



Planes de contingencia GNSS a largo plazo

Ignacio Durán Luque

Marzo 2020

Índice

ÍNDICE	2
TABLA DE ILUSTRACIONES	4
ÍNDICE DE TABLAS	5
CAPÍTULO 1	6
INTRODUCCIÓN	6
1.1. GNSS en PBN	6
1.2. Objetivo	7
1.3. Alcance	8
CAPÍTULO 2	9
ESTADO DEL ARTE	9
2.1. GNSS	9
2.1.1. GPS	11
2.1.2. GLONASS	11
2.1.3. GALILEO	12
2.2. Sistemas de aumentación	14
2.2.1. EGNOS	14
2.3. Requisitos OACI	14
2.4. Vulnerabilidades	16
2.4.1. Jamming	16
2.4.2. Spoofing	16
CAPÍTULO 3	17
ANÁLISIS PREVIO A LA EXPOSICIÓN DE SOLUCIONES	17
CAPÍTULO 4	18
ELORAN	18
4.1. Antecedentes	18
4.2. Funcionamiento	19
4.3. Estado de desarrollo	21
4.4. Relación con el ámbito aeronáutico	21
4.5. Performance	21
4.6. Aplicabilidad	22
4.7. Conclusiones	23

CAPÍTULO 5	25
5G	25
5.1. Antecedentes	25
5.2. Funcionamiento	26
5.3. Estado de desarrollo	27
5.4. Relación con el ámbito aeronáutico	27
5.5. Performance	28
5.6. Aplicabilidad	28
5.7. Conclusiones	29
CAPÍTULO 6	30
NAVEGACIÓN BASADA EN IMÁGENES	30
6.1. Antecedentes	30
6.2. Funcionamiento	31
6.3. Estado de desarrollo	32
6.4. Relación con el ámbito aeronáutico	32
6.5. Performance	33
6.6. Aplicabilidad	33
6.7. Conclusiones	33
CAPÍTULO 7	34
OTRAS SOLUCIONES	34
7.1. e-DME	34
7.2. Mosaic/DME	34
7.3. LDACS-NAV	34
7.4. WAM	35
CAPÍTULO 8	36
CONCLUSIONES	36
REFERENCIAS	38

Tabla de Ilustraciones

ILUSTRACIÓN 1: SEGMENTO DE CONTROL GPS	10
ILUSTRACIÓN 2: SEÑAL GPS	10
ILUSTRACIÓN 3: OBTENCIÓN DE POSICIÓN GNSS	11
ILUSTRACIÓN 4: ÁREA DE COBERTURA ELORAN	23
ILUSTRACIÓN 5: ESTACIONES ELORAN EN NORTEAMERICA	24
ILUSTRACIÓN 6: OTDOA	26
ILUSTRACIÓN 7: VEHICLE TO EVERYTHING LINKS	29
ILUSTRACIÓN 8: TRN	31
ILUSTRACIÓN 9: DISTRIBUCIÓN MULTIMODAL	31
ILUSTRACIÓN 10: DISTRIBUCIÓN MONOMODAL	31
ILUSTRACIÓN 11: DSMAC	32
ILUSTRACIÓN 12: MULTILATERACIÓN LDACS	35

Índice de tablas

TABLA 1: PRESTACIONES GPS	11
TABLA 2: PRESTACIONES GLONASS	12
TABLA 3: PRESTACIONES GALILEO	13
TABLA 4: PRESTACIONES EGNOS	14
TABLA 5: PBN	15
TABLA 6: EGNOS VS PBN	15
TABLA 7: PRESTACIONES LORAN-C	19
TABLA 8: PRESTACIONES ELORAN	22
TABLA 9: REQUISITOS NPA	22
TABLA 10: REQUISITOS RNP 0.3	22
TABLA 11: PRESTACIONES 5G	28
TABLA 12: COMPARACIÓN PRESTACIONES	36

Capítulo 1

Introducción

El problema de conocer la posición ha sido inherente a la aviación desde sus comienzos. Por ello nunca se ha cesado en una búsqueda continua de una solución que mejorase a la anterior, desde la navegación visual y el uso de instrumentos básicos de navegación, pasando por las radioayudas basadas en tierra, hasta el uso de la navegación por satélite en los últimos años.

El coste del despliegue de radioayudas y su mantenimiento, unido a las ventajas que proporciona el uso de una solución global de navegación, han impulsado el desarrollo de la navegación GNSS. Esta será el medio primario de navegación aérea en el medio y largo plazo. Sin embargo, al igual que el uso de un único medio de navegación trae consigo una serie de ventajas, su principal inconveniente es la posibilidad de pérdida total de la señal de navegación. Pueden darse fallos que se produzcan por parte del propio sistema, es decir, no intencionados, así como fallos generados por agentes externos, mediante el uso de técnicas tales como *jamming* o *spoofing*.

El fallo no intencionado en el sistema puede deberse tanto a fallos en el segmento espacial de este, en los satélites; así como problemas en la propagación de la señal debido a características propias del medio, como la presencia de obstáculos, lo cual puede parecer carecer de sentido para la fase de ruta de un vuelo comercial pero cobraría gran importancia en la navegación dentro de las ciudades, donde se espera que se desplieguen servicios RPAS en un futuro próximo. Un ejemplo de fallo en el segmento espacial se dio en el sistema GNSS europeo, Galileo, cuando a mediados de julio de 2019 se produjo una caída

del sistema durante una semana completa quedando fuera de funcionamiento 24 de los 26 satélites entonces en órbita. Dicho fallo fue debido a un problema técnico en los centros de control y monitorización de los satélites. [1]

Por su parte, los fallos en el sistema provocados por agentes externos pueden deberse a cuestiones de seguridad en materia de defensa, intereses económicos o motivaciones bélicas. Se han dado casos de denuncia de perturbación de la señal, como sucedió en Israel también en julio de 2019, momento en el que la Autoridad Aeroportuaria Israelí dio la recomendación a los pilotos de no utilizar GNSS cuando se aproximen a su territorio, debido a la detección de ciertas anomalías en la señal que generaban graves desviaciones en cuanto a la precisión. [2]

Considerando la posibilidad de que se pierda la señal de navegación proveniente del GNSS, siendo esta planteada como la única solución de navegación *gate-to-gate*, desde el despegue en el origen hasta el aterrizaje en el destino, en un futuro próximo, se antoja necesario definir algún medio de navegación que pueda actuar como *backup*. En caso de fallo en el GNSS, este debe ser capaz de suplirle cumpliendo con los requisitos que exijan las operaciones y ocasionando el menor perjuicio posible en el usuario.

1.1. GNSS en PBN

Este estudio surge de la necesidad de introducir sistemas tanto terrestres, como espaciales y embarcados, capaces de dar soporte a los estándares PBN definidos actualmente, así como a otras operaciones basadas en CNS y

proporcionar un *backup* que cumpla con los requisitos de performance definidos en caso de degradación, corrupción, pérdida o ausencia de la señal GNSS.

Actualmente la OACI está centrada en la transición hacia entornos PBN, lo que incluye RNAV y RNP. El documento en el que se definen las especificaciones y se proporciona la guía para la implementación de la Aplicación de Navegación Basada en Prestaciones es el Manual PBN de OACI (Doc 9613). La visión general de OACI sobre PBN puede describirse como la transición de navegación de área no PBN a PBN RNAV para luego pasar del usos extendido de aplicación RNAV a la aplicación RNP.

En RNP el GNSS es la fuente primaria de provisión de la localización, utilizada para la monitorización de prestaciones y alerta, por lo que el correcto funcionamiento de estas tareas recae sobre la integridad de GNSS. A pesar de esto, no está suficientemente desarrollada la información relativa a pérdidas de servicio GNSS durante la operación. Es por esto que el Grupo de Estudio PBN plantea la adición al Manual PBN de una guía para casos de contingencia, en los que se pierda la señal GNSS, estableciendo una infraestructura de ayudas a la navegación complementarias.

También se debe considerar que el mero hecho de que existan alternativas a la fuente de navegación primaria GNSS que permitan continuar con las operaciones sin ver perjudicados la seguridad y el rendimiento reducirá considerablemente la motivación de agentes externos de alterar la señal a través de técnicas como *jamming* o *spoofing*.

Para el problema que se plantea, una solución RNAV APNT sería aceptable e incluso, en ciertas localizaciones, una solución de navegación convencional sería aceptable.

En el corto plazo se han considerado soluciones basadas en tecnología actualmente desarrollada e infraestructura de navegación existente. Entre estas soluciones se contempla el uso de DME, VOR e ILS.

A más largo plazo, objeto de estudio de este trabajo, los esfuerzos de investigación se centran en sistemas que proporcionen soluciones que permitan el desarrollo de las operaciones con el menor perjuicio posible respecto al uso de GNSS, mejorando las prestaciones obtenidas del uso de sistemas tradicionales como los mencionados en el anterior párrafo como soluciones a corto plazo.

1.2. Objetivo

El objetivo final del presente proyecto es la realización de un análisis a alto nivel sobre diferentes soluciones que puedan funcionar como *backup* del GNSS. Se presentan en el documento distintas soluciones con el fin de cubrir los requisitos de performance exigidos para diferentes operaciones y tipos de aeronave.

Los medios de navegación que se exponen son propuestos para casos de contingencia o si se diera el caso de que mejoraran las prestaciones del GNSS, sustituirlo en un futuro. Puesto que el estudio está enfocado en el largo plazo, la mayoría de tecnologías expuestas no se encuentran completamente desarrolladas.

La condición indispensable que deben cubrir las soluciones propuestas es el cumplimiento de los requisitos de precisión, integridad, continuidad y disponibilidad; además de ser menos vulnerables perturbaciones en la señal que el GNSS. No obstante, existen otras condiciones importantes como el despliegue de medios necesarios para su implementación o el mantenimiento requerido por parte del sistema, que convendría que fuera el menor posible para un sistema de soporte.

1.3. Alcance

Tras realizar un análisis sobre el estado del arte y vulnerabilidades del sistema GNSS, se explorarán posibles soluciones y se desarrollarán desde el enfoque de un análisis a alto nivel. De las soluciones se estudiarán características y certificación.

En lo referente al Estado del Arte se comenzará analizando los sistemas GNSS actuales. De estos se estudiarán sus características, su área de aplicación y los servicios que proveen, así como una comparación entre ellos. Puede ser de interés focalizar en los nuevos y futuros servicios de Galileo que presentará el servicio civil GNSS de mayores prestaciones del mercado.

Los sistemas de aumentación también juegan un papel fundamental a la hora de cumplir con los requisitos GNSS de OACI en determinadas fases de vuelo para ciertos servicios GNSS, por lo que también se repasarán aumentaciones embarcadas, espaciales y terrestres.

Por último, también se deberá analizar en el estado del arte la performance de los distintos sistemas GNSS, así como de su uso conjunto con las distintas aumentaciones, comparándolos con los requisitos GNSS de OACI. Serán de interés los indicadores de performance que den información sobre ocurrencia de fallos, pues sería cuando actuarían los planes de contingencia.

Las vulnerabilidades y situaciones de contingencia que puedan darse serían el siguiente punto de estudio una vez analizado el Estado del Arte. Se estudiarán las interrupciones o fallos en el servicio que se produzcan por parte del propio sistema (no intencionados) así como los que sean provocados de manera intencionada.

Un análisis de los diferentes modos de fallo para cada una de las fases de vuelo permitirá evaluar posibles modos de actuación para cuando

se produzcan estos fallos. A partir de aquí se analizarán distintos sistemas que puedan utilizarse en caso de fallo en el servicio GNSS.

Se examinarán un conjunto de sistemas que puedan proporcionar la posición en lugar del GNSS, como posibles soluciones. Al ser un planteamiento a largo plazo, se podrá profundizar en cada uno de los sistemas de forma proporcional a como se encuentra de desarrollada dicha tecnología hoy día y/o los estudios que se hayan realizado sobre ello.

Entre las diferentes soluciones, en un primer momento se ha planteado estudiar las siguientes:

- **eLORAN**: evolución de LORAN C que se encuentra en actual desarrollo en los EEUU como backup para GPS.
- **5G**: posicionamiento utilizando las antenas de telefonía de 5G. Posible solución para zonas urbanas y UAVs.1
- **Reconocimiento de imágenes**: tecnología militar con posible implantación en la aviación civil, consistente en el reconocimiento del entorno donde se vuela.

Además se expondrán brevemente un conjunto de soluciones menos desarrolladas pero consideradas de interés para el presente estudio.

Para cada una de las soluciones se debe estudiar tanto sus prestaciones como su posible certificación, aunque esta última no es objeto de estudio del presente trabajo. Según las necesidades de cada fase de vuelo, los modos de fallo y las prestaciones de los sistemas planteados para proporcionar soluciones, se puede analizar las soluciones más realizables y apropiadas para cada caso. Las dos más desarrolladas en el documento son eLORAN y 5G, las más tangibles y en las que más se está investigando por parte de las diferentes empresas y organismos de todo el mundo.

Capítulo 2

Estado del Arte

Tratando de sentar las bases de las que se ha partido, este capítulo recoge brevemente el estado del arte de los principales sistemas que componen los GNSS actuales o próximos con sus características de performance, los sistemas de aumentación y las prestaciones que se obtienen de su aplicación, los requisitos OACI para cada fase de vuelo y por último las vulnerabilidades del sistema, haciendo especial énfasis en los ataques intencionados hacia este.

2.1. GNSS

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) es el término general para referirse a cualquier constelación de satélites que provee de servicios de posicionamiento, navegación y tiempo (PNT) con un alcance global o regional. Estos satélites orbitan a una altura media de unos 20 000 km desde la cual transmiten su posición y velocidad, sus efemérides.

Estos sistemas surgieron como una solución global de navegación, mejorando y superando en rango a las tecnologías para la navegación de largo rango existentes por entonces. Su origen se remonta a la primera puesta en órbita de un satélite artificial, el Sputnik I, en 1957 por parte de la Unión Soviética. Las señales emitidas por este podían utilizarse para fijar su posición y su órbita y se pensó en la posibilidad de utilizar esta función de forma recíproca, es decir, que permitiese conocer la posición del receptor en tierra conociendo la del satélite. Este hecho sucedió en plena guerra fría y con la carrera espacial comenzada, lo que motivó a EEUU a dedicar muchos esfuerzos en el desarrollo de esta tecnología. Tras varios proyectos previos con pobres resultados (TRANSIT y TIMATION)

finalmente a través de la creación del comité NAVSEG (Navigation Satellite Executive Committee), se define un nuevo concepto: NAVSTAR-GPS. Este incorporaba mejoras tecnológicas y fijaba una configuración 24 satélites. Así, en 1974 es puesto en órbita el primer satélite GPS, llegando a su capacidad operativa plena en la década de los 90. [3]

Aunque el GPS fue el primer sistema GNSS, pronto le siguieron otros sistemas desarrollados por las principales potencias mundiales. El principal perseguidor de EEUU en el desarrollo de esta tecnología, la Unión Soviética, comienza con el desarrollo de su propio sistema, GLONASS, en la década de los 80 poco después del primer lanzamiento de un satélite GPS. Por su parte, Europa decidió crear su propio sistema de navegación por satélite, GALILEO, a principios de la década de los 2000. Mientras, China también comenzó a desarrollar BEIDOU, que proporciona cobertura global a través de 35 satélites. Existen otros sistemas GNSS regionales como IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System) o QZSS (Quasi-Zenith Satellite System), que complementa al GPS y mejora la cobertura de este en Asia Oriental y Oceanía. [4]

Los sistemas GNSS se componen de tres segmentos, segmento espacial, segmento de control y segmento usuario; que permiten la manipulación, control y mantenimiento de los sistemas, monitorizar su salud y vigilar sus transmisiones. El segmento espacial consiste en una constelación de satélites transmitiendo señales radioeléctricas a los usuarios. [5]

El segmento de control consiste en una red de dependencias basadas en tierra que realizan el

seguimiento de los satélites, monitorizan sus señales, analizan su performance y envía comandos y datos a la constelación. Actualmente el segmento de control está compuesto de una estación maestra, otra alternativa, 11 antenas de control y comando y 16 puestos de monitorización. [6]

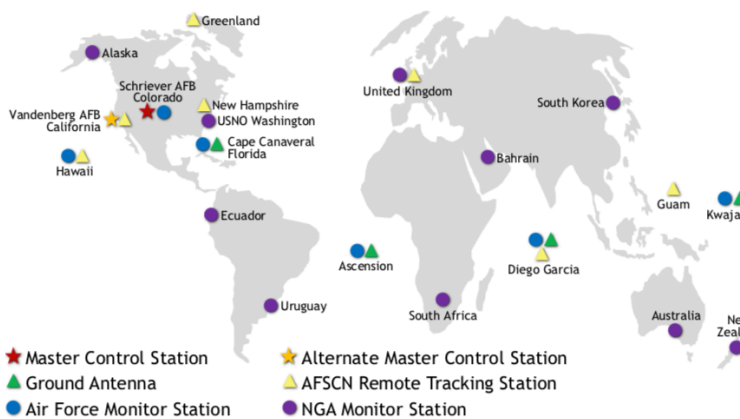


Ilustración 1

[6]

Por último, el segmento usuario consiste en el equipo receptor de la señal procedente del satélite y que a través de esta es capaz de determinar la posición tridimensional así como la hora precisa. [7]

En cuanto a la señal GNSS, esta consiste en ondas electromagnéticas pertenecientes a la banda L, para el caso concreto del GPS. La fuente de frecuencia es generada por el oscilador y a partir de la frecuencia nominal instalada, se generan el conjunto de portadoras y códigos que conforman la señal.

Los satélites emiten tres tipos de señales: portadora, código y mensaje. La portadora sirve para lograr el desplazamiento de la señal hasta el objetivo y debe someterse a un procesamiento de señal GPS. Debe modularse de forma orientada al acoplamiento de la señal a transmitir, para llevar

Para obtener la posición del receptor, es necesario recibir la señal de al menos 4 satélites.

los códigos C/A y P. Cada satélite tiene un código C/A diferente, lo que permitirá al receptor distinguir los satélites ya que estos generaran un ruido pseudoaleatorio (PRN) distinto. El receptor tiene almacenados los diferentes códigos PRN, con lo que identifica el satélite y a su vez emite una réplica a este desfasada. Mediante la correlación del código almacenado y recibido se mide el tiempo y la distancia recorrida. [8]

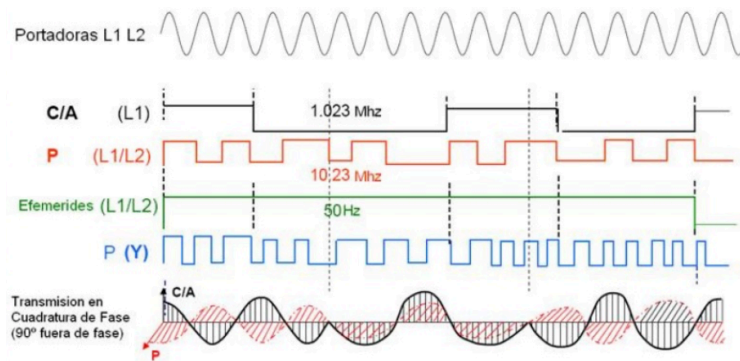


Ilustración 2

[8]

La precisión en el posicionamiento se obtiene a partir de las efemérides que transmiten los satélites a los receptores. El factor más crítico en la precisión son los relojes que incorporan los satélites, ya que un pequeño fallo de tiempo puede suponer un gran error en distancia debido a la velocidad la que se mueven. Para asegurar la estabilidad de estos relojes, los satélites se equipan de un oscilador atómico.

Los fallos en la precisión son debidos principalmente a la interacción de la señal con la atmósfera, concretamente con la ionosfera y la troposfera, donde las condiciones empiezan a diferir notablemente de las de un vacío ideal, generándose un cierto retardo. Existen modelos matemáticos para anular prácticamente en su totalidad el retardo troposférico mientras que el ionosférico se anula mediante la emisión en dos frecuencias.

Con 3 satélites se obtienen dos puntos solución, uno en la Tierra y otro fuera de ella, del que se

puede obtener la solución real mediante *tracking* o apoyándose en otros sistemas. Un cuarto satélite convierte el sistema de ecuaciones no lineales a uno lineal para resolver el problema mediante un método iterativo, lo que permite conocer latitud, longitud y altitud. [9]

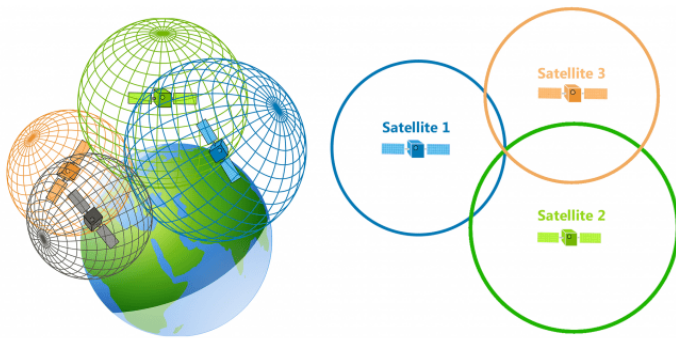


Ilustración 3

[10]

2.1.1. GPS

Tal como se ha mencionado anteriormente, el GPS es el primer sistema GNSS en desarrollarse y entrar en funcionamiento. La constelación GPS estuvo formada inicialmente por 24 satélites en 6 planos orbitales, con 4 satélites en cada uno de estos planos, aunque actualmente ya cuenta con 32. Los satélites siguen una órbita casi circular y semisíncrona, a 20200 km de altitud. [11]

El sistema GPS presta dos servicios diferenciados: el SPS (Standard Positioning Service) y el PPS (Precise Positioning System). Mientras que el SPS está disponible para todos los usuarios y emplea una sola frecuencia, el servicio de precisión PPS es de uso restringido para uso militar y gubernamental y emplea dos frecuencias. [12]

El SPS se basa en un código C/A (Coarse Acquisition), modulado en la banda L1. Tiene un ratio de repetición de pulsos o *chipping-rate* de 1023 MHz y contiene 1023 pulsos, por lo que el código se repite cada milisegundo y cada pulso

dura aproximadamente un microsegundo, con una longitud de onda de 293,1m. Sus prestaciones las podemos ver en la siguiente tabla:

Precisión ¹	$\leq 9\text{m}$ 95% Error horizontal $\leq 15\text{m}$ 95% Error vertical
Disponibilidad ²	≥ 0.99
Continuidad ³	≥ 0.9998
Integridad ⁴	≥ 0.99999

Tabla 1

[13]

2.1.2. GLONASS

El siguiente sistema de navegación por satélite en desarrollarse fue GLONASS. La constelación GLONASS está formada por 24 satélites operativos. Estos están distribuidos en 3 planos orbitales, con 8 satélites en cada uno de ellos orbitando a una altura de 19100 km.[14]

Al igual que GPS, GLONASS ofrece dos servicios similares: SP (Standard Precision service) y HP (High Precision service). De nuevo el servicio estándar es abierto para el uso civil mientras que el servicio de alta precisión emplea un código especial que restringe su uso a aplicaciones especiales.[12]

De nuevo, el servicio estándar transmite un código C/A en la banda L1. Mientras que en GPS todos los satélites emplean la misma frecuencia pero transmiten un código diferente (técnica

¹ Media global.

² Disponibilidad del servicio de posicionamiento horizontal y vertical.

³ Probabilidad de no perder el servicio SPS debido a interrupciones no programadas.

⁴ Probabilidad de no exceder la tolerancia NTE.

denominada CDMA), los satélites GLONASS transmiten el mismo código empleando diferentes frecuencias (FDMA). Actualmente el sistema se encuentra en transición hacia el empleo de CDMA con el lanzamiento de sus nuevos satélites de segunda generación GLONASS-M actualizados y los de tercera generación, GLONASS-K, una vez se hayan lanzado los GLONASS-M existentes de reserva.

La Federación Rusa presenta las prestaciones del sistema GLONASS a través de la recopilación de datos en diferentes estaciones en su territorio. Registran una disponibilidad global de 0.999. Las precisiones recogidas podemos verlas en la siguiente tabla:

Estación	Error de navegación (p=0,95)		
	Latitud (m)	Longitud (m)	Altitud (m)
Arti	6.16	4.88	14.24
Gelendzhik	6.31	5.48	13.04
Irkutsk	4.95	5.01	12.10
Kamchatka	7.47	7.40	14.01

Tabla 2

[15]

2.1.3. GALILEO

El sistema de navegación por satélite desarrollado en Europa toma el nombre de Galileo. Este comenzó a dar servicio desde finales de 2016 y desde julio de 2019 cuenta con 24 satélites operativos (más 2 de reserva) a 23222 km de altitud en 3 planos orbitales distintos.

La principal diferencia de Galileo respecto a sus predecesores es que se trata de un sistema de desarrollo y gestión civil (para GPS y GLONASS es militar), que ofrece múltiples servicios. Los servicios ofrecidos se comercializan, se les fija un

precio que aumenta según lo hacen sus prestaciones.

Como el GPS, hace uso de la técnica CDMA, pero con codificaciones más complejas. Consigue un aumento de precisión utilizando doble frecuencia, en bandas E1 y E5 para su servicio estándar.[12][16]

Las prestaciones de los servicios OS (Open Service) y PRS (Public Regulated Service) se muestran en la siguiente tabla:

	OS		SPS
	Frecuencia Simple	Frecuencia Doble	
Precisión	≤15m 95% Error horizontal	≤4m 95% Error horizontal	≤6.5m 95% Error horizontal
	≤35m 95% Error vertical	≤8m 95% Error vertical	≤12m 95% Error vertical
Disponibilidad	≥0.995		
Continuidad ¹	≥0.999992		
Integridad ²	≥0.9999998		

Tabla 3

[17][18]

¹ En un periodo cualquiera de 15 segundos.

² En un periodo cualquiera de 150 segundos.

2.2. Sistemas de aumentación

Los sistemas GPS y GLONASS no satisfacen los exigentes requisitos de precisión, disponibilidad, continuidad e integridad de gran parte de las operaciones en la aviación. Para conseguir alcanzar estos requisitos, se desarrollaron sistemas de aumentación que mejoran la performance global del sistema.

En el caso de la aviación civil existen tres tipos de aumentaciones:

- ABAS (Aircraft-Based Augmentation System): Aumentaciones realizadas a bordo de la aeronave.

- SBAS (Satellite-Based Augmentation System): Aumentaciones basadas en satélites.
- GBAS (Ground-Based Augmentation System): Aumentaciones basadas en tierra).

2.2.1. EGNOS

Europa cuenta con un SBAS llamado EGNOS, cuyas prestaciones se muestran a continuación para compararlas más tardes con los requisitos que aparecen en los SARPs, para poder comprobar como los sistemas de aumentación ayudan a cumplir con estos en ciertos tipos de operaciones.

		Accuracy		Integrity		Continuity	Availability
		Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)		
Performance	NPA	220 m	N/A	$1 - 1 \times 10^{-7} / h$	Less than 6 seconds	< $1 - 1 \times 10^{-3}$ per hour in most of ECAC < $1 - 2.5 \times 10^{-3}$ per hour in other areas of ECAC	0.999 in all ECAC
	APV-I & LPV200 ¹⁵	3 m ¹⁶	4 m ¹⁶	$1 - 2 \times 10^{-7} / \text{approach}$		< $1 - 1 \times 10^{-4}$ per 15 seconds in the core of ECAC $1 - 5 \times 10^{-4}$ per 15 seconds in most of ECAC landmasses	0.99 in most of ECAC landmasses
Comment		Accuracy values at given locations are available at: https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/ For LPV-200 new accuracy requirements imposed by ICAO Annex 10 ((RD-1)) see section 6.3.3.2		N/A		See sections 6.3.1.3, 6.3.2.4 and 6.3.3.4 for detailed availability maps See sections 6.3.1.4, 6.3.2.5 and 6.3.3.5 for detailed continuity maps	

Tabla 4

[19]

2.3. Requisitos OACI

A continuación se muestran los mínimos requisitos de prestaciones para diferentes tipos de

operaciones en la tabla 5 y en la tabla 6, los niveles de servicio de EGNOS frente a las operaciones PBN para las que cumple.



Typical operation	Accuracy		Integrity				Continuity	Availability
	Horizontal Accuracy 95%	Vertical Accuracy 95%	Integrity	Time-To-Alert (TTA)	Horizontal Alert Limit (HAL)	Vertical Alert Limit (VAL)		
En-route (oceanic/continental low density)	3.7 km (2.0 NM)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁷ /h	5 min	7.4 km (4 NM)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁴ /h to 1 – 1x10 ⁻⁶ /h	0.99 to 0.99999
En-route (continental)					3.7 km (2 NM)	N/A		
En-route, Terminal	0.74 km (0.4 NM)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁷ /h	15 s	1.85 km (1 NM)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁴ /h to 1 – 1x10 ⁻⁶ /h	0.99 to 0.99999
Initial approach, Intermediate approach, Non-precision approach (NPA), Departure	220 m (720 ft)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁷ /h	10 s	556 m (0.3 NM)	N/A	1 – 1x10 ⁻⁴ /h to 1 – 1x10 ⁻⁶ /h	0.99 to 0.99999
Approach operations with vertical guidance (APV-I)	16.0 m (52 ft)	20 m (66 ft)	1 – 2x10 ⁻⁷ in any approach	10 s	40 m (130 ft)	50 m (164 ft)	1 – 8x10 ⁻⁶ per 15 s	0.99 to 0.99999
Category I precision approach	16.0 m (52 ft)	6.0 m to 4.0 m (20 ft to 13 ft)	1 – 2x10 ⁻⁷ in any approach	6 s	40 m (130 ft)	35.0 m to 10.0 m (115 ft to 33ft)	1 – 8x10 ⁻⁶ per 15 s	0.99 to 0.99999

Tabla 5

DOMAIN	USER OPERATION	EGNOS SoL Service Levels										
		NPA							APV-I	LPV-200		
AVIATION	Performance Requirements Annex 10 - Vol I - Chapter 3 Table 3.7.2.4-1:	RNAV 10 **	RNAV 5*	RNAV 2*	RNAV 1*	RNP 4 **	RNP 2*	RNP 1*	RNP 0.3	RNP APCH* down to LPV minima as low as 250 ft.	RNP APCH* down to LPV minima as low as 200 ft.	
	- En-route	X	X	X	X	X	X		X			
	- En-route - Terminal		X	X	X			X	X			
	- Initial Approach - Intermediate Approach - Non-precision Approach (NPA) - Departure				X			X	X			
	- Approach Operations with vertical guidance (APV-I)									X		
	- Category I precision approach										X	

Tabla 6

2.4. Vulnerabilidades

Es una realidad que los sistemas GNSS son vulnerables. Esa vulnerabilidad puede solucionarse haciendo a dichos sistemas más robustos o definiendo procedimientos de contingencia en los que se cambie de fuente primaria de navegación.

Los fallos en el servicio pueden ser no intencionados (fallos inherentes al sistema o inducidos por error por un agente externo) o intencionados, provocados por un agente externo aplicando técnicas tales como *jamming* y *spoofing*.

2.4.1. Jamming

Es la interferencia, intencionada o no, de la señal, que impide que esta sea recibida con éxito. El hecho de que las señales empleadas en CDMA

tengan una potencia muy baja, las hace muy susceptibles a sufrir interferencias.

2.4.2. Spoofing

Consiste en la emisión de una señal falsa GNSS con la intención de que se reciba en lugar de la original, obteniendo una posición errónea por parte del receptor. Para ello se emula la señal procedente de un conjunto de satélites y posteriormente se envía hacia el receptor GNSS objetivo.

De nuevo, la baja potencia de la señal GNSS permite que, una vez localizado el receptor objetivo, se aumente la ganancia de la señal fraudulenta. Una vez esta es más fuerte que la señal original, se acaba acoplando y suplantando a esta. [20][21]

Capítulo 3

Análisis previo a la exposición de soluciones

En los siguientes capítulos se expondrán el conjunto de soluciones propuestas para paliar en la medida de lo posible los problemas que afectan al sistema GNSS, planteando el conjunto de soluciones como *backup* de este.

La estructura a seguir para la exposición de soluciones es la siguiente: tras una introducción del sistema planteado, se exponen los antecedentes que preceden a dicho sistema. A continuación se

Entre las soluciones propuestas, se encuentran soluciones bastante desarrolladas por algunos organismos o instituciones del sector aeronáutico, como eLORAN por parte de la FAA; tecnologías de las que se estudia sus prestaciones para la aplicación al entorno de RPAS, como el 5G, a su vez línea de investigación del programa SESAR; y tecnologías provenientes del ámbito militar, puesto que se considera que la transición tecnológica de este ámbito al civil ha sido una vía habitual para encontrar soluciones que con el tiempo se han integrado en la aviación comercial y general. En concreto se estudiará la navegación por reconocimiento de imágenes, más en concreto la referenciada al terreno, TRN (Terrain-Referenced Navigation), tecnología desarrollada a mediados del siglo XX pero que encontró limitaciones tecnológicas, algunas de ellas claramente superadas hoy día, como la capacidad de almacenamiento digital.

explican los principios básicos de funcionamiento del sistema, para seguidamente definir el estado de desarrollo en que se encuentra. Se establecen las relaciones con el ámbito aeronáutico, así como la performance del sistema y su aplicabilidad a raíz de esta. También se trata la certificación del sistema para, por último, extraer una serie de conclusiones del estudio de este.

Se debe considerar que este conjunto de soluciones pueden no encontrarse completamente desarrollada, por lo que en algunos casos no hay datos de entes oficiales sobre las especificaciones de dicha tecnología. No obstante, se ha partido de diversas investigaciones previas a este trabajo y se ha contrastado con la información existente.

El presente proyecto desarrolla con mayor profundidad el eLORAN y 5G, puesto que son las tecnologías más futuribles y en las que se están poniendo más esfuerzos para establecer en un futuro como *backup* del GNSS o como método principal de navegación en las ciudades para el caso del 5G. A pesar de esta consideración, se intenta desarrollar todas las soluciones, en la medida de lo posible, para que quede clara la posibilidad y ventajas que puede presentar su uso en un futuro, así como dejar la puerta abierta para próximas líneas de investigación en cualquiera de los temas tratados.

Capítulo 4

eLORAN

En los Estados Unidos se lleva trabajando desde los últimos años en la mejora de la red LORAN-C existente utilizada años anteriores principalmente por la Guardia Costera. La posibilidad de caída del principal medio de provisión de posicionamiento, navegación y tiempo, el GPS; unido a la gran infraestructura ya desplegada a lo largo de su territorio, la correspondiente a las estaciones del LORAN-C, han motivado al desarrollo de un sistema LORAN mejorado, eLORAN (enhanced LORAN), que pueda desempeñar las funciones del GPS en caso de caída de este.

El sistema eLORAN cumple con un conjunto estándares internacionales y funciona de manera completamente independiente a los diferentes sistemas GNSS, proveyéndose de una fuente de tiempo UTC completamente a dichos sistemas también. Cualquier usuario con un receptor eLORAN dentro de la cobertura de la red podrá disponer de servicio, requiriendo además una mínima interacción por parte de este.

Funciona de forma similar a LORAN-C, con la peculiaridad de la adición de un canal de datos que se emite junto a la señal ya existente en LORAN-C. La adición de este canal permite realizar correcciones en la posición aumentando la precisión, además de enviar al usuario advertencias e información sobre la integridad de la señal. Estas correcciones son las que permiten cumplir con los exigentes requisitos existentes para el aterrizaje de aeronaves. [22]

4.1. Antecedentes

El origen del sistema está en la Segunda Guerra Mundial, cuando EEUU desarrolla LORAN (LOng RAnge Navigation). Este ha ido evolucionando, saliendo a la luz distintas versiones, hasta LORAN-C, que llegó a tener gran importancia en la navegación aérea y naval antes de la aparición del GPS. También existe un sistema equivalente en Rusia: CHAYKA.

LORAN-C es un sistema de ayuda a la navegación hiperbólico de largo alcance, que calcula la posición del usuario a través de técnicas de multilateración, comparando las diferencias en tiempo en la recepción, TDOA, de un conjunto de señales de baja frecuencia (90-100 kHz) emitidas por antenas fijas en tierra. Combina dos técnicas diferentes: multilateración, mencionada anteriormente; y cambio de fase. Con esto se consigue un largo alcance unido a una alta precisión.

Los transmisores LORAN constan de cadenas de 3 a 6 antenas de las cuales una es la Maestra. La señal emitida consiste en una secuencia de pulsos modulados en amplitud sobre una portadora centrada en torno a los 100 kHz. En primer lugar la estación Maestra emite un conjunto de pulsos en intervalos precisos y cuando estas señales llegan a las estaciones esclavas o secundarias, provoca la emisión de pulsos por parte de estas. Por su parte, el usuario recibe los pulsos procedentes de las antenas, existiendo una pequeña diferencia de tiempo en la recepción entre las señales de las distintas antenas. La señal se emite de forma omnidireccional, por lo que para dos antenas que emiten un pulso simultáneo,

la diferencia en el tiempo de llegada a un usuario recibe una rama de una hipérbola que contiene todos los puntos posibles donde puede encontrarse el receptor. La incógnita se resuelve con una tercera antena, que generará otra rama de hipérbola junto a cualquiera de las dos antenas anteriores, obteniendo un punto de intersección.

Por otra parte, lo anterior permite identificar la distancia respecto a una cadena en principio desconocida. Para ubicarse a nivel general, cada cadena LORAN-C tiene un valor único que la diferencia de las demás, el GRI (Group Repetition Interval). Este valor es el tiempo que transcurre

entre repetición en la emisión de pulsos por parte de la estación Maestra. El GRI se elige teniendo en cuenta diferentes consideraciones, como la longitud entre las antenas que componen la cadena, el número de estaciones secundarias y la posible interferencia con cadenas cercanas. [23][24]

Para completar el sistema, el receptor determina la TDOA entre las señales de las distintas antenas con una precisión de 100 nanosegundos, lo que corresponde en distancia a unos 30 metros. A continuación se muestran los principales parámetros que definen el LORAN-C en la tabla 7.

Alcance	Precisión	Cobertura	Frecuencia	Longitud de onda
1800km ⁽¹⁾	185-460m ⁽²⁾	10% ⁽³⁾	90-100 kHz	2500m

Tabla 7

¹ Alcance máximo

² Puede mejorar a 20-100m con la repetición

³ Porcentaje de superficie global

[25][26][27]

Mediante el mecanismo conocido como *Blink*, se asegura la integridad del sistema. Cuando se detectan anomalías en la señal, este se activa automáticamente en un tiempo máximo de 10 segundos. [27]

Como se puede extraer de la tabla anterior, las características de LORAN-C no permiten cumplir con exigentes requisitos de navegación, con errores cercanos a los 500m. No obstante, a partir de este sistema y este principio de funcionamiento se comenzó a desarrollar la siguiente versión del sistema, eLORAN. A continuación se describen sus principios básicos de funcionamiento.

4.2. Funcionamiento

Las señales de LORAN se propagan por la superficie terrestre, por lo que son muy propensas a sufrir retrasos dependiendo de las condiciones existentes. Es por ello que se deben aplicar una serie de correcciones para cumplir con las exigencias de navegación aeronáuticas. Los monitores receptores de la señal del sistema así como los usuarios utilizarán estas correcciones para maximizar la precisión y garantizar la integridad.

La principal diferencia de eLORAN con su predecesor es la adición de un canal de datos mediante el que se transmiten las correcciones mencionadas anteriormente. Por este canal de

datos se emiten, junto a las correcciones, advertencias e información sobre la integridad de la señal.

Los transmisores utilizados por los sistemas eLORAN son transmisores de estado sólido (SSX) y apoyados de un conjunto de dispositivos de control. Cuentan además con una fuente supletoria de energía UPS para asegurar que un fallo en el subsistema de potencia no afecte a la señal transmitida, evitando la interrupción repentina. También disponen de un reloj de cesio como fuente precisa de hora UTC y frecuencia. Cuando una estación transmisora se identifica como fuera de rango, esta automáticamente se elimina para el usuario de cara a proveerse de sus servicios, para evitar errores al recibir una señal que no cumple con los requisitos que se le presuponen. Para esto utiliza el mecanismo *Blink*, propio del LORAN-C, descrito en el apartado anterior.

Las estaciones funcionan de forma autónoma, no obstante, de cara a cumplir con los requisitos de continuidad y disponibilidad propios de la aviación, se necesita poner los esfuerzos y personal suficiente para la supervisión y el control de estas. Dicha tarea se realiza en los Centros de Control. Además se provee a las estaciones de un plan de mantenimiento cuidadosamente diseñado, de cara a evitar interrupciones no previstas en el servicio.

Desde el Centro de Control se deben emitir las interrupciones programadas en el servicio con la suficiente antelación para perjudicar lo menos posible al usuario. Es importante que estos centros cuenten con altas medidas de seguridad física y ciberseguridad, ya que la apropiación ilícita de estos puede suponer problemas de mucha importancia debido a la naturaleza de las aplicaciones del servicio, dedicado al guiado de vehículos, con la responsabilidad que supone el transporte de personas y/o bienes materiales.

Las otras dependencias que integran el sistema son las estaciones de monitorización y referencia. Estas deben estar situadas dentro del área de cobertura de los sistemas eLORAN. Su tarea es proporcionar integridad al servicio. Están equipadas de receptores, que monitorizan la señal y dotan de información en tiempo real a las estaciones de control. Los usuarios son informados automáticamente en caso de detección de una anomalía.

Del conjunto de estaciones o lugares de monitorización, algunas se utilizarán como estaciones de referencia. Estas son las encargadas de la generación del mensaje a emitir por el canal de datos. Están dotadas de un reloj altamente preciso para transmitir las correcciones pertinentes de tiempo y frecuencia respecto a las emitidas por las estaciones de transmisión.

Los equipos receptores de los usuarios funcionan en modo *all-in-view*. Esto significa que se recibe y se realiza seguimiento de la señal de todos los transmisores eLORAN disponibles, lo que se utiliza para obtener las medidas de tiempo y distancia más precisas y fiables de entre las señales recibidas, que dependerá de factores como la distancia a las cadenas de estaciones y la geometría de estas respecto al usuario. Otra ventaja es que de esta manera se comprueba que siempre se esté monitoreando el ciclo correcto de cada señal.

El receptor es capaz de recibir y decodificar el canal de datos y aplicar las correcciones a la señal recibida de forma automática. Esta información junto con las Correcciones en la Señal de Propagación, proporcionan al usuario una solución PNT altamente precisa.

El funcionamiento del canal de datos sigue el siguiente ciclo, repitiéndose emisión tras emisión:

- 1) La estación de monitorización recibe la señal y genera las correcciones pertinentes.

- 2) El Centro de Control valida y almacena las correcciones provenientes de la estación de monitorización.
- 3) El Centro de Control envía las correcciones hacia la estación de transmisión correspondiente.
- 4) La estación de transmisión valida las correcciones entrantes para luego darles formato y transmitirlos.
- 5) La estación de transmisión transmite los datos de corrección mediante el canal de datos
- 6) La estación de monitorización recibe la señal proveniente de la antena de la estación transmisora y aplica las correcciones pertinentes para proporcionar integridad al servicio. [27]

La medida que se realiza es la siguiente:

$$TOA = TOR - TOT = PF + SF + ASF + \Delta Rx$$

Siendo TOA el tiempo de llegada, TOR y TOT los tiempos de recepción y transmisión respectivamente, PF el factor primario (propagación en el aire), SF el factor secundario (propagación en el mar), ASF el factor secundario adicional (propagación sobre el terreno) y ΔRx el factor de retardo ocasionado por el cableado. [28]

4.3. Estado de desarrollo

Las infraestructuras de los antiguos sistemas LORAN-C fueron abandonadas progresivamente conforme el GNSS iba ganando fuerza, hasta que se fijó la necesidad de establecer un sistema de *backup* con unas prestaciones lo más similares posibles. Es entonces cuando se comenzó en Estados Unidos y Reino Unido a investigar sobre la mejora de los sistemas de Navegación de Largo Rango.

El sistema se encuentra actualmente en fase de pruebas, habiendo sido testado en la costa este de Estados Unidos. También Corea del Sur ha adjudicado a UrsaNav la implementación de eLORAN en su territorio, lo que parece indicar

que la tecnología se encuentra terminando su fase de desarrollo y a punto de salir al mercado. [28][29]

Otro país históricamente ligado a LORAN como el Reino Unido, también se encuentra en vías de la implementación de la versión mejorada de LORAN. El Gobierno de Reino Unido establece como prioritario el establecimiento de una alternativa a los sistemas satelitales, menos vulnerable a los ataques.

Existen otros desarrollos de tecnologías que se apoyan en eLORAN, como eDLORAN, que intenta de integrar las soluciones proporcionadas por eLORAN, LORAN-C y CHAYKA, desarrollado en los Países Bajos. Esto garantiza una mayor región de cobertura. [30]

4.4. Relación con el ámbito aeronáutico

Aunque los sistemas LORAN han sido utilizados en aviación desde su aparición en la Segunda Guerra Mundial, con el paso del tiempo han ido formando parte más del transporte marítimo que del aéreo, debido a los requisitos cada vez más exigente de este. Sobre todo los requisitos de continuidad e integridad limitaban de manera notable la posibilidad de su uso en la navegación aérea.

No obstante, con el desarrollo de eLORAN, lo que se pretende es alcanzar los requisitos de *performance* establecidos por la OACI para RNP 0.3. Esto significa que esta tecnología volvería a estar ligada de forma más estrecha a la aviación, pudiéndose utilizar en un amplio rango de aplicaciones.

4.5. Performance

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo es desarrollar unas características que permitan operar en RNP 0.3, además de cumplir con otros requisitos propios del ámbito naval. Se han establecido los siguientes:

Precisión	Disponibilidad	Integridad	Continuidad
8-20m	0.999 – 0.9999	1×10^{-7}	0.999-0.9999 en 150 segundos

Tabla 8

[22]

La precisión es la suficiente para satisfacer las necesidades del transporte naval, más crítico que las aproximaciones de no precisión de aeronaves; mientras que la aplicación más crítica que satisfacen estos valores de continuidad, integridad y disponibilidad si son las aproximaciones de no

precisión. En cuanto a la provisión de tiempo y frecuencias, el sistema cumple con los requisitos ITU en G811 para Relojes de Referencia Primarios.

Los requisitos establecidos por OACI para una aproximación de no precisión son los siguientes:

Precisión	Disponibilidad	Integridad	Continuidad
100m	0.999	1×10^{-7}	0.999 en 150 segundos

Tabla 9

[31]

Como podemos ver cumple con los requisitos de una aproximación de no precisión, lo que permite

proveer de un servicio *gate-to-gate*. Los requisitos de RNP 0.3 son los que vemos en la tabla 4:

Precisión	Disponibilidad	Integridad	Continuidad
550m	0.999-0.9999	1×10^{-7}	0.999-0.9999

Tabla 10

Podemos extraer fácilmente de la comparación de esta última tabla con la tabla 2, que cumple los requisitos RNP 0.3 con holgura.

4.6. Aplicabilidad

ELORAN tiene diversas posibles aplicaciones, como las referentes a la aviación, al transporte marítimo y a la provisión de tiempo y frecuencia,

servicio demandado por otros sectores ajenos al transporte.

LORAN-C está aprobado para su uso en navegación en-ruta, salidas y llegadas, pero no para las fases críticas de estas. Las propiedades altamente mejoradas de precisión, continuidad, integridad y disponibilidad de eLORAN hacen

que cumpla con los requisitos vistos anteriormente y permita operaciones de aeronaves *gate-to-gate*.

Aporta beneficios en seguridad operacional al poder utilizarse desde el despegue hasta el aterrizaje manteniendo el concepto RNAV en caso de interrupción del servicio GNSS, mantiene la conciencia situacional de las aeronaves apoyándose en el ADS-B y todo ello con un coste muy inferior al mantenimiento del conjunto de radioayudas que están operativas hoy día, debido al largo alcance de estos equipos.

Existe una red global de cadenas LORAN-C perfectamente aprovechables para la implementación de eLORAN, cubriendo en términos cantidad de transporte aéreo, las principales áreas sobre el planeta. En el siguiente mapa se puede observar la cantidad de terreno que dispone de cobertura de los sistemas LORAN.



Ilustración 4

[32]

4.7. Conclusiones

Tal y como se ha podido observar a lo largo del capítulo, eLORAN es sin duda uno de los principales candidatos a terminar siendo el *backup* buscado a los sistemas GNSS y es por ello que desde organizaciones y empresas en diferentes

países se está apoyando el desarrollo e implementación de esta tecnología.

Una de las principales ventajas es el poder contar con una infraestructura previa y no partir de algo nuevo. Esto junto con el largo alcance (cerca de 2000km) propio del sistema, presentan importantes ventajas económicas. Puesto que el alcance de un VOR o DME no llega a la cuarta parte del que caracteriza al sistema propuesto y que estos necesitan de más de una estación para determinar la posición, podría suponer un amplio ahorro la eliminación de las radioayudas de menor radio no imprescindibles. Con un sistema eLORAN contrastado con el tiempo, se podría llegar a plantear la posibilidad de funcionar únicamente con el GNSS como medio principal de navegación y eLORAN como backup, además de los pertenecientes al aeropuerto para aproximaciones de precisión.

En la siguiente imagen se puede ver como con tan solo 29 estaciones transmisoras se puede proporcionar cobertura eLORAN a todo Estados Unidos y Canadá:

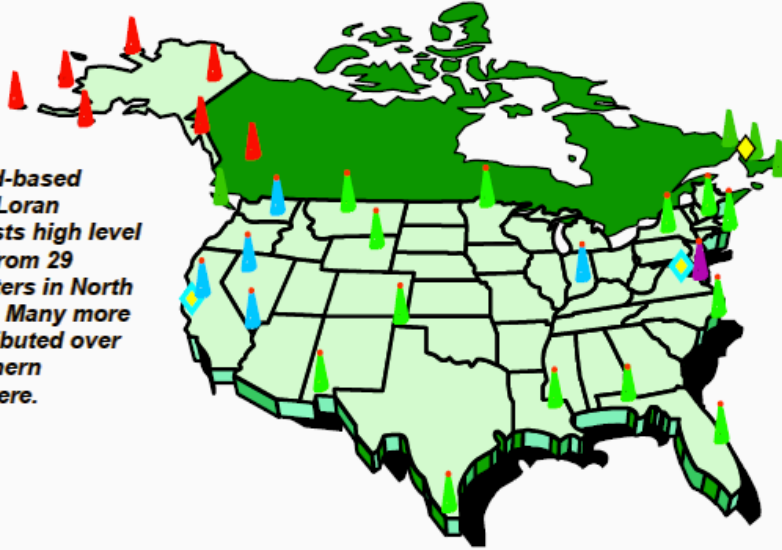
Por otra parte, LORAN tiene unas propiedades de robustez que hacen que sea difícil interferir la señal. En este sentido aventaja claramente al GNSS, mucho más vulnerable. Esta propiedad cobra gran importancia al enfocarse como sistema de reserva, es decir, si falla el medio principal se espera poder cubrirlo con este medio de reserva sin que sufra el mismo fallo.

Para atacar mediante jamming o spoofing a las señales de este sistema, es necesaria la instalación de infraestructuras de hasta 90 metros de altura según las condiciones, lo que contrasta con la facilidad para atacar la señal GPS. Se considera que la instalación de estas estructuras, que además deben estar dentro del área de cobertura de la antena, no comprometería la seguridad en el servicio, ya que serían fácilmente detectadas. [33]



North American Loran System Modernization

As a land-based system, Loran broadcasts high level signals from 29 transmitters in North America. Many more are distributed over the Northern hemisphere.



- New SSX Stations: 5
- TTX Stations; 6 US, 1 Canadian
- SSX Stations w/New TFE: 13 US
- SSX Stations: 0 US, 4 Canadian
- LSU
- New Control Stations

All transmitter and control stations in the continental US are complete, including new Time and Frequency control Equipment (TFE)!

Ilustración 5

Capítulo 5

5G

La aparición de nuevas aplicaciones y modos de transporte, implica la búsqueda de fuentes alternativas PNT. Actividades desarrolladas en entornos densamente poblados, con grandes edificios y otros obstáculos que puedan interferir en la recepción de la señal GNSS, requerirán de una fuente alternativa de posicionamiento y guiado que se adapte a dicho entorno.

Respecto a sus precedentes, las redes 5G reducirán a cantidades ínfimas el tiempo el tiempo de retraso entre los dispositivos y los servidores con los que se comunican, lo que abre puertas a su uso para otras aplicaciones, como se ha planteado anteriormente. Esta nueva tecnología permitirá la conexión simultánea de más dispositivos, un aumento en la velocidad y capacidad de transmisión y una conectividad más estable, gracias al uso de mayores anchos de banda y frecuencias más altas. Además supondrá un menor consumo energético, lo que permitirá una actividad más respetuosa con el medio ambiente. [34]

Desde la llamada “Gestión Inteligente de Tráfico” hasta la entrada basada en RPAS, la capacidad de los elementos que integran la red de transporte para conocer su posición y compartirla con el resto de la red será vital para la operación en estos entornos propios de dichas nuevas aplicaciones.

En el desarrollo del 5G, la inclusión nuevas tecnologías para cumplir con los requisitos de comunicaciones, que se presuponen como prioritarios, ayudan así mismo a cumplir con los requisitos de navegación. Estas se desarrollan en 5.2. Funcionamiento del presente documento.

5.1. Antecedentes

Las generaciones anteriores a 5G han tenido una aplicación en el ámbito de posicionamiento y navegación bastante discreto en comparación con los planes existentes para esta nueva red. Esto se debe a las menores prestaciones ofrecidas.

No obstante, para los actuales estándares de comunicación móvil inalámbrica 2G, 3G y 4G se especifican un conjunto de métodos de posicionamiento para el terminal móvil (MT). A continuación se desarrollan brevemente los más relevantes.

Cell ID

Permite localizar cualquier dispositivo con un módem CDMA/WCDMA/GSM. Tiene como principal ventaja su fácil aplicación y bajo coste y como desventaja, la baja precisión que ofrece, muy dependiente de la proximidad a la antena de transmisión (BTS).

Cada antena tiene una identificación, llamada Cell ID, y el área de cobertura de dicha antena va asociada a ese Cell ID. Los dispositivos móviles reciben la Cell ID de las antenas a su alrededor y lo cotejan con la fuerza de la señal recibida. [35]

Como evolución de este método, en busca de una mayor precisión, se desarrolló ECID (Enhanced-Cell ID). Se utiliza el *Round Trip Time* (RTT) entre la BTS y el usuario para estimar la posición del usuario. El RTT se determina a través del Timing Advance (TA) y este a su vez se obtiene a través del sumatorio de las diferencias en tiempo de llegada a la BTS y al usuario. También se ayuda del ángulo de llegada de la señal (AoA) para determinar la posición del usuario. [36]

Received Signal Strength (RSS)

Se han desarrollado diversas técnicas basadas en RSS desde el desarrollo de las tecnologías 2G y 3G. Destacan los métodos *Path Loss* y *Grid-Based*.

En el *Path Loss Method* la posición del usuario o estación móvil se estima en base a modelos de propagación de la señal transmitida por las BTS. Se mide la RSS de diferentes BTS y se estima la posición por trilateración. Al menos se necesita recibir la señal de tres estaciones, con su localización conocida de antemano.

En el *Grid-Based Method*, los valores RSS recibidos por el usuario se comparan con una base de datos que contiene medidas ya conocidas de la potencia de la señal en diferentes puntos conocidos de una malla. Comparando la señal con los nodos de esta, se estima la posición cuyo valor se ajuste mejor al medido. El gran inconveniente de este método es la generación y mantenimiento de la malla base. [37]

Observed Time Difference of Arrival (OTDOA)

En los métodos basados en OTDOA, el principio de funcionamiento es similar al del GNSS, pero la señal es transmitida por las BTS en lugar de por los satélites que componen el GNSS.

La estación móvil (usuario) mide la diferencia de tiempo en la llegada de la señal de dos o más BTS. A partir de la posición de las BTS de las que recibe la señal y de esta diferencia medida en los tiempos de llegada, se obtiene la posición del usuario. [36]

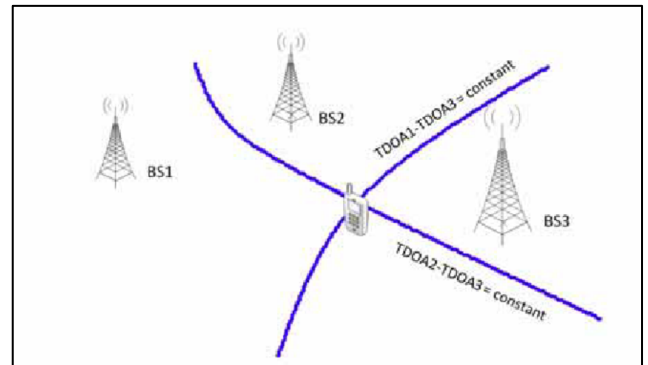


Ilustración 6

[38]

5.2. Funcionamiento

La diferencia de 5G con sus predecesores es que esta nueva generación no es una evolución de la anterior, 4G, sino que es un cambio radical en las tecnologías que la soportan. Caben destacar las siguientes características:

- Alta densidad de estaciones: una mayor cantidad de estaciones aumentará la probabilidad de recibir la señal en línea de vista. Esto reduce los errores de posicionamiento debidos al sesgo de encontrarse no-en línea de vista y los errores inducidos por las componentes obtenidas de la multilateración también se ven reducidos.
- Mayor ancho de banda y frecuencia: mayores frecuencias y anchos de banda permiten una estimación más precisa de los componentes obtenidos de la multilateración, en concreto del retraso de la señal de llegada. Así mismo, una frecuencia de portadora más alta, en el espectro de las ondas milimétricas, aumenta la posibilidad de recepción en línea de vista. Además, estas frecuencias más altas en un entorno masivo MIMO (Multiple-inputs – Multiple-outputs) permite rastrear los terminales mediante el patrón del haz de antena con mayor precisión. Como conclusión, se aumenta el rango de funcionamiento en línea de

vista y se facilita el cálculo de la distancia entre el terminal móvil y la BTS.

- Alto número de dispositivos conectados: al tratarse de una red con un amplio número de dispositivos conectados, se