

Esta antena está diseñada para ser utilizada en vehículos, de modo que para poder demostrar su funcionamiento y rendimiento en ellos, se simula sobre un plano de tierra metálico a un metro para actuar de tal manera como lo haría sobre el techo de un vehículo. En las Figuras 5.12, 5.13 y 5.14 se muestran la ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación (0°) para la antena de doble banda en sus tres resonancias en 1200 MHz, 1230 MHz y 1590 MHz respectivamente. Se observa que la antena consigue una ganancia máxima de 6.5dB, 6.6dB y 5.17dB en las frecuencias de resonancias anteriormente mencionadas.

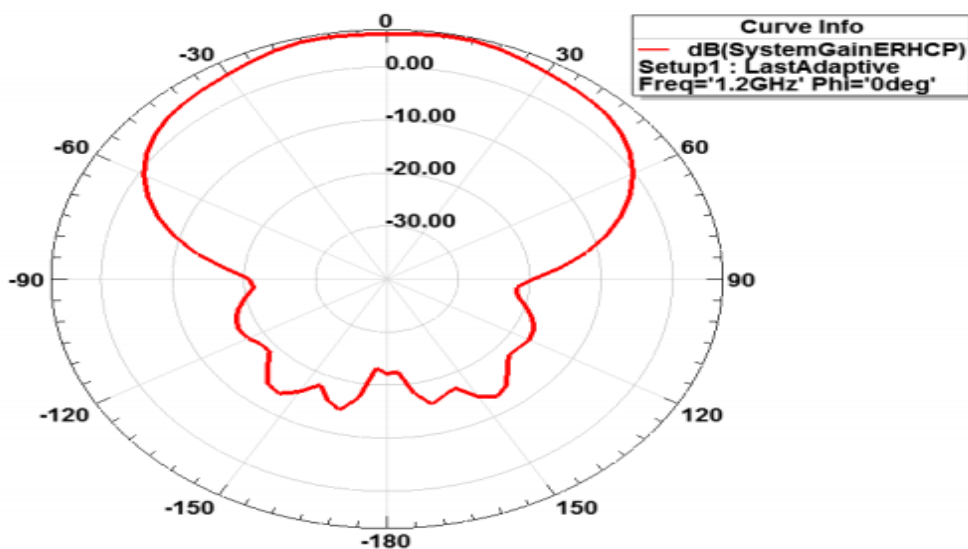


FIGURA 5.12 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1200 MHz. Fuente [19].

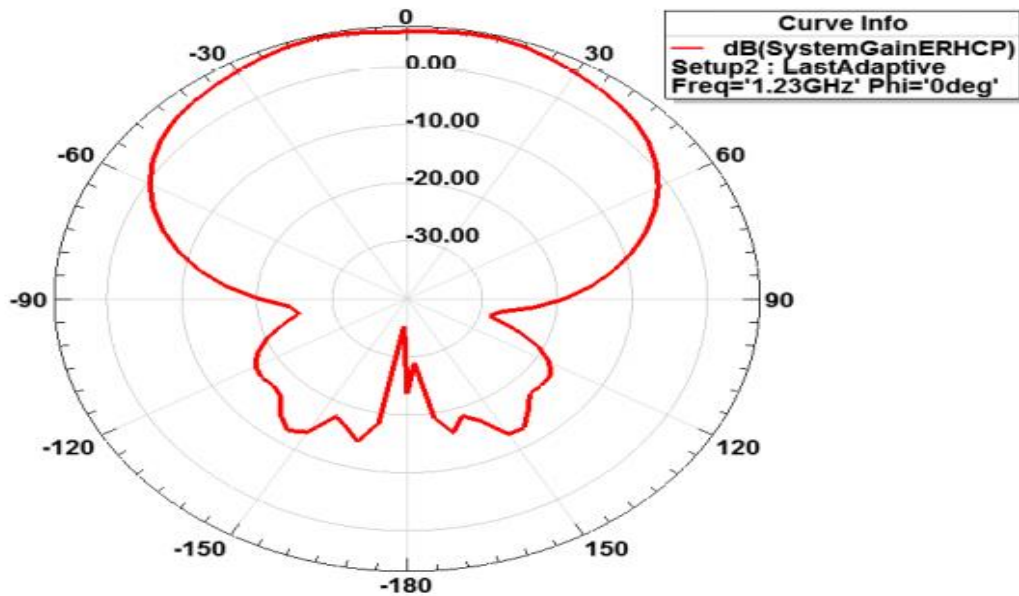


FIGURA 5.13 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1230 MHz. Fuente [19].

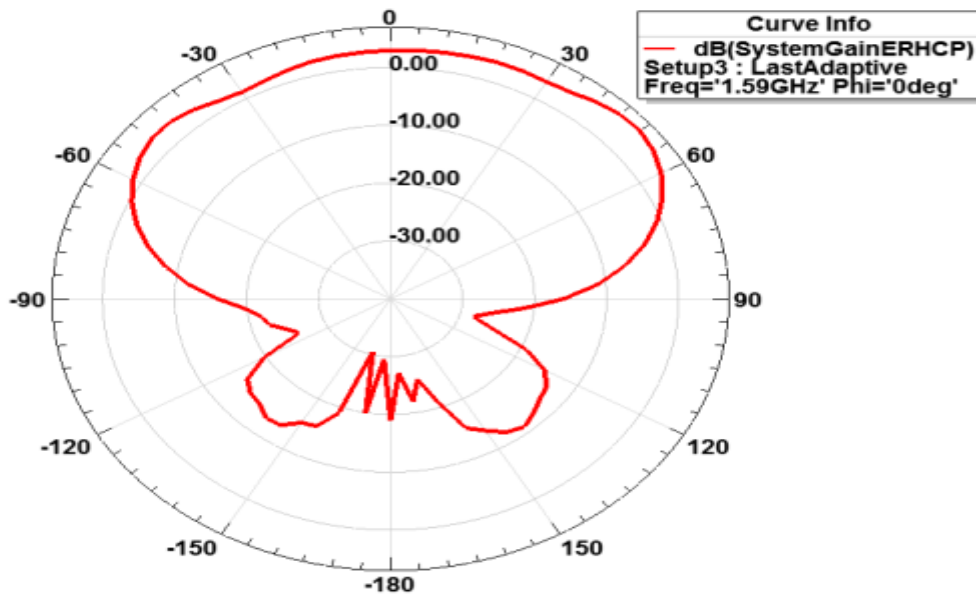


FIGURA 5.14 Ganancia en RHCP en comparación con el ángulo de elevación de la antena dipolar cruzada de banda dual en 1590 MHz. Fuente [19].

En este estudio se ha podido ver cómo existen numerosas antenas y distintas configuraciones que permiten obtener diferentes rendimientos de acuerdo con los requisitos que se buscan. De entre varias antenas vistas, no todas pueden ser válidas para aplicaciones GNSS en vehículos. Algunas de ellas cumplen ciertos requisitos necesarios pero no son de un tamaño lo suficientemente compacto para poder ser utilizadas en los mismos, donde el tamaño de la antena cobra una importancia fundamental.

Además se muestran algunas características notables relacionadas con la naturaleza de este estudio sobre GNSS aplicado a la automoción. Todas las figuras pretenden representar de manera gráfica los parámetros más importantes relacionados con la captación de señales GNSS, tales como el coeficiente de reflexión S11, el AR, así como la ganancia a las diferentes frecuencias de resonancia de las antenas.

Al final, se ha demostrado que existen dos tipos de antenas capaces de encontrar el equilibrio entre prestaciones y dimensiones: las antenas dipolares cruzadas de banda ancha y de banda dual para GNSS.

La antena de banda ancha que se ha estudiado tiene un ancho de banda de 319 MHz con unas dimensiones compactas de $50 \times 50 \times 0.8 \text{ mm}^3$. Pero tenía el problema de que el ancho de banda no abarcaba toda la banda de GNSS, que es de 470 MHz. Con la estructura de esta antena, el ancho de banda del AR en 3dB es de 30 MHz. Por lo tanto dicha antena no es la idónea para aplicaciones GNSS en vehículos. La otra antena de banda dual o doble banda, se compone de cuatro brazos de distinta longitud. La antena consigue un gran rendimiento para aplicaciones GNSS, con un ancho de banda de 60 MHz y 80 MHz en la banda inferior y superior, respectivamente. Por lo tanto, cumplía los requisitos de ancho de banda para la banda superior de GNSS, no así para la inferior que sólo cubría una parte. Esto puede ser mejorado con más investigación y con una longitud de los brazos adecuada. De esta forma, la antena de banda dual puede conseguir mejores resultados, aunque requiere de una mayor complejidad en su diseño. La antena perfecta o ideal no existe y su elección como siempre, depende de varios factores que no solo tienen en cuenta su rendimiento, sino también de las necesidades y coste que está dispuesto a asumir el usuario. A medida que la tecnología avance las antenas serán más eficientes, capaces de satisfacer la demanda de los usuarios, y pudiendo soportar la gran mayoría de aplicaciones GNSS llevadas a cabo sobre vehículos.

Como ampliación del tema para el lector interesado, existen otros estudios sobre el diseño de antenas GNSS para aplicaciones vehiculares, entre los que se destacan:

- i. Un módulo de antena compacta para GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou y SDARS en la que además de mencionar varios sistemas GNSS que ya se han estudiado, se hace mayor hincapié a SDARS [20].
- ii. El diseño de una antena GPS Microstrip para coche utilizando dicha técnica, en la que la antena es colocada en el parabrisas del vehículo [21].
- iii. El diseño e integración de antenas GPS/GNSS de alta precisión para automóviles modernos, centrándose en antenas tipo parche apiladas de alimentación dual [22].

Tras haber explicado la importancia de las antenas en cualquier tipo de sistema o aplicación GNSS, ya se dispone de una base suficiente que permite entender de mejor manera el siguiente capítulo. En él se abordarán algunas de las mejoras más relevantes de los sistemas de navegación aplicadas específicamente al mundo de la automoción.

6 Mejoras de los sistemas de navegación por satélite en vehículos

6.1 Introducción

Se van a explicar algunas mejoras actuales de los sistemas de navegación por satélite más empleados en la automoción. También, aprovechando el gran abanico tecnológico del que disponemos hoy en día, veremos cómo se resuelven algunos de los principales problemas que acarrearán estos sistemas. Se verá que, a pesar de disponer de una tecnología desarrollada, surgen algunos problemas que son difíciles de manejar y de solucionar, algunos de los cuales están estrechamente relacionados con la precisión, y se explicarán algunos sistemas capaces de minimizar, entre otros, este problema. Para concluir el capítulo, se expondrá detalladamente una de las mejoras más importantes hasta la fecha, como es el sistema eCall y evoluciones futuras.

6.2 Mejoras de los sistemas de navegación en vehículos con ADR y UDR

Entre los problemas más comunes e importantes de los sistemas de navegación está la falta de precisión al circular por lugares con gran densidad de edificaciones en general, sobre todo cuando tienen cierta altura. En estos denominados “cañones urbanos”, a veces esta situación no es desfavorable, pero en otras ocasiones resulta fundamental el poder disponer de la máxima precisión posible. Otro problema que puede acarrear la pérdida de precisión ocurre cuando atravesamos una zona cubierta o más comúnmente un túnel, y no podemos disponer de la calidad que deseamos hasta pasado dicho tramo y tener contacto con una zona exterior al aire libre.

En el capítulo 2, donde se detallaba la historia de los sistemas de navegación desde los primeros automóviles hasta los sistemas más modernos a principios de los años 2000, se ha podido constatar un desarrollo notable en la tecnología empleada.

La continua evolución de los sistemas GNSS hace que irrumpen con mayor fuerza en el mundo del automóvil. En sus primeras implementaciones en vehículos de alta gama se empleó el llamado ADR (*Automotive Dead Reckoning*) [23], sistema que combina GNSS con información detallada de la posición del vehículo proporcionada por sensores presentes en el mismo, además de información de la velocidad del vehículo proporcionada por el movimiento de las ruedas. Con esto, se puede conseguir de manera sencilla y rápida la posición del vehículo actual con su última ubicación proporcionada por GNSS. Estos sistemas tecnológicos son instalados en el vehículo en el proceso de fabricación.

El principal problema es la necesidad de conexión de red, por ello se propuso como evolución el sistema UDR (*Untethered Dead Reckoning*) [23], donde se trabaja sin necesidad de la conexión a la red, combinando de nuevo datos de los sensores con GNSS. El esquema de la Figura 6.1 muestra el concepto:

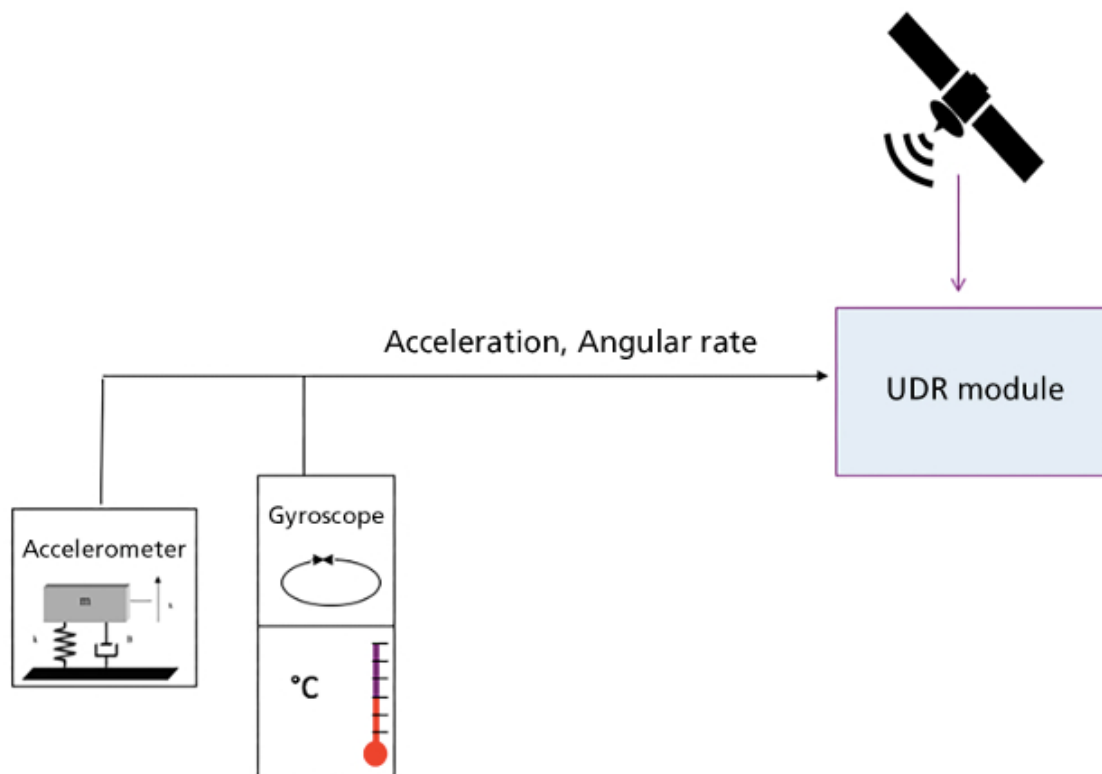


FIGURA 6.1 Concepto básico del UDR (*Untethered Dead Reckoning*). Fuente [23].

A continuación se describe la manera que tienen los sistemas de navegación por satélite para obtener la localización instantánea.

En el esquema anterior podemos observar un acelerómetro MEMS (*Microelectromechanical Systems*) y un giroscopio MEMS, que son dos elementos fundamentales para otorgar una medida muy precisa de la aceleración y fuerzas angulares que, junto con los datos GNSS, sirven para obtener una localización instantánea en dichos sistemas de navegación por satélite. La ventaja ofrecida respecto al otro sistema descrito, el ADR, es que este sistema UDR por lo mencionado anteriormente, puede funcionar adecuadamente aunque la señal sea débil o se pierda por completo en algún momento puntual. La ventaja que tiene guardar la última posición conocida del vehículo es que al pasar por un tramo de baja o nula señal durante un período corto de tiempo (al atravesar un túnel, por ejemplo), cuando finaliza ese tramo se puede obtener de forma prácticamente inmediata la nueva posición.

Vamos a mostrar un ejemplo gráfico de la comparativa de la precisión alcanzada por un sistema sólo GNSS y otro basado en UDR, en zonas urbanas con edificaciones de gran altura. Este ejemplo ha sido tomado de [23].

GNSS

Position accuracy: 21 m

Height accuracy: 31 m

Heading accuracy: 8°

UDR

Position accuracy: 7 m

Height accuracy: 10 m

Heading accuracy: 2°



FIGURA 6.2 Comparativa de precisión con sistema sólo GNSS y con UDR. Fuente [23].

En la Figura 6.2, se puede observar que la precisión empleando UDR resulta ser mejor que con sólo GNSS, prácticamente del triple, con una precisión de la posición con sólo GNSS de 21 metros y con UDR de 7 metros. Una precisión en altura con sólo GNSS de 31 metros y con UDR de 10 metros, y una precisión en el rumbo con sólo GNSS de 8 grados y con UDR de 2 grados. Se puede ver que el trayecto realizado por el vehículo con UDR se corresponde de manera más fidedigna a la carretera que bordea los edificios y que con sólo GNSS parece que el vehículo atraviesa los edificios, debido a la pérdida de precisión del sistema. Cabe destacar que la mejora con UDR se puede conseguir simplemente colocando una antena en el parabrisas del vehículo.

Ahora vamos a detallar la comparación cuando la antena para UDR se sitúa en el interior del coche, debajo del salpicadero, para que la señal sea más atenuada. El gráfico de esta nueva comparativa se muestra en la Figura 6.3.

GNSS

Position accuracy: 61 m

Height accuracy: 124 m

Heading accuracy: 41°

UDR

Position accuracy: 33 m

Height accuracy: 58 m

Heading accuracy: 3°



FIGURA 6.3 Comparativa de precisión entre sólo GNSS y UDR con señal atenuada. Fuente [23].

Como podemos observar, a pesar de disponer de la señal más débil, UDR sigue manteniendo una precisión de más del doble que sólo con GNSS, con una precisión de la posición con sólo GNSS de 61 metros y con UDR de 33 metros, una precisión en altura con sólo GNSS de 124 metros y con UDR de 58 metros, y una precisión en el rumbo con sólo GNSS de 41 grados y con UDR de 3 grados. De acuerdo con ambas comparativas, se puede ver la gran utilidad de UDR, ya que tiene mejor rendimiento que un sistema basado únicamente en GNSS [23].

Se ha expuesto que, aunque los sistemas GNSS tienen una gran capacidad y potencia, pueden ser perfeccionados usando otros sistemas complementarios que mejoran la precisión y que, a medida que vaya evolucionando la tecnología, cada vez se lograrán mayores prestaciones.

6.3 GPS Mejorado. Sistemas de Aumentación

Desde que comenzó a usarse GPS como sistema de navegación por satélite para el automóvil, ha ido evolucionando e implementando mejoras que consiguen una mayor comodidad en la conducción. Estas mejoras se conocen como sistemas de aumentación.

Emplear estos sistemas de aumentación, mejoran notablemente la precisión pudiendo tener errores máximos de alrededor de un metro o incluso menos. En el caso de disponer de un sistema GPS sin sistema de aumentación, el error en la precisión puede llegar a ser de entre uno y cinco metros en condiciones de buena recepción de señal.

Entre los más habituales, encontramos:

- GPS Diferencial (DGPS), mejora la precisión del posicionamiento.
- SBAS (*Satellite Based Augmentation System*), mejora la precisión del posicionamiento y la fidelidad de la señal. Entre los sistemas más conocidos de este tipo, encontramos EGNOS y WAAS (*Wide Area Augmentation System*) en Europa y EEUU respectivamente.
- A-GPS (*Assisted-GPS*), mejora las prestaciones y la calidad de la señal en recepción para lugares cerrados.
- Receptores GPS multifrecuencia, mejoran las prestaciones en los receptores GPS, sobre todo en los receptores de doble frecuencia y alta sensibilidad.

A continuación, se va a explicar cada uno de los sistemas de aumentación mencionados.

6.3.1 GPS Diferencial (DGPS)

Para cualquier estación terrestre GPS, es perfectamente conocida su posición en latitud y longitud. Dicha estación determina su posición gracias a los satélites disponibles. Luego, conociendo la posición exacta de la estación y la que determina con los satélites, se puede estimar el error de posicionamiento que se produce con esa desviación entre ambas posiciones.

Dichas desviaciones podrán ser corregidas al ser conocidas, y serán válidas para cualquier receptor GPS localizado en un rango de hasta 200 km alrededor de la estación de referencia. Cabe resaltar que las correcciones se efectúan en base a la información transmitida por los satélites que son visibles en ese margen de distancia, no en el error que se obtiene desde la estación de referencia. Teniendo en cuenta esto, los datos que se envían desde las estaciones de referencia son utilizados por parte del receptor para mejorar su precisión hasta alcanzar márgenes de error muy pequeños, de incluso centímetros.

En la Figura 6.4 se muestra un ejemplo de lo explicado. Se puede observar que tenemos cuatro satélites cubriendo un área que abarca prácticamente toda Suiza, una estación de referencia GPS y un receptor móvil GPS en ciudades distintas. Los satélites envían la información a la estación de referencia y los sistemas DGPS recogen esta información, donde comunican los datos de corrección vía radio al receptor móvil GPS, y este se encarga de mejorar su precisión [16].

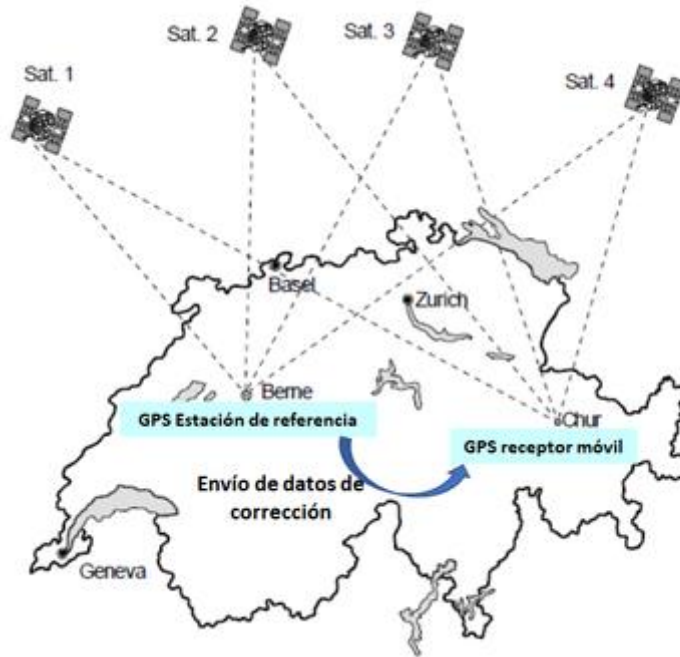


FIGURA 6.4 Ejemplo de comunicación con GPS Diferencial (DGPS). Fuente [16].

Existen muchos canales disponibles por los que se pueden comunicar los datos de corrección. Cada servicio DGPS emplea una banda de frecuencia para hacerlo, donde las diferentes bandas disponibles tienen sus ventajas e inconvenientes. En la Tabla 6.1 se muestran, a modo de resumen, los distintos sistemas de radiodifusión para comunicar las correcciones, el rango de frecuencias en el que trabajan y las diferentes prestaciones que tienen.

Sistemas de radio difusión	Rango de frecuencias	Ventajas	Desventajas	Standard Transmisión
Trasmisores de Onda media y Onda Larga (LW, MW)	100 – 600 KHz	Largos rangos de cobertura (1000 km)	Baja velocidad de transmisión de datos	RTCM SC104
Radio Baliza marítima	283 – 315 KHz	Largos rangos de cobertura (1000 km)	Baja velocidad de transmisión de datos	RTCM SC104
Radio Baliza de aviación	255 – 415 KHz	Largos rangos de cobertura (1000 km)	Baja velocidad de transmisión de datos	RTCM SC104
Trasmisor de Onda corta	3 – 30 MHz	Amplia cobertura	Calidad de señal dependiente en el tiempo y frecuencia	RTCM SC104
VHF y FM	30 – 300 MHz	Mayor velocidad de transmisión datos. Infraestructura existente.	Rango de cobertura limitado por la propagación terrestre.	RTCM SC104
Comunicaciones móviles (GSM, GPRS)	450,900,1800 MHz	Infraestructura existente. Mayor cobertura	Problemas de sincronismo. Servicios de pago.	RTCM SC104

TABLA 6.1 Tipos de sistemas de radiodifusión. Fuente [16].

Tal y como se muestra en la tabla anterior, todas las estaciones de referencia DGPS, comunican los datos de corrección atendiendo al estándar de comunicaciones RTCM

SC-104, lo que significa que se necesita un receptor GPS que lleve implementado un decodificador para poder recibir y procesar dichas correcciones. Esto supone una mayor dificultad en el diseño del receptor GPS, y por lo tanto un coste superior, a cambio de obtener mejor precisión [16]. La elección de implementar estos sistemas, como siempre, dependerá del usuario y de la calidad de precisión que necesite.

6.3.2 SBAS (*Satellite Based Augmentation Systems*)

SBAS ofrece una gran cobertura y las correcciones no sólo se basan en las medidas de la estación terrestre de referencia, sino que se emplea toda una serie de estaciones de referencia que forman parte de una zona.

La gran ventaja de este tipo de sistema de aumentación es que todas las correcciones se transmiten mediante satélites geostacionarios, operando en la misma banda de frecuencia L1 de GPS, a partir del estándar RTCA DO-229. Esto implica poder emplear el mismo receptor para poder tener una mayor precisión, sin necesidad de usar otro adicional que requeriría más coste.

En la Figura 6.5 se observa cómo con DGPS (estándar RCTM SC-104), se necesitaría de un receptor adicional mientras que con SBAS (estándar RTCA DO-229), bastaría con un único receptor.

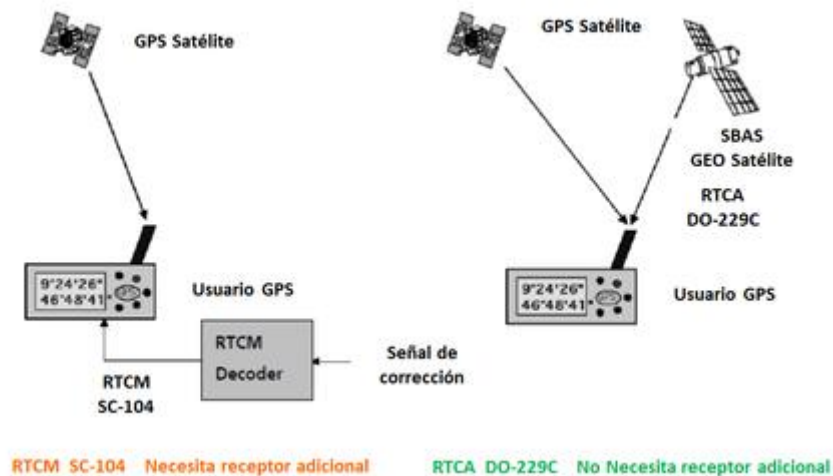


FIGURA 6.5 Diferencia de uso de receptor con DGPS Y SBAS. Fuente [16].

Además de aumentar la precisión, ofrecen una mayor integridad y seguridad a las señales GPS que recibe el receptor por lo mencionado anteriormente, ya que se dispone de una red de estaciones terrestres de referencia que se encuentran permanentemente comprobando la información enviada por los satélites para posteriormente retransmitirla al receptor [16].

La red de cobertura que ofrece SBAS es considerablemente grande. Tal y como se muestra en la Figura 6.6, dispone de dos sistemas predominantes como son WAAS y EGNOS, abarcando todo el área de América del Norte (EEUU, Canadá y México) y

Europa respectivamente. Ambos sistemas son compatibles entre sí ya que emplean el mismo estándar de transmisión RTCA DO-229C [16].

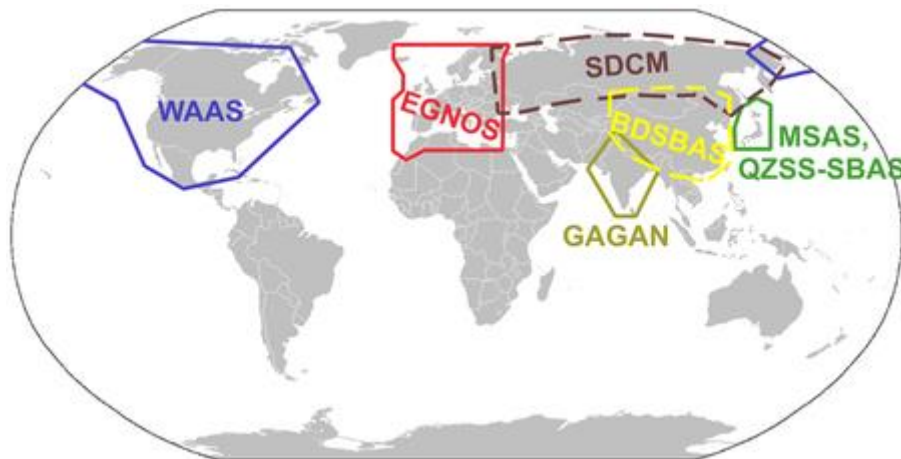


FIGURA 6.6 Área de cobertura de distintos sistemas de aumentación. Fuente [16].

6.3.3 A-GPS (*Assisted-GPS*)

La cantidad de dispositivos que utilizan tecnología de navegación por satélite es cada vez mayor y crece de manera exponencial. Los primeros dispositivos móviles empleaban tecnología 2G, con mensajes SMS (*Short Message Service*), posteriormente 3G, 4G y hasta día de hoy con los primeros en 5G. Estos dispositivos no necesitan tener siempre la función de GPS activa, la cual si está puesta de forma continuada puede llegar a consumir batería de manera elevada.

Ya que el sistema GPS es poco usado, cabe la posibilidad de que no haya información de posicionamiento disponible en ese momento. De manera habitual, un receptor GPS necesita alrededor de 18-36 segundos mínimo para poder obtener toda la información de posicionamiento necesaria y realizar el cálculo del TTFB (*Time to First Fix*), que es la primera posición obtenida. Este primer cálculo puede llevar más tiempo de lo esperado, incluso de algunos minutos en condiciones de poca cobertura como zonas urbanas o túneles. Este problema de arranque lento, es algo que es difícil de solucionar aún con otra tecnología mejorada que lleve implementada el receptor.

En el caso de que el receptor tenga dificultades para obtener los datos de posicionamiento por alguno de los motivos previamente mencionados, tiene que realizar una búsqueda completa de todos los satélites disponibles, procesar esa información y del que haya podido obtener datos, calcular la posición. Esto requiere más tiempo, lo que se traduce también en un consumo mayor de batería. Recordemos que la constelación GPS dispone de veinticuatro satélites geoestacionarios y el receptor necesitará información de como mínimo cuatro para poder establecer la posición.

Existen algunas formas de conseguir la posición de manera relativamente rápida en condiciones difíciles para el receptor GPS. El receptor puede obtener información de otros sistemas de comunicación tales como, por ejemplo, GSM (*Global System for*

Mobile), GPRS (General Packet Radio Service), CDMA (Code Division Multiple Access) o UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) [16].

Es aquí donde entra en juego A-GPS. Es una aplicación de ayuda, que da servicio usando datos de ayuda, para poder reducir el tiempo de cálculo de posicionamiento en el receptor GPS. Este obtiene la información de ayuda mediante móvil o Internet, la cual ofrece entre otras: constelación de satélites, datos exactos de la órbita e información temporal necesaria para ajustar parámetros.

Como se muestra en la Figura 6.7, el receptor GPS además de la información directa recibida de los satélites, en casos de dificultad en la recepción puede recibir esos datos de ayuda gracias a A-GPS. En situaciones de extrema dificultad es la única manera de conseguir información de la posición. El tiempo de arranque del receptor GPS en esta situación dependerá de la cantidad de información de ayuda requerida.

Como es lógico, cuanto mayor sea la información recibida, menor será el tiempo para poder determinar la posición.

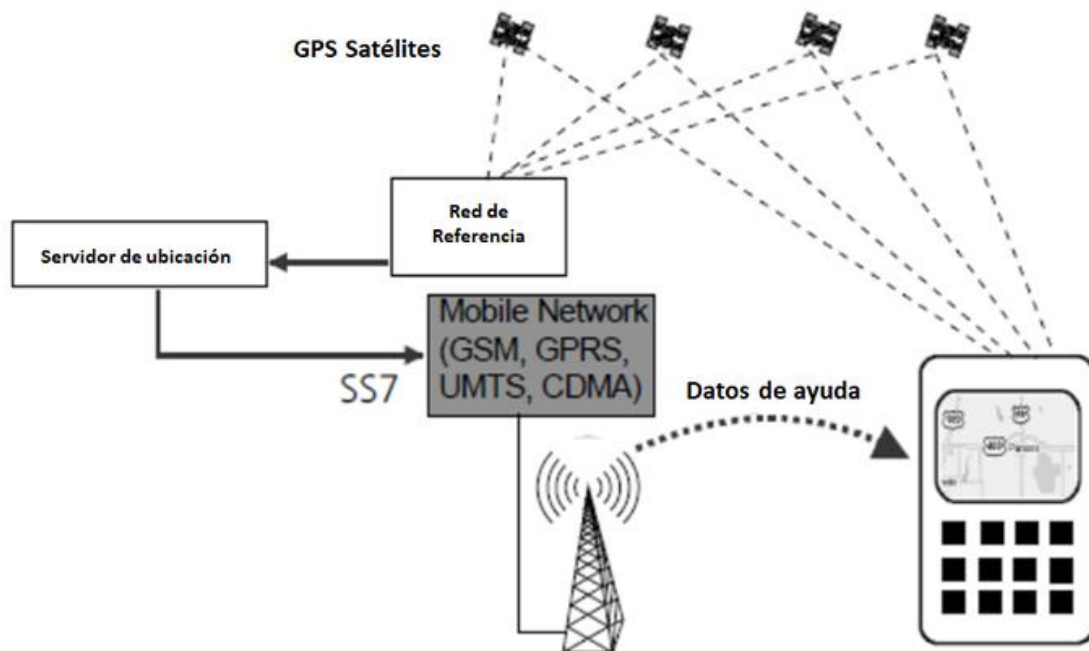


FIGURA 6.7 Esquema de recepción de datos de ayuda basado en A-GPS. Fuente [16].

6.3.4 Receptores GPS Multifrecuencia

En algunas ocasiones hay efectos negativos en la propagación de las señales por fenómenos naturales inevitables. Entre los satélites y los receptores, las señales atraviesan la atmósfera, donde la capa más crítica para la propagación es la ionosfera, localizada entre los 80 y 500 km de altura sobre la superficie terrestre. En esta capa se encuentran moléculas de gas con una gran capacidad de ionización provocada por la radiación solar. Las señales se transmiten a la velocidad de la luz, pero al cruzar la ionosfera disminuye su velocidad y por lo tanto no viajan a una velocidad constante. Esta cantidad de moléculas de gas ionizante puede fluctuar dependiendo la zona y la

hora del día, siendo mucho mayor durante el día cuando recibe luz solar y en el Ecuador que es el punto de mayor incidencia de los rayos solares.

Como se ha dicho, este efecto natural es inevitable pero se puede manejar en el lado del receptor si se conoce el nivel de ionización. Con una velocidad de propagación variable, la frecuencia también variará y por lo tanto en el lado del receptor la manera que se tiene de gestionar este efecto, sería empleando receptores capaces de recibir no sólo una frecuencia sino más de una, con receptores GPS de doble frecuencia.

Tal y como se expone en la Figura 5.1 (Capítulo 5), los sistemas de navegación operan en varias frecuencias, normalmente en doble banda. GPS dispone de tres bandas: L1(1563-1587 MHz), L2(1215-1239.6 MHz) y L5(1164-1189 MHz). Las utilizadas son la L1 y L2, y lo ideal es que el receptor sea capaz de recibir en varias frecuencias, implementando receptores duales. Hay que tener en cuenta que esto aumenta la complejidad de la antena y el circuito de radiofrecuencia, teniendo que implementar antenas de doble frecuencia, así como amplificadores y filtros adaptados para las distintas frecuencias [16].

A modo de resumen se puede decir que estos sistemas de aumentación, permiten aumentar o mejorar las prestaciones del sistema GPS, y no dependen del tipo de antena seleccionada. Los más eficientes y que mejores prestaciones otorgan son los DGPS, mientras que los más asequibles en coste y que requieren una menor complejidad en el diseño e implementación son los SBAS, siendo los más empleados WAAS y EGNOS. También se ha visto como hay sistemas que pueden ayudar a mejorar la precisión y la calidad de la señal aún en condiciones de dificultad, como son los sistemas A-GPS. Por último, se ha mencionado la utilización de receptores GPS multifrecuencia que permiten mejorar la integridad de las señales en recepción, mitigando los efectos adversos en la propagación que producen fenómenos naturales en la atmósfera, además de que no requieren tanta complejidad en el hardware como los DGPS [16].

6.4 Mejoras de los sistemas de navegación en vehículos con GPS 3

Esta versión de GPS actualmente está en fase de implementación y se estima que esté completamente operativa en el año 2023. Cuenta con diez satélites, tres en órbita y siete más en vías de desarrollo. En la Figura 6.8, se muestra un satélite GPS 3 en órbita. El primer satélite de esta versión fue llamado “Vespucci”, y fue puesto en órbita por la corporación estadounidense Lockheed Martin en diciembre de 2018, el segundo “Magellan” fue lanzado en agosto de 2019 y el tercero en enero de 2020 sobre un cohete SpaceX Falcon 9. Los demás satélites serán construidos y puestos en órbita de manera progresiva hasta 2023.



FIGURA 6.8 Satélite GPS 3 en órbita. Fuente [24].

El trabajo de construcción y de lanzamiento de los satélites requiere una fuerte inversión. El primero de los satélites costó alrededor de 529 millones de dólares, por lo tanto, el conjunto de la puesta en marcha de los diez satélites puede alcanzar la cifra de unos 5.5 billones (5.500 millones) de dólares.

La inversión realizada en este proyecto es muy elevada, pero cabe destacar que estos satélites más modernos que los primeros que fueron lanzados y utilizados por el sistema GPS, tendrán una vida útil mucho mayor. Los primeros satélites para navegación GPS tenían una durabilidad de unos siete años, mientras que los nuevos de la versión GPS 3 contarán con una durabilidad en torno a quince años, el doble que los primeros y alrededor del 25% más que los más actuales. Los satélites más antiguos quedarán obsoletos en favor de los de la nueva generación, a medida que se vayan incorporando estos.

Siempre se ha hablado de la importancia de la precisión en este tipo de sistemas, y es lógico pensar que esta nueva versión GPS 3 otorgará a los usuarios un nivel de precisión más alto que el actual. Se estima que estos sistemas dispondrán de una precisión de alrededor del triple que los anteriores: entre uno y tres metros, mientras que los actuales tienen alrededor de entre cinco a diez metros. Estos valores siempre dependen de las condiciones del sistema y del entorno en el que se encuentre el usuario. La señal será más potente que la actual y se producirán menos interferencias y menos caídas de señal, incluso en entornos parcialmente cerrados en núcleos urbanos. También, los dispositivos inteligentes de navegación, por ejemplo teléfonos móviles, podrán encontrar su ubicación con mayor precisión que antes [24].

Además de un aumento de precisión, se ampliará la tecnología para llegar a más usuarios. La señal civil L1C [25] se estima que llegue a estar disponible de manera completa alrededor del año 2026, siendo desarrollada por los Estados Unidos y la Unión Europea, como señal civil compartida tanto para GPS como para Galileo y transmitiendo a la misma frecuencia que la señal original L1 C/A (1575.42 MHz), manteniendo compatibilidad con versiones anteriores. Dicha señal L1C comparte la misma frecuencia central que la red europea Galileo, la japonesa QZSS y la china Beidou. Se trata de que la compatibilidad sea la mayor posible. En el futuro, los receptores GNSS tendrán la capacidad de recibir datos de ubicaciones de diferentes sistemas de navegación por satélite, y poder emplear esa información para ofrecer al usuario un seguimiento más fiel y preciso.

6.5 Mejoras para aplicaciones de GNSS en vehículos

Desde diciembre del año 2016, Galileo ofrece servicios que ya mejoran la vida a ciudadanos y a empresas, donde actualmente alrededor del 95% de las empresas que fabrican chips para smartphones (teléfonos inteligentes) para navegación por satélite, los hacen compatibles con Galileo. Los dispositivos móviles son la herramienta tecnológica más común y accesible para la gran mayoría de la población, con lo cual la cantidad de usuarios que disponen de un dispositivo móvil con Galileo es elevadísima.

Es evidente que Galileo y otros tipos de sistemas de navegación y posicionamiento por satélite pueden servir de gran ayuda en multitud de servicios, porque pueden mejorar su funcionamiento, permitir nuevas funcionalidades, etc.

Galileo ofrece un servicio vital como es el Servicio de Búsqueda y Salvamento SAR (*Search and Rescue*) [26], que permite la detección de una persona equipada con una radiobaliza de socorro en menos de diez minutos en cualquier lugar del planeta, y gracias a Galileo se ha mejorado la exactitud en la localización, lo que en tareas de salvamento y rescate supone una enorme mejora ya que ayuda a salvar muchas vidas.

Y si se pudiera ofrecer un servicio similar en los vehículos, también ayudaría a salvar muchas vidas, por ejemplo, en caso de accidente si el conductor pierde el conocimiento o le es imposible pedir ayuda debido a las circunstancias. Aquí es donde entra una de las mayores innovaciones de aplicaciones GNSS destinadas a vehículos, como es el sistema eCall (*Emergency Call*) [27]. Todos los nuevos vehículos que salen al mercado en la Unión Europea están equipados con este sistema, el cual utiliza Galileo para poder mandar la ubicación del vehículo a los servicios de emergencia. Cuando decimos vehículos también incluimos camiones, donde en los tacógrafos que disponen también está implementado el sistema Galileo.

6.5.1 Sistema eCall

Desde el 1 de abril de 2018, es obligatorio que lleven implementado el sistema eCall todos los vehículos nuevos fabricados en la Unión Europea. La cantidad de vehículos que circulan a lo largo de un día por todo el mundo, Europa en este caso, es muy elevado y ya no digamos entonces a lo largo de un año. Debido a esto, la cantidad de accidentes que pueden ocurrir es considerablemente alta, donde en algunos casos el conductor y los demás pasajeros pueden fallecer en el acto y en otros muchos, alguno de estos puede sobrevivir. En ocasiones, puede resultar imposible que contacten con los servicios de emergencia debido a las lesiones o al impacto emocional que ha supuesto el accidente. Queda claro que en muchas de estas situaciones es vital un sistema como eCall, que permita avisar a los servicios de emergencia y no sólo eso, sino además comunicar la posición exacta del accidente. Se estima que en Europa con este sistema, apoyado por Galileo, se reducen en aproximadamente un 10% los fallecidos. Teniendo en cuenta la cantidad de accidentes que se pueden producir, se trata de muchas vidas que han sido salvadas gracias a esta tecnología. Según la Comisión Europea (CE), en el año 2014 fallecieron 25900 personas a causa de accidentes de tráfico, mientras que según la Administración Nacional de Seguridad del Tráfico en las carreteras de Estados Unidos, en el mismo año fallecieron 32675 personas [28].

eCall funciona igual en toda Europa: al ocurrir una emergencia el sistema se activa y se produce la comunicación con el Punto de Respuesta de Seguridad Pública PSAP (*Public Safety Answering Point*) [27], y a su vez con el servicio de emergencias 112 que da el aviso al puesto de primeros auxilios que esté más cercano al punto del accidente. Este sistema usa la telefonía móvil junto con el posicionamiento por satélite para así saber la localización del vehículo accidentado. También el sistema aportará los datos del vehículo, tales como su marca, modelo y el número de pasajeros que iban en ese momento en el vehículo para así poder dar una visión más real y objetiva del accidente. La llamada de emergencia se puede producir de manera automática, cuando los sensores de colisión del coche se activan, si el o los pasajeros no pueden hacerlo o de manera manual en caso contrario. La localización exacta del accidente es fundamental, pero más aún en zonas remotas o carreteras alejadas de poblaciones. En la Figura 6.9, se muestra un esquema del funcionamiento del sistema eCall, donde se puede ver la cronología de sucesos desde el momento en el que se produce el accidente hasta la llegada de los servicios de emergencias.

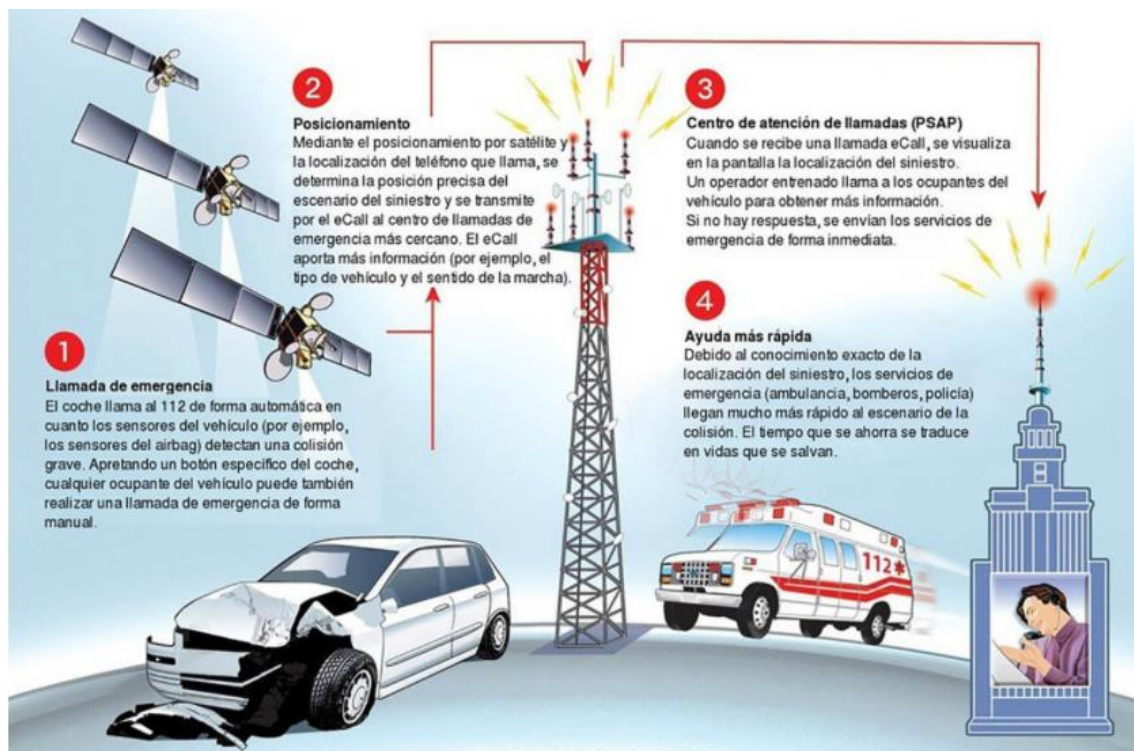


FIGURA 6.9 Esquema del funcionamiento del sistema eCall. Fuente [29].

Para que el sistema funcione correctamente, los vehículos necesitarán disponer de varias funciones, estas son:

- Receptor Galileo o GPS (lo más habitual) para poder informar de la posición exacta del vehículo.
- Cualquier dispositivo de control, como el navegador convencional que lleve incorporado el vehículo, y que permita informar de la ubicación exacta del vehículo.
- Antena GSM apoyado en el sistema Galileo, que permite realizar la llamada de emergencia.

- Control del sistema eCall para poder almacenar los datos y poder establecer una correcta conexión.
- Dispositivo de manos libres para poder comunicarse con los pasajeros del vehículo.
- Sistema de energía en caso de que falle la batería.
- Botón que permita realizar la llamada de emergencia de manera manual.
- Testigo o luz que permita identificar las funciones que puede realizar el sistema.
- Documentación con información específica del vehículo.
- Sensor de choque que permita avisar al sistema de manera automática y notificar la gravedad del accidente.

Los datos que comunica el sistema son siempre los mismos, estos son:

- Posición del vehículo, en latitud y longitud, además de las posiciones más recientes junto con las diferencias de tiempo entre posiciones anteriores y la del momento de la llamada.
- Información sobre cómo se ha producido la llamada, si es automática o manual y el modelo del vehículo.
- Hora en la que se produjo el accidente, así como la dirección hacia donde iba el vehículo en ese momento.
- VIN (*Vehicle Identification Number*) número de 17 dígitos que permite la identificación del vehículo.
- Tipo de vehículo, si se trata de un vehículo diésel, gasolina o eléctrico.
- Número de tripulantes en el vehículo, esta información es conocida a partir del número de cinturones de seguridad abrochados.

Todos estos datos son comunicados a los servicios de emergencia, aunque el propietario del vehículo puede cambiar la configuración del sistema para que el fabricante de dicho vehículo también sea informado. Una vez recopilados y comunicados todos los datos, el sistema los eliminará [30].

Evidentemente, los vehículos anteriores a la puesta en marcha del sistema eCall no disponen de dicho sistema y los mismos no tienen la obligación de llevarlo implementado. Cabe preguntarse si los vehículos anteriores a la introducción del eCall en el mercado no llevan ningún sistema de emergencia. Sí que lo llevan y es el sistema OBD (*On Board Diagnostics*) desde el año 2004 [30], el cual revisa todos los sistemas del vehículo, informando de problemas que pueda haber detectado y además se puede usar para instalar un sistema automático que pueda realizar llamadas de emergencia. Se está trabajando para incorporar el sistema eCall a todas las motocicletas del mercado, de momento sólo algunas marcas como BMW dotan a algunos de sus modelos de dicho sistema con un funcionamiento análogo al del coche [31].

Como hemos mencionado, aparte del sistema eCall, existen otros tipos de sistemas automáticos de emergencia menos modernos que eCall. Por ejemplo, los sistemas de

frenado tales como, el sistema antibloqueo de ruedas ABS (*Antilock Brake System*), el sistema de asistencia a la frenada BAS (*Brake Assist System*) entre otros, además de servicios de notificación de accidentes que proporcionan las aseguradoras.

La evolución de los sistemas de navegación por satélite para conseguir que sean más modernos, más precisos y más fiables, como es el caso de Galileo u otros similares, permite mejorar sistemas implementados en vehículos como eCall. Repercuten en un aumento de la seguridad y consiguen salvar muchas vidas como lo fue en su momento la implantación de los airbags o los cinturones de seguridad, con lo cual no realizan simplemente una tarea como puede ser el llevar al conductor a un sitio determinado, sino que pueden ayudar en situaciones mucho más delicadas y complejas.

Como se lleva diciendo desde el principio del trabajo, la evolución de la tecnología permite la mejora constante en la vida cotidiana de las personas, los sistemas de navegación por satélite tienen un gran impacto y son de gran ayuda para millones de usuarios en todo el mundo, el sistema eCall apoyado por Galileo es una muestra de ello.

Aunque el sistema eCall tenga una utilidad e importancia muy relevante como se ha explicado anteriormente, todavía existen limitaciones ya que los sistemas de emergencia actuales se basan en tecnologías de telecomunicaciones heredadas, que en algunos casos no pueden afrontar servicios basados en IP (*Internet Protocol*) que son utilizados por la sociedad a diario. Algunas de estas limitaciones están relacionadas con la falta de integración de las redes sociales y el uso de un módem analógico que proporcionan servicios eCall con cantidades de datos limitadas.

Esto, sumado a que la gran mayoría de operadores de telefonía actuales están migrando hacia modernas infraestructuras de banda ancha basadas en IP, hace que los sistemas de emergencia tales como eCall deban actualizarse y adaptarse para cumplir con los nuevos requisitos reglamentarios relacionados con los servicios de emergencia de la próxima generación como el proyecto EMYNOS [32]. Este nuevo sistema permite ofrecer llamadas de emergencia combinando voz, texto y vídeo, además de enrutamiento y redireccionamiento de las llamadas hasta el centro de llamadas disponible que se encuentre más próximo, pudiendo obtener la ubicación de la persona que realiza la llamada y otras ayudas.

El marco NG 911/112 de sistemas de emergencia proporciona los componentes básicos que respaldan la próxima generación de eCall (NG-eCall) para Estados Unidos y Europa, el cual contribuye a un estándar común para la interfaz entre los centros de servicios privados y los puntos de respuesta de seguridad pública PSAP [28].

También existen diferentes servicios de llamadas de emergencia en el vehículo que están actualmente estandarizados o disponibles en el mercado: eCall y los servicios de terceros compatibles con eCall como TPS-eCall están estandarizados en Europa, ERA-GLONASS en Rusia y HELPNET en Japón [28].

6.5.2 Estudios sobre mejoras para aplicaciones de GNSS en vehículos

En este apartado se van a mostrar diversos estudios adicionales para el lector interesado, que proponen interesantes mejoras para aplicaciones GNSS destinadas a vehículos.

Entre las mejoras que permiten los sistemas de navegación en vehículos, existen mejoras en seguridad como por ejemplo un sistema de seguridad contra el robo de automóviles basado en Internet y GPS. La prevención habitual del robo de automóviles se basa en un bloqueo mecánico del volante con el embrague para que el vehículo no pueda ser arrancado o, en el caso de que sí se logre este cometido, dificultar enormemente la movilidad del mismo. Con el desarrollo tecnológico se pueden utilizar sistemas mejores capaces, además de prevenir el robo, de que aún en el caso de producirse se pueda monitorear la posición del vehículo con un seguimiento a tiempo real gracias a Internet y al sistema de navegación por satélite GPS como se muestra en el siguiente estudio [33].

Con respecto a la precisión, existen estudios que proponen un algoritmo de mejora de la precisión de la posición para un receptor GPS considerando el límite de distancia. El método que se propone, mejora la precisión de la posición ajustando la trayectoria del vehículo que se adquiere por el receptor GPS, con información cartográfica previa [34].

También es importante conocer que los sistemas GNSS pueden tener ciertas vulnerabilidades que afectan a aplicaciones vehiculares, como el bloqueo de la señal GNSS, suplantación de la ubicación, ciberataques, etc. Como dato importante de la debilidad que llegan a tener las señales GNSS, la señal de recepción de GNSS en la superficie terrestre es de unos -130 dBm mientras que la señal típica WiFi que se transmite desde ordenadores portátiles es de 15 dBm, es decir una potencia alrededor de 300 billones de veces menor [35].

Hasta ahora se daba por hecho que los vehículos tenían conductor y todos los sistemas descritos se apoyaban sobre este principio pero, en el caso de no ser así como puede ser en vehículos autónomos, es importante estudiar cómo se implementarían los sistemas de navegación por satélite en ellos. El siguiente capítulo tratará este tema, cabe destacar que aunque a día de hoy no se esté familiarizado con este tipo de vehículos, la conducción autónoma cobrará una gran importancia en el futuro debido entre otras cosas, a la mayor seguridad que otorgan frente a los vehículos convencionales, disminuyendo accidentes evitables y mejorando la fluidez del tráfico.

7 Sistemas y tecnología de navegación por satélite en vehículos autónomos

7.1 Introducción

Se va a tratar de abordar uno de los usos más importantes que tiene esta tecnología, el trabajo no trata sobre ello pero sí es importante hacer una mención de este tema, ya que es algo que con toda seguridad va a ser importante en los próximos años.

7.2 Sistemas y tecnología de navegación aplicada en vehículos autónomos

Resulta interesante detallar algunos aspectos relevantes implicados con la tecnología de navegación por satélite.

Como se ha mencionado en anteriores apartados, la tecnología aplicada en este campo crece casi de manera exponencial y uno de las aplicaciones donde más relevancia tiene y, sobre todo tendrá a corto plazo, serán los vehículos autónomos, donde uno de los problemas más importantes y peligrosos de esta tecnología es la pérdida de precisión parcial o total de la señal recibida.

Los vehículos autónomos deben de tener sistemas de posicionamiento por satélite que sean lo más precisos posible. El sistema GPS en la actualidad puede llegar a tener, dependiendo de las condiciones en las que nos encontremos, un error de precisión en torno a un metro o incluso en casos de señal débil varios metros, esto en los vehículos comerciales no supone un gran problema en la mayoría de los casos porque dispone de un conductor capaz de improvisar o ignorar un pequeño error de precisión del sistema, pero en los vehículos autónomos sí que un error de precisión, por pequeño que sea, puede llegar a ser crítico en la conducción.

Por lo tanto, los vehículos autónomos necesitan de una tecnología muy precisa, y en ellos se acoplan un sistema GNSS (generalmente GPS) y radares LIDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) [36]. No vamos a centrarnos en describir cómo funcionan los radares, pero para entenderlo de una manera breve y sencilla, un radar convencional emite ondas de radio que rebotan en los objetos y un LIDAR emite haces de rayos de luz láser infrarroja en vez de ondas de radio.

Como ya hemos mencionado varias veces a lo largo del trabajo, el principal problema de los sistemas GPS es la falta de precisión en condiciones de señal débil como en túneles o zonas de poca cobertura, mientras que en los radares LIDAR el principal problema es que no sea capaz de detectar algún elemento por cualquier razón. Por estos problemas, a estos sistemas se les añaden varias cámaras para mejorar la visión del sistema en conjunto.

Abordando el tema que nos interesa, un grupo de trabajo encabezado por Todd Humphreys, ingeniero aeroespacial de la Universidad de Texas en Austin, ha desarrollado un sistema de software compatible con los procesadores que usan los

vehículos en la actualidad, usando los datos de las estaciones terrestres que mejorarían la cobertura, y permite posicionar un vehículo con un margen de alrededor de 10 centímetros. Con este error tan pequeño se podría mantener el vehículo en su carril sin problemas incluso en condiciones climatológicas adversas como pueden ser las nevadas. En la Figura 7.1, se pueden ver algunas de estas pruebas.

Este equipo, ayudado por la empresa Samsung, empezó su actividad en este campo con el desarrollo de un sistema GPS avanzado para los dispositivos smartphones con una precisión bastante mayor que los actuales. Aunque la idea del proyecto estuvo bien encaminada, el proyecto no pudo continuar por la necesidad de implementar antenas más potentes en los smartphones ya que esto reducía considerablemente la batería del dispositivo además de un coste bastante más elevado para los usuarios. Por estas razones, el implementar este sistema en dispositivos smartphones es más complejo y costoso que hacerlo en el propio vehículo ya que un aumento de cientos o pocos miles de euros en el precio del sistema es más viable en un vehículo que es un dispositivo móvil [36].

En definitiva, cualquier sistema como el descrito a modo de ejemplo que mejore la precisión del sistema GPS, es de vital importancia implementarla en vehículos autónomos y la evolución de estos sistemas marcará la línea a seguir en el futuro desarrollo de estos vehículos.



FIGURA 7.1 Ford probando su coche autónomo sobre la nieve. Fuente [36].

La empresa automovilística BMW ha experimentado un crecimiento importante de cara al vehículo autónomo de acuerdo con la empresa española GMV, a la que se la ha adjudicado un contrato para el desarrollo de una solución para mejorar el problema de

precisión del sistema GPS para la nueva generación de vehículos autónomos de dicho fabricante.

La tecnología GNSS que va a ser aplicada en los vehículos autónomos trata de un software de posicionamiento que permite calcular de manera muy precisa la posición del vehículo, aparte de otras magnitudes, utilizando los datos obtenidos a través de una red global de estaciones de seguimiento que la empresa pondrá a disposición.

Con toda la tecnología aplicada en el vehículo, se pueden aportar otras características como la ciberseguridad, análisis de vulnerabilidades para poder otorgar al vehículo una robustez frente a posibles ciberataques, como los sistemas IDPS (*Intrusion Detection and Prevention System*) [37].

Todas estas características son implementadas en estos vehículos, la unidad telemática de control, ciberseguridad, sistemas GNSS avanzados y apoyados en servicios telemáticos, tal y como se muestra en la Figura 7.2



Estructura del coche autónomo conectado.

FIGURA 7.2 Estructura del coche autónomo conectado. Fuente [37].

Pero la pregunta que nos debemos hacer es: ¿cuándo se generalizará el uso de vehículos autónomos?

Es evidente que gracias al crecimiento de la tecnología cada vez estamos más cerca. Ya se han probado varios prototipos de diferentes marcas pero todavía no es algo que esté completamente implementado, aunque se estima que alrededor del año 2050 ya estaremos más que habituados a verlos circular por nuestras carreteras.

Aunque estrictamente no está implementado como tal el vehículo autónomo, sí que disponemos de algunos sistemas que son propios de estos, como por ejemplo los sistemas que nos ayudan a la hora de aparcar, que nos limitan a partir de una cierta

velocidad u otros sistemas que en definitiva son partes de lo que formaría un sistema autónomo completo.

Es evidente que la capacidad de anticipación, clave en la conducción, es más fiable en un humano que en una máquina. Muchos de nosotros, guiándonos por el navegador que llevamos incorporado en nuestro vehículo, hemos acabado en una zona que no era accesible, siendo la causa en la mayoría de los casos porque los mapas no están actualizados en el sistema. Pero también puede surgir cualquier incidente en la carretera donde el conductor tiene que ser capaz de improvisar o reaccionar rápidamente, independientemente de lo que le indique su navegador.

De todas formas, se han evolucionado y desarrollado mucho estos sistemas para mitigar algunos de los problemas descritos anteriormente, sistemas capaces de imitar capacidades del conductor en lo que se refiere al manejo y control, de estar siempre alerta en el medio que rodea al vehículo y tener la suficiente capacidad como para avisar al conductor de algún imprevisto que haya podido surgir y más si cabe cuando el propio conductor no se ha percatado por alguna circunstancia. Pero ¿sería capaz un vehículo autónomo de realizar todo el trayecto, siendo la única función del conductor la de elegir el destino?

Pues bien, para que el sistema sea lo suficientemente inteligente para poder realizar todo el trayecto sin intervención del conductor son necesarios varios tipos de sistemas interconectados entre sí. Para poder otorgar al vehículo de suficiente independencia respecto al conductor, tiene que ser capaz de localizarse en el entorno, y para ello es fundamental un sistema GNSS muy preciso. También, es necesario un sistema dinámico de reconocimiento del entorno considerando cámaras, sensores, etc. Es algo fundamental y son los “ojos” del sistema, ya que le permite identificar objetos u otros elementos a tiempo real así como poder percibir obstáculos durante el trayecto como peatones, aparte de condiciones climatológicas sensibles para la conducción. Para finalizar, sería necesario un sistema capaz de utilizar la información que le llega a partir de otros sistemas para poder actuar de manera adecuada, el poder acelerar, frenar, adelantar, parar, girar, etc. cuando otro sistema dé la orden correspondiente. Quizás esta sea una de las partes más complicadas de gestionar, ya que requiere de sistemas de inteligencia artificial y *machine learning* (aprendizaje automático) [38].

Sin duda alguna, uno de los principales puntos a favor de los vehículos autónomos es la disminución de la tasa de accidentes. Esto es algo fundamental y de una importancia enorme. Según datos de la DGT (Dirección General de Tráfico), alrededor del 90% de los accidentes de tráfico que ocurrieron en el año 2016 fueron debidos a errores humanos. De estos datos se puede deducir que los sistemas de conducción autónoma disminuirán el número de accidentes y de situaciones complicadas en la carretera como son el exceso de velocidad, adelantamientos peligrosos, salidas del carril o en curva por distracciones, etc. Se estima que en el año 2050, por el uso del vehículo autónomo, los accidentes disminuirán más del 80% [38].

Pero no sólo tendrá esa ventaja de suma importancia, también permitirá nuevas posibilidades a personas con dificultad de movilidad o que tengan algún tipo de impedimento para realizar una correcta conducción.

Otra de las grandes ventajas es que se reducirá considerablemente el tráfico, ya que los vehículos autónomos se colocarán de una manera más eficiente en los carriles y se distribuirán de manera más homogénea a lo largo de la carretera.

También, al emplear una conducción eficiente permite reducir el consumo de gasolina, además de menores emisiones de CO₂ al no efectuar una conducción brusca o agresiva evitando acelerones o frenazos innecesarios.

El conductor puede realizar distintas tareas en dichos vehículos mientras el propio vehículo es el encargado de la conducción.

Ya podemos decir que hoy en día hay algunos vehículos autónomos disponibles en el mercado. Uno de los fabricantes más adelantados en este tipo de vehículos es Tesla, donde ya han empezado a comercializar vehículos con muchas funciones autónomas como el Tesla S.

El fabricante alemán Audi presentó en el año 2017 el Audi Q7, un vehículo autónomo desarrollado junto a la empresa Nvidia, que se basa en inteligencia artificial con su sistema de conducción autónoma llamado PiloNet, como se muestra en la Figura 7.3 [39].



FIGURA 7.3 Audi Q7 autónomo desarrollado junto a Nvidia basado en inteligencia artificial (2017). Fuente [39].

Además, ya algunos modelos superiores y de gran cilindrada del Audi A8 llevan incorporados una tecnología que permite presentarlos como vehículos semiautónomos. La estructura de dicho vehículo se presenta en la Figura 7.4.

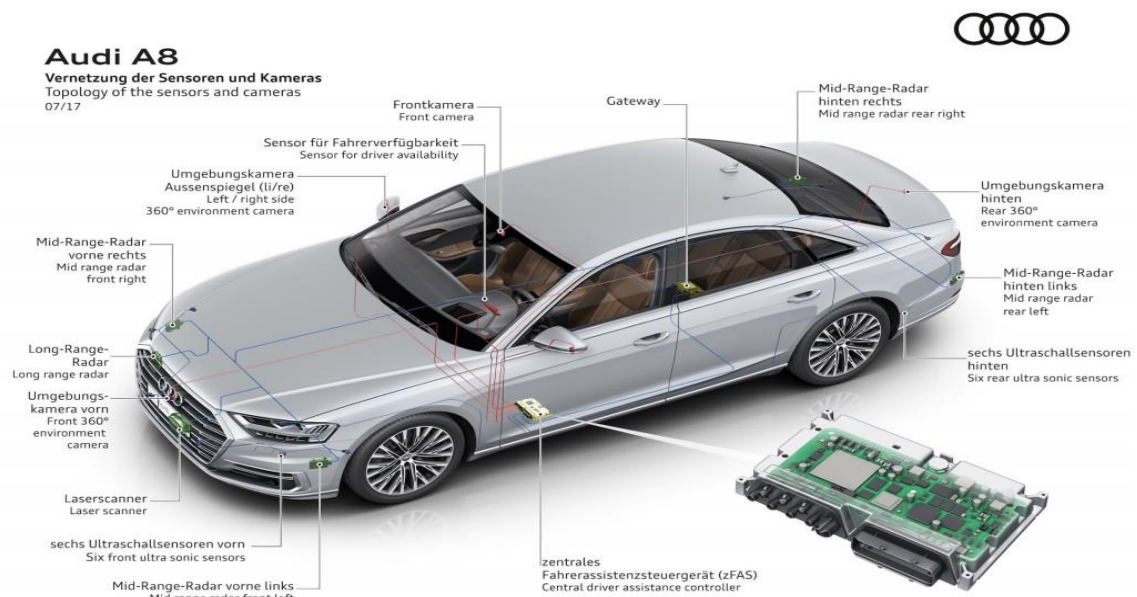


FIGURA 7.4 Estructura del Audi A8 autónomo. Fuente [40].

La multinacional Google también ha trabajado en desarrollar este tipo de sistemas, creando la compañía Waymo especializada en el desarrollo de sistemas de conducción autónoma dentro de Alphabet siendo su principal filial Google.

Aquí en Europa, hace pocos años, se produjo el proyecto “European Truck Platooning Challenge 2016” [38] a modo de prueba de este tipo de sistemas, donde un grupo de vehículos autónomos, en este caso camiones, recorrieron varias carreteras europeas durante varios días. Y en nuestro país, en el año 2015, un vehículo autónomo finalizó con éxito un trayecto de prácticamente 600 kilómetros entre las ciudades de Vigo y Madrid de manera totalmente autónoma con nula intervención del conductor en todo el trayecto [38].

Ahora se va a exponer un estudio práctico de la navegación en vehículos autónomos que siendo utilizados hoy en día, con la evolución tecnológica y el desarrollo en este sector, marcarán la hoja de ruta en el futuro de los automóviles.

7.3 Estimación precisa de la posición de un vehículo autónomo basada en coincidencia de mapas (*Map-Matching*)

La localización es fundamental para cualquier vehículo autónomo, siendo GNSS y los sistemas de navegación inercial INS (*Inertial Navigation System*) vitales para poder controlar la conducción autónoma.

Pero existe un problema empleando este tipo de sistemas: cuando hay una interrupción prolongada de la señal GNSS, se puede producir una deriva en el trayecto.

Este estudio trata de proponer un método de localización precisa utilizando sistemas GNSS, INS y detección de marcadores de carriles, donde el error de deriva puede ser

compensado con la medición del marcador de carril [41]. Tras varias pruebas, se demostró la robustez del método logrando una localización fluida y precisa.

Los sistemas inteligentes de transporte ITS son útiles en la conducción autónoma, permitiendo mitigar algunos problemas actuales, tales como los accidentes de tráfico, atascos y minimizando la contaminación ambiental.

El sistema INS es capaz de estimar la posición del vehículo junto con su orientación, siendo muy utilizado en vehículos autónomos. Además del problema de localización ante una interrupción de la señal GNSS, existe el problema de que no se pueda detectar la marcación del carril ante la ausencia de este. Para poder solucionar ambos problemas, se ha realizado este estudio para la mejora de la posición del vehículo con correspondencia de mapas (*Map-Matching*).

La correspondencia de mapas es un algoritmo capaz de localizar la posición de un vehículo relativo a la hoja de ruta digital. En este estudio se propone por lo tanto, un método para estimar el error de deriva que se produce con los sistemas GNSS/INS utilizando un mapa de marcador de carril digital y de medición de la posición con correspondencia de mapas.

El vehículo autónomo contiene varios sensores para facilitar la conducción autónoma, junto con una sub-batería adicional en el maletero que contiene un mecanismo para poder ser cargada por un alternador.

En este estudio se utilizan dos LIDAR "SICK LMS 291-S05" para la detección de los marcadores de carril colocándose a cada lado del vehículo con visión hacia la carretera. El sensor es capaz de lograr una tasa de escaneo de 38.5 Hz dentro de una distancia de hasta 8 metros y con un ángulo de 100°. La resolución del LIDAR es de 1 mm de distancia y con un ángulo de 0.5°. Además se usa el sistema de antenas GNSS/INS (Applanix POS LV220) para conseguir mayor precisión en la trayectoria del vehículo.

Este sistema se compone de un instrumento de medición de distancia DMI (*Distance Measuring Instrument*), una unidad de medición inercial IMU (*Inertial Measurement Unit*) y dos receptores GNSS que incluyen un sub-sistema de medición GPS/GLONASS, lo cual hace posible obtener la posición del vehículo a 100 Hz por filtrado Kalman (algoritmo que permite estimar variables de estado no observables a partir de variables observables que pueden contener algún error de medición) estrechamente integrado con el sistema GNSS/INS.

Con todo ello, es posible medir la posición del vehículo con una precisión en la posición de 3 cm y un ángulo de 0.05° cuando la señal GPS/GLONASS es visible y puede darse la corrección de señal de navegación cinética satelital RKT (*Real Time Kinematic*), con correcciones en tiempo real. También, el sistema logra una precisión de menos de 0.7 metros tras 1 km de trayecto o un minuto, sin disponer de las señales GPS/GLONASS.

En la Figura 7.5, se muestra la composición de los equipos LIDAR y las antenas GNSS/INS sobre el vehículo en el momento de la prueba.

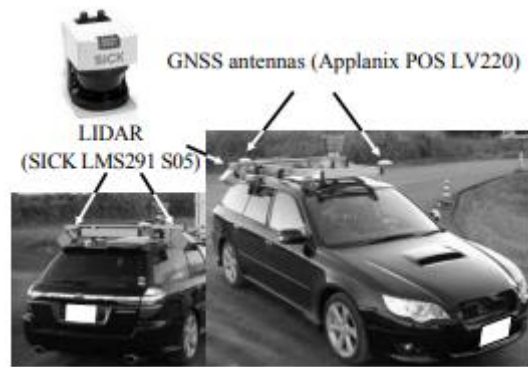


FIGURA 7.5 Visión general de los equipos experimentales. Fuente [41].

El error de deriva GNSS/INS se calcula mediante la medición digital del mapa de carril y la posición del marcador de carril mediante los sensores a bordo. La detección de marcadores de carril se realiza gracias a los equipos LIDAR. Los LIDAR tienen visión hacia abajo, la carretera, para poder detectar los marcadores de carril. Desde estos equipos se pueden medir la distancia y la reflectividad. El marcador de carril se extrae sobre las siguientes características:

- Los marcadores de carril están situados en carreteras planas
- Los marcadores de carril son de manera general, más brillantes que los demás elementos que se encuentran en la carretera.
- El grosor del marcador de carril está dentro de los valores definidos por la Ley de circulación por carretera.

En la Figura 7.6 (a) se muestra un ejemplo de mediciones del LIDAR. Debido a que existe una diferencia entre la reflectividad de un marcador de carril y el material de los otros elementos que componen la carretera, de un patrón bajo-alto-bajo de reflectividad puede ser obtenido el marcador de carril como se expone en la Figura 7.6 (b).

Pero existe el problema de que los otros obstáculos de la carretera, como un bordillo o un bache sean tomados también como un patrón bajo-alto-bajo y se confundan con el marcador de carril.

Para intentar evitar que esto suceda y distinguir entre un obstáculo y un marcador de carril, se considera un obstáculo cuando su pendiente está por encima de un valor umbral. También hay que tener en cuenta que cuanto más lejos se encuentre un obstáculo del vehículo, menor es su reflectividad, como se muestra en la Figura 7.6 (b).

Esto sucede debido a que el ángulo de incidencia del láser con la superficie de la carretera es diferente en función de la distancia y cuanto más se acerque al obstáculo o al marcador de carril, mayor será el ángulo medido. Con lo cual, el marcador de carril, que tiene un patrón de reflectividad bajo-alto-bajo, se detecta teniendo en cuenta esta característica.

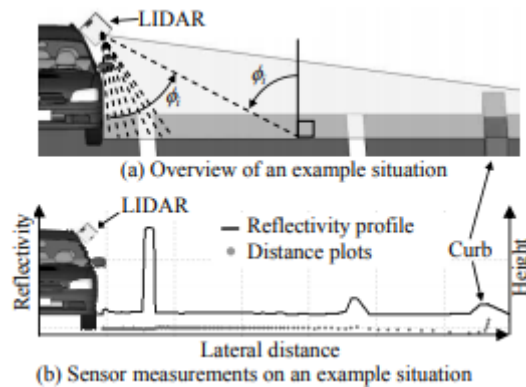


FIGURA 7.6 (a) Vista general del ejemplo expuesto y (b) Mediciones del sensor en la situación del ejemplo expuesto. Fuente [41].

Existen varias fórmulas con las que se calculan el coeficiente de corrección de reflectividad y los parámetros necesarios para controlar dicho coeficiente, además de los distintos grosores de los marcadores de carril junto con los errores obtenidos. Posteriormente, se calcula el umbral de reflectividad promedio, basado en el cambio de reflectividad causado por los distintos ángulos de incidencia del láser. El lector interesado en cómo se calculan los distintos parámetros, puede acudir a la bibliografía.

Para calcular la curvatura del marcador de carril, se puede emplear un filtro Kalman o también se puede estimar, como se muestra en la Figura 7.7, calculando los parámetros mencionados anteriormente.

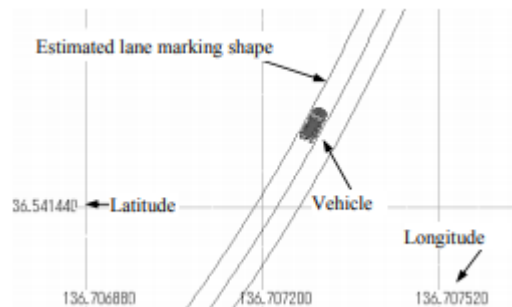


FIGURA 7.7 Estimación del resultado de las alineaciones en las marcas de carril. Fuente [41].

A continuación, el método propuesto trata de realizar correspondencia de mapas estimando el error de deriva GNSS/INS utilizando el mapa de marcador de carril digital, que es conocido a priori, y el carril de medición de la posición con LIDAR.

El marcador de carril se puede medir con LIDAR, además de que el vehículo dispone del sistema de antenas GNSS/INS (Applanix POS LV220), lo que permite obtener la posición y orientación precisas para el vehículo.

Con el mapa de marcador de carril digital, el error de deriva de GNSS/INS en la dirección lateral del vehículo puede calcularse restando la posición del marcador de carril medida por LIDAR, de la posición de GNSS. Pero debido a que el mapa de marcador de carril digital no se actualiza de manera continua, el mapa de marcadores de

carril digital se interpola mediante una curva ‘spline’, que es utilizado en ajuste de curvas para aproximar curvas complicadas.

La posición del vehículo en dirección lateral del mapa de marcador de carril digital es calculado tal y como se muestra en la Figura 7.8.

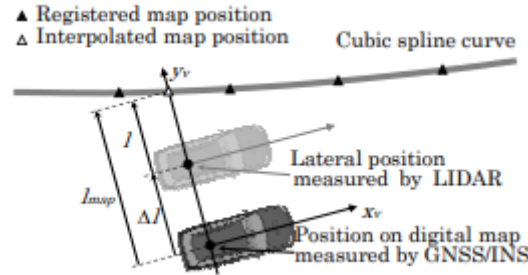


FIGURA 7.8 Cálculo del error de deriva en la dirección lateral del vehículo. Fuente [41].

Para entenderlo mejor, se trata de que el LIDAR calcule una posición lateral del vehículo, mientras que se produce en paralelo el mismo cálculo en el mapa digital generado por el sistema GNSS/INS. Con la diferencia de ambas posiciones calculadas, se puede estimar el error que se produce en el momento de giro del vehículo respecto a la curva tomada, esto se repite en cada marcador de carril para posteriormente calcular el valor promedio de todos ellos.

Sin embargo, el cálculo anterior no siempre es posible de realizar. El error de deriva lateral sólo puede darse cuando el marcador de carril sale en el carril de conducción y el sistema lo puede detectar de manera correcta. El error de deriva longitudinal no se puede obtener por este método, el cual tiene que ser estimado mediante el filtro Kalman.

En la Figura 7.9 se muestra un esquema resumido de la estimación de la desviación, donde se observan los vectores de medición de deriva lateral junto con el de deriva del vehículo. Tras varias operaciones matemáticas, finalmente se obtiene la fórmula que da la posición absoluta medida del vehículo, a partir del vector de error de deriva estimado mediante el sistema GNSS/INS.

En la bibliografía están disponibles las fórmulas matemáticas para realizar los cálculos necesarios utilizando el filtro Kalman.

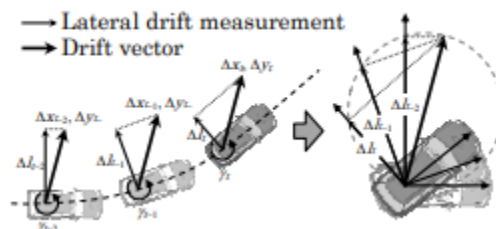


FIGURA 7.9 Vista general de la estimación de la desviación del vehículo. Fuente [41].

Para comprobar la eficacia del estudio realizado, se hicieron algunos experimentos al respecto.

En una primera prueba, el método propuesto fue evaluado en una carretera local como se muestra en la Figura 7.10, donde existe una variedad de elementos interesantes de

cara a la prueba, tales como intersecciones o túneles. La longitud total de la carretera era de aproximadamente 1.8 km. En este primer experimento se generó un mapa de marcador de carril digital utilizando GNSS/INS con señal de corrección RTK, donde la precisión de la hoja de ruta digital en el sistema de coordenadas absoluto, resultaba ser del orden de varios centímetros. Repitiendo el experimento anterior pero sin la señal de corrección RTK, la precisión resultaba ser del orden de varios metros. Tras estas pruebas, se llegó a la conclusión de que el sistema era capaz de estimar la posición del vehículo dentro de un mapa de trazado digital en todo el recorrido.

En la Figura 7.10 (b) se muestra una vista general de la intersección de la carretera evaluada y en la Figura 7.10 (c) el resultado de la prueba en dicha intersección con la posición notificada por GNSS/INS y la del método propuesto.

Como se puede ver en la imagen, la posición original fue notificada cerca del marcador de carril central, pudiendo parecer una posición inexacta ya que el vehículo en la prueba circuló casi en el centro de la carretera. Pero el método propuesto estima correctamente la posición del vehículo prácticamente coincidente con el centro del carril de conducción y por lo tanto se puede concluir que el método propuesto es capaz de localizar de manera precisa la dirección lateral del vehículo.

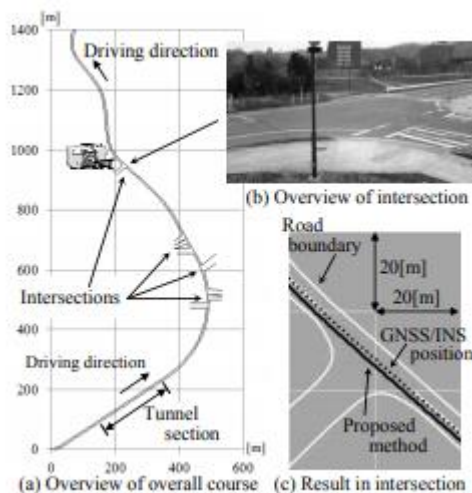


FIGURA 7.10 (a) Resultado de la localización en la carretera local. (b) Vista general de la intersección. (c) Resultado en la intersección. Fuente [41].

Posteriormente, se procedió a evaluar la precisión del método propuesto sobre la misma carretera. En este experimento el cálculo de estimación se realizó a partir de la velocidad longitudinal del vehículo.

En la Figura 7.11 se muestra el resultado de la evaluación de la precisión de la localización. A lo largo de la distancia recorrida, se observa el error absoluto de la posición lateral y longitudinal del vehículo en función de la curvatura de la carretera. El error en la posición lateral es de pocos centímetros a lo largo de todo el trayecto, mientras que el longitudinal si llega a ser de un par de metros en la entrada a algunas curvas. Cuanto mayor es la curvatura de la carretera, mayor es el error de la deriva lateral.

El error absoluto máximo entre el método propuesto y el valor real en la dirección lateral del vehículo fue de unos 13 centímetros, lo que lleva a concluir que el método propuesto puede estimar la posición del vehículo con una gran precisión en la dirección lateral del vehículo autónomo.

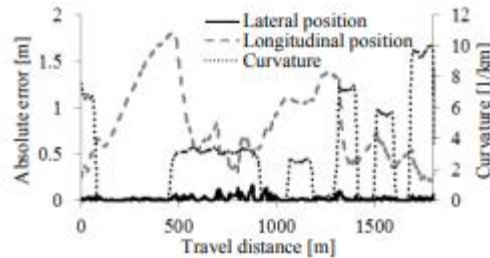


FIGURA 7.11 Precisión de la localización. Fuente [41].

En la Figura 7.12, se observan las trayectorias calculadas de GNSS/INS y la estimada por el método propuesto sobre el mapa de marcador de carril. Se puede confirmar, según la imagen, que la navegación es compensada por el método propuesto ya que tiene un error de desviación de alrededor de 4 metros tras 1.8 km recorridos, teniendo en cuenta que el curveto de la carretera hace que los 1.4 km que se muestran en el eje sean 1.8 km reales.

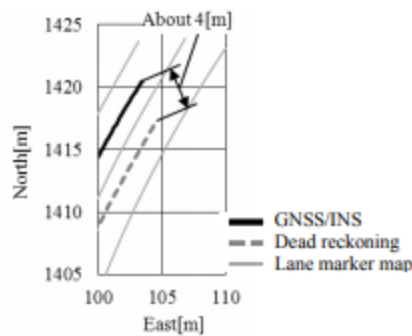


FIGURA 7.12 Comparación de las trayectorias al final del recorrido. Fuente [41].

Con los resultados obtenidos anteriormente, se demuestra que el vehículo es capaz de mantener la posición dentro de un carril de la carretera mientras circula más de 1.8 km sin señal GPS/GLONASS, sólo a partir del método propuesto. Además, se realiza el experimento viajando una distancia mayor que la anterior.

La Figura 7.13 (a) muestra la visión general del recorrido a lo largo de 9 km. La Figura 7.13 (b) muestra la comparación de trayectorias con GNSS/INS y la estimada por el método propuesto sobre el mapa de marcador de carril a lo largo de esos 9 km, y resulta dar un error de desviación de alrededor de 19 metros transcurrida esa distancia.

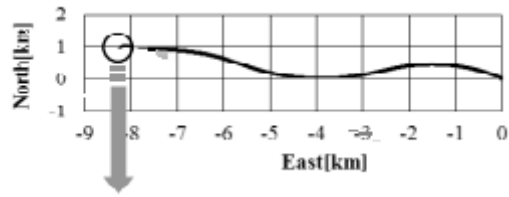


FIGURA 7.13 (a)

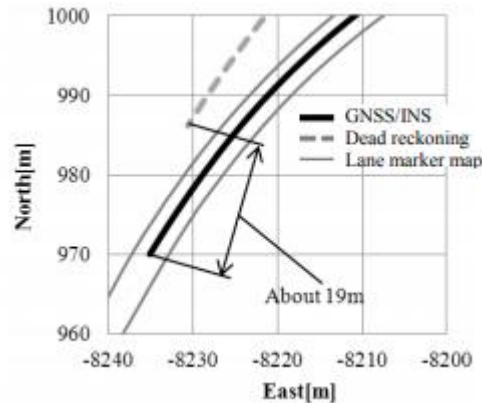


FIGURA 7.13 (b)

FIGURA 7.13 (a) Visión general del recorrido. (b) Comparación de trayectorias con GNSS/INS y la estimada por el método propuesto al final del recorrido. Fuente [41].

En la Figura 7.14 (a) puede verse que las estimaciones de error de deriva lateral es prácticamente igual que los valores reales, incluso tras 9 km de viaje sin el uso de señales GPS/GLONASS. Las Figuras 7.14 (b) y 7.14 (c), muestran el resultado de la estimación del error de deriva longitudinal.

En la Figura 7.14 (b), se muestran las curvas del error de deriva longitudinal estimadas comparándola con los valores reales en función de la curvatura, y debido a que la curvatura de la carretera en ese trayecto no es muy grande, el error de posición en la dirección longitudinal no afecta de manera seria a la conducción autónoma. De forma contraria, un error de deriva longitudinal puede resultar altamente peligroso al circular por un trayecto más sinuoso.

Esto se produce porque, si el error de deriva longitudinal es alto al conducir por una trayectoria curva, la posición del vehículo es reconocida erróneamente como una posición en la que no existe el marcador de carril. Aun así, en el método estudiado en cuestión, las estimaciones se aproximan a los valores reales durante una gran parte del trayecto cuando la curvatura es abierta, suave y constante tal y como se muestra en la Figura 7.14 (c). Sin embargo, en curvas cerradas es más complicado realizar las estimaciones.

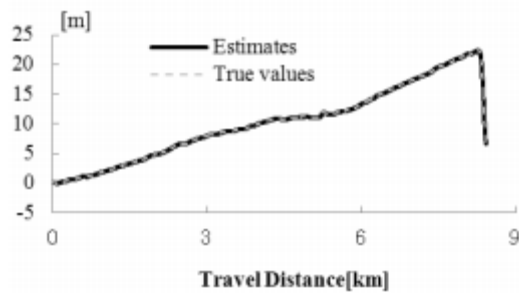


Figura 7.14 (a)

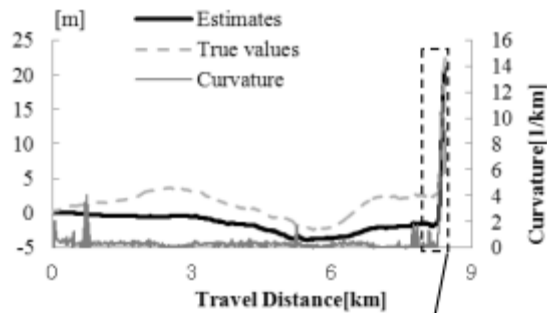


Figura 7.14 (b)

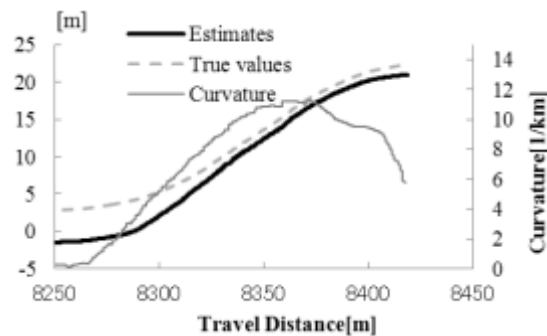


Figura 7.14 (c)

FIGURA 7.14 (a) Error de deriva lateral. (b) Error de deriva longitudinal. (c) Error de deriva longitudinal en una curva abierta. Fuente [41].

A continuación, en la Figura 7.15 se puede observar la trayectoria de navegación del vehículo. En rectángulos grises la trayectoria estimada, y en rectángulos negros la trayectoria corregida en la parte final del recorrido.

Fijándose en ambas trayectorias, se puede confirmar que el vehículo es capaz de mantener la posición corregida dentro de un carril, incluso después de una curva larga sin necesidad de señal GPS/GLONASS. Por todo ello, se puede decir que el método estudiado tiene una fiabilidad para la conducción autónoma para cualquier tipo de trayecto [41].

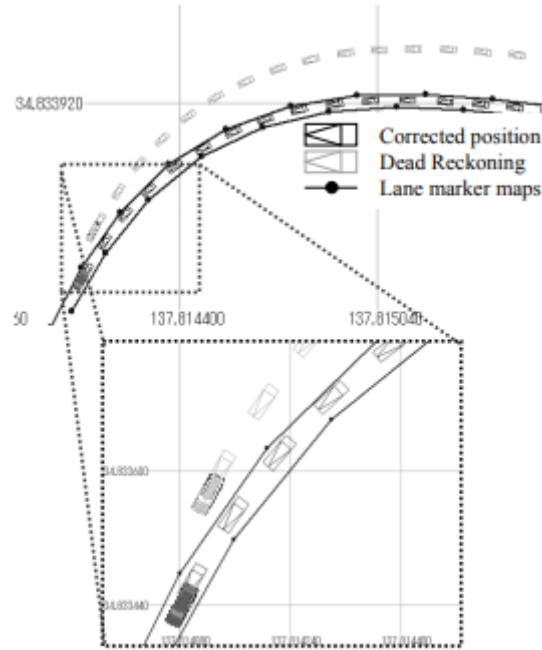


FIGURA 7.15 Trayectorias estimadas y corregidas del vehículo en una curva. Fuente [41].

Como conclusión, en este estudio se ha propuesto un método para localizar con precisión la posición del vehículo estimando el error de deriva GNSS/INS utilizando un mapa de marcador de carril digital, y con la posición del marcador de carril medido por LIDAR.

En resumen, las conclusiones del estudio son:

- El error de deriva de la posición GNSS/INS en la dirección lateral del vehículo, puede ser obtenido a partir de la diferencia entre el marcador de posición del carril medido por LIDAR y la posición que dictamina GNSS/INS, siempre que sea estimado de forma fiable por el filtrado de Kalman.
- El error de deriva de la posición GNSS/INS en la dirección longitudinal, puede ser estimado analizando solamente los valores de la corrección lateral a partir del filtro Kalman. Hay que tener en cuenta que la precisión siempre va a depender de los diferentes tipos de curva que conforman la carretera.
- En el caso de que haya un marcador de carril, la posición del vehículo puede ser estimada dentro de un carril incluso tras haber recorrido una larga distancia sin necesidad de señal GPS/GLONASS, gracias al método estudiado basado en correspondencia de mapas (*Map-Matching*).

En este apartado se ha querido hacer una mención a los vehículos autónomos, ya que se trata de una aplicación muy importante de la navegación con GNSS en la automoción, que tendrá un gran impacto y relevancia en un futuro próximo.

Para finalizar el trabajo, a continuación se dedicará un capítulo de carácter personal en el cual se aportarán las diferentes conclusiones recogidas durante la realización del mismo, así como las líneas futuras de trabajo.

8 Conclusiones y líneas futuras de trabajo

El crecimiento que ha experimentado la tecnología de navegación en los vehículos ha sido vertiginoso. Desde los primeros sistemas de principios del siglo XX, tan rudimentarios, hasta la aparición de la electrónica en la década de 1980, lo que supuso un gran salto cualitativo al permitir el desarrollo de sistemas más precisos y con mayor capacidad de información.

Pero es a partir de 1990, con la aparición del primer sistema GPS usado para navegación en vehículos, cuando se produce un gran salto en el desarrollo de esta tecnología y comienza a extenderse su uso de forma generalizada. Esto ha permitido implementar funciones muy útiles en la navegación, ofreciendo una experiencia en la conducción para los usuarios mucho más cómoda, segura y eficiente. La aparición del sistema GPS, tan mundialmente conocido, fue el precursor de los sistemas de navegación actuales. Luego, en muy pocos años, se han dado pasos gigantescos hasta la aparición de los primeros vehículos autónomos sin necesidad de conductor. Con todo ello se lograrán grandes avances en este sector que abrirán un abanico laboral muy importante en los próximos años, de personal cualificado relacionado con el desarrollo de esta tecnología y sus futuras aplicaciones.

Con la tecnología del navegador que implementa sistemas GNSS, cualquiera que haya conducido o viajado en un vehículo de hace veinte años, ha podido apreciar la evolución que ofrecen los navegadores para la conducción. Los dispositivos son cada vez más precisos y cuentan con mejores resoluciones de pantalla que no requieren el contacto directo con el conductor, evitando así posibles situaciones de peligro. Debido a la necesidad de que los navegadores cuenten con mayor precisión y resolución, se han ido incluyendo sistemas a bordo que interconectan los distintos sensores del vehículo con los elementos mecánicos, para que el navegador, a través de la pantalla, pueda guiar al conductor de manera correcta.

Dentro de Europa, parece que el sistema Galileo será el promotor de las nuevas evoluciones y desarrollos para la navegación en la automoción. Además, se ha pensado que sea complementario con los demás sistemas GNSS, y así poder ser aprovechado por los usuarios de todo el mundo.

En cualquier sistema de comunicación, las antenas son un elemento necesario e indispensable. Cada vez se emplearán antenas más compactas y ligeras que ofrezcan grandes resultados en cuanto a su uso dentro del mundo de la automoción, que puedan ser compatibles con las distintas bandas de frecuencia operables por los sistemas de navegación. Existen varias configuraciones y tipos de antenas a utilizar, lo más importante es encontrar el mejor equilibrio entre las dimensiones, prestaciones y coste. Además, se sigue estudiando el lugar óptimo de colocación en el vehículo sin que interfiera con otros sistemas del mismo, como puede ser la parte baja del parabrisas o el uso de materiales traslúcidos para que no afecte a la visión del conductor.

El crecimiento tecnológico en los sistemas de navegación por satélite permite mejoras cada vez más importantes, también relacionadas con la seguridad. Con el sistema eCall apoyado por Galileo, se pone de manifiesto la importancia de sistemas que no solo

mejoran la experiencia de conducción, sino que se demuestran que esta tecnología es crucial al poder llegar a salvar vidas. La aparición de estas aplicaciones de nueva generación es un elemento fundamental que considerar en el sector de la automoción, como fueron en su momento sistemas como el airbag y el cinturón de seguridad.

La evolución de estas y otras mejoras permite ser optimista de cara a los próximos años, donde se mitigarán los problemas de precisión en zonas de baja o nula cobertura, que es el punto débil de cualquier sistema de navegación con los que contamos actualmente. Esto posibilitará el crecimiento de los vehículos autónomos, que acapararán el futuro en la conducción.

Ya existen modelos actuales con capacidad autónoma, donde el objetivo que se persigue es precisamente una mayor seguridad en la conducción. El hecho de posibilitar la ausencia de pasajeros en el vehículo evita accidentes en el que se pierdan vidas humanas. No es un proceso fácil, ya que hay que tener en cuenta muchas variables difíciles de prever y en las cuales el vehículo debe tener la capacidad de reacción suficiente como para evitar o minimizar el accidente que se pueda producir. Estos vehículos utilizan los diferentes elementos de la carretera, que, junto con los datos obtenidos del sistema de navegación por satélite, tienen la capacidad de corregir los errores de precisión que se producen y así lograr una conducción adecuada.

Es seguro que en el diseño de las futuras carreteras y autopistas se implementarán nuevos marcadores de ayuda a la conducción autónoma, para que esta sea extremadamente segura.

No obstante, quedan pendientes asuntos tales como la responsabilidad en caso de accidentes y las consecuencias legales de ello.

Queda claro que los vehículos autónomos, tanto coches como trenes o aviones, han llegado para quedarse y serán la forma habitual de desplazamiento en un futuro no muy lejano.

Como trabajo futuro se propone un seguimiento de esta tecnología aplicada al transporte. Además, con la aparición de los vehículos autónomos, se pueden realizar trabajos dedicados a estudiar su funcionamiento y los sistemas de navegación por satélite sobre los que se apoyan, para que sean más seguros y eficientes.

Entre los ejemplos de aplicaciones GNSS en el transporte, destacan la construcción de un túnel submarino de 18 kilómetros entre Alemania y Dinamarca. Se trata de un megaproyecto europeo que se basa en GNSS para guiar los movimientos de tierra durante la construcción del túnel, que permitirá viajar en coche o en tren a través del mismo con un tiempo estimado de tan sólo siete a diez minutos. El proyecto tendrá una inversión de 7000 millones de euros y se espera que esté finalizado en nueve años [42].

También la compañía ferroviaria francesa SNCF (Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses), está adoptando la tecnología Galileo. En particular, en su red TGV (Tren de Gran Velocidad), que es el servicio ferroviario de alta velocidad interurbano de Francia, lo que está permitiendo localizar trenes de forma precisa y segura, contribuyendo a la evolución futura del Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario ERTMS (*European Rail Traffic Management System*). ERTMS tiene como objetivo armonizar

los sistemas de señalización en toda Europa, y Galileo puede ayudar a reducir sus costes.

La geolocalización de alta precisión es un elemento clave para posibilitar la autonomía en todos los modos de transporte y los futuros sistemas de movilidad. Por ejemplo, en el sector ferroviario, la autonomía puede aumentar la densidad de trenes que operan en la red mejorando la seguridad, con un impacto económico muy importante en la optimización de las infraestructuras. El objetivo es transportar un mayor número de personas y/o mercancías, con mayor regularidad, mayor eficiencia energética y con un mejor rendimiento económico, garantizando al mismo tiempo altos niveles de seguridad [43].

Tal y como se ha visto, los sistemas de navegación por satélite ofrecen un futuro lleno de posibilidades para los ingenieros de telecomunicación, siendo un sector multidisciplinar en el que existen muchas áreas de ocupación relacionadas con ellas, tanto HW como SW, e incluso técnico-comerciales: diseño de sensores, especialistas en seguridad, empresas dedicadas a la visión artificial, actividades en la oferta de servicios de las diferentes aplicaciones, actividades en organismos de regulación e incluso agencias internacionales como la ESA.

Así por ejemplo, el sistema europeo Galileo ofrecerá oportunidades para las pequeñas y medianas empresas (PYME), las cuales representan el 99% del comercio en Europa [8]. La investigación en materia de navegación por satélite ha atraído a numerosas PYME, y el mercado de aplicaciones ofrece un alto potencial de crecimiento. Las PYME europeas también están entrando en el mercado de receptores, tradicionalmente acaparado por las grandes empresas.

Para el año 2025, se prevé que el mercado para servicios de posicionamiento y navegación por satélite en Europa alcance los 135000 millones de euros [8]. El mayor mercado mundial estará ubicado en el Lejano Oriente, y contará con cientos de millones de receptores que se venderán al público en general. La industria europea de aplicaciones, presente ya en muchas zonas del Lejano Oriente, podrá aumentar la cuota de mercado, aprovechando las nuevas oportunidades que ofrece Galileo.

Los próximos años son claves para el desarrollo de una tecnología que revolucionará la vida de las personas tal y como sucedió con la aparición de Internet o la telefonía móvil, tecnologías complementarias de los sistemas GNSS que posibilitan ofrecer mejoras y nuevas aplicaciones en vehículos. Un conocimiento previo de esta tecnología aplicada a la automoción otorgará una ventaja competitiva que permitirá conocer las posibilidades de desarrollo profesional que se ofrecen en España y en todo el mundo.

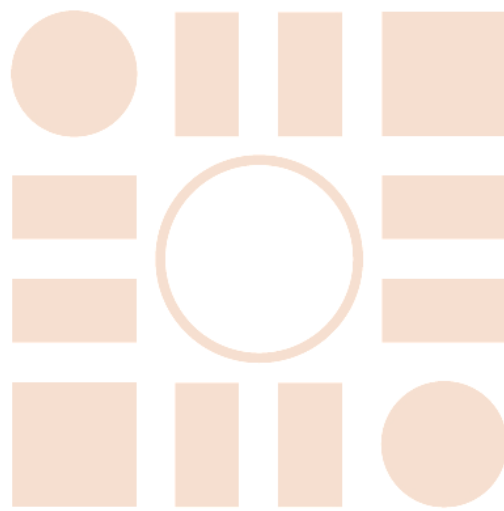
Bibliografía

- [1] A. Aguilera, "La historia de los navegadores GPS de los coches comenzó hace más de 100 años" May 02, 2019. <https://bit.ly/3fE00E6> (accessed 2021).
- [2] J. Arenas, "El navegador GPS y sus ancestros: así eran los asistentes de ruta del siglo pasado" Oct. 27, 2019. <https://bit.ly/3uwZ6NT> (accessed 2021).
- [3] M. Arai, Y. Nakamura and I. Shirakawa, "History of development of map-based automotive navigation system 'honda electro gyroator'" 2015 ICOHTEC/IEEE International History of High-Technologies and their Socio-Cultural Contexts Conference (HISTELCON), 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/HISTELCON.2015.7307318.
- [4] "Teoría de Navegación" <https://bit.ly/3cqD0Gn> (accessed 2021).
- [5] "Garmin Drive 51 LM. Entry-level GPS navigator with driver alerts" <https://bit.ly/2Txj1PW> (accessed 2021).
- [6] "GPS" [Online]. Available: <https://bit.ly/2RY81dR> (accessed 2021).
- [7] B. Straub, "Innovative display applications for future automobiles" 2017 24th International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Devices (AM-FPD), 2017, pp. 24-27.
- [8] "Programas europeos de navegación por satélite. Galileo y EGNOS" Luxemburgo: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas, 2008. <https://bit.ly/2TzxXNz> (accessed 2021).
- [9] "Space Segment" Mar. 16, 2021. <https://bit.ly/3wCTeUG> (accessed 2021).
- [10] "Los 24 satelites – GPS" <https://bit.ly/2TxDFzl> (accessed 2021).
- [11] J. Susanna, "Los ojos de Galileo: aquí se controlan los satélites del GPS de Europa" Jun. 09, 2019. <https://bit.ly/3vFnPAG> (accessed 2021).
- [12] T. Reynolds, "EGNOS, European Superiority, and the Need to Get 'Very, Very Busy'" Mar. 31, 2014. <https://bit.ly/3ij98jh> (accessed 2021).
- [13] "Technical Stuff" <https://bit.ly/3uwmJWM> (accessed 2021).
- [14] J. Darrozes and M. Zribi, "The Reflected Global Navigation Satellite System (GNSS-R): from Theory to Practice" 2016. <https://bit.ly/3fV5toR> (accessed 2021).
- [15] GMV, "GLONASS Space Segment" 2011. <https://bit.ly/3uBywmO> (accessed 2021).
- [16] "Antena de GPS y Sistemas GPS Mejorados" Oct. 18, 2019. <https://bit.ly/3c6lS8F> (accessed 2021).

- [17] J. C. Sepúlveda Suárez, “Sistema de Global de Navegación Satelital (GNSS) ‘Una Mirada al Estado del Arte Actual’” May 28, 2019. <https://bit.ly/3fZuajU> (accessed 2021).
- [18] V. Rivero Díez, “Spoofing and jamming over GNSS” Sep. 07, 2020. <https://bit.ly/3fRGmmQ> (accessed 2021).
- [19] A. A. Salih and D. N. Aloï, "Design of a Compact GNSS Antenna for Vehicular Applications" 2018 IEEE International Conference on Electro/Information Technology (EIT), 2018, pp. 0759-0763, doi: 10.1109/EIT.2018.8500279.
- [20] I. Goncharova and S. Lindenmeier, "A compact satellite antenna module for GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou and SDARS in automotive application" 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), 2017, pp. 3639-3643, doi: 10.23919/EuCAP.2017.7928117.
- [21] M. Wnuk and L. Nowosielski, "Car microstrip GPS antenna" 2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), 2017, pp. 444-448, doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293179.
- [22] P. Thimm, R. Batra and M. Kuhn, "Design and integration of high precision GPS/GNSS antennas for modern cars" 2017 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, 2017, pp. 857-858, doi: 10.1109/APUSNCURSINRSM.2017.8072471.
- [23] A. Rodríguez, “Mejorando los sistemas de navegación por satélite en vehículos” Aug. 25, 2017. <https://bit.ly/3i265M5> (accessed 2021).
- [24] J. Mendiola, “Te contamos qué es GPS 3 y qué mejoras presenta” Sep. 19, 2019. <https://bit.ly/3wPNAyH> (accessed 2021).
- [25] “Modernización del GPS y las nuevas señales”. <https://bit.ly/3p4RWPL> (accessed 2021).
- [26] J. Ranchal, “Arranca Galileo, el GPS europeo” Dec. 15, 2016. <https://bit.ly/3yStDJm> (accessed 2021).
- [27] “La llamada de emergencia eCall, obligatoria en los coches nuevos” Apr. 13, 2018. <https://bit.ly/2RdmrXi> (accessed 2021).
- [28] R. Oorni and A. Goulart, "In-Vehicle Emergency Call Services: eCall and Beyond" in IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 1, pp. 159-165, January 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600289CM.
- [29] D. Murias, “Cómo funciona la llamada de emergencia automática eCall (obligatoria en los coches nuevos el 1 de abril)” Mar. 21, 2018. <https://bit.ly/3fytao2> (accessed 2021).
- [30] “Un ángel guardián digital: eCall será obligatorio a partir de marzo de 2018” Mar. 21, 2018. <https://bit.ly/3wJTt0b> (accessed 2021).

- [31] "Cómo es el sistema eCall en motocicletas". <https://bit.ly/2TmxUEq> (accessed 2021).
- [32] E. K. Markakis, A. Lykourgiotis, I. Politis, A. Dagiuklas, Y. Rebahi and E. Pallis, "EMYNOS: Next Generation Emergency Communication" in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 139-145, January 2017, doi: 10.1109/MCOM.2017.1600284CM.
- [33] L. Lin, W. Xinghao, Z. Yongxin and Q. Jifan, "A Car Security System Based on Internet +GPS" 2019 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Big Data (ICAIBD), 2019, pp. 291-294, doi: 10.1109/ICAIBD.2019.8836969.
- [34] H. S. Kim, J. B. Park and Y. H. Joo, "A position accuracy enhancement algorithm for a low-cost GPS receiver under distance boundary consideration" 2016 International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE), 2016, pp. 83-86, doi: 10.1109/ICRAE.2016.7738794.
- [35] H. Onishi, K. Yoshida and T. Kato, "GNSS vulnerabilities and vehicle applications" 2016 13th Workshop on Positioning, Navigation and Communications (WPNC), 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/WPNC.2016.7822853.
- [36] J. Valero, "¿Es posible que un sistema GPS para coches tenga una precisión de centímetros?" Sep. 02, 2016. <https://bit.ly/3vDOPRI> (accessed 2021).
- [37] J. Ferrari, "BMW avanza en el coche autónomo: posición GPS al milímetro con una empresa española" Sep. 03, 2019. <https://bit.ly/3vDjQVs> (accessed 2021).
- [38] E. Fernández, "Coches que nos llevan" Jan. 14, 2018. <https://bit.ly/2R8ljE9> (accessed 2021).
- [39] J. Lee, "Audi to work with Nvidia on AI; new A8 to get Level 3 autonomous driving, next-gen Audi virtual cockpit" Jan. 06, 2017. <https://bit.ly/3uzfc9z> (accessed 2021).
- [40] "Audi gives up on Level 3 autonomous driver-assist system in A8" Apr. 28, 2020. <https://bit.ly/2TxFBI7> (accessed 2021).
- [41] N. Sukanuma and T. Uozumi, "Precise position estimation of autonomous vehicle based on map-matching" 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), 2011, pp. 296-301, doi: 10.1109/IVS.2011.5940510.
- [42] T. Cozzens, "GNSS to assist construction on tunnel from Germany and Denmark" Mar. 04, 2020. <https://bit.ly/3cdGdcl> (accessed 2021).
- [43] T. Cozzens, "French railways embrace Galileo to boost customer service" Sep. 03, 2019. <https://bit.ly/34Ex5JB> (accessed 2021).

Universidad de Alcalá
Escuela Politécnica Superior



ESCUELA POLITECNICA
SUPERIOR



Universidad
de Alcalá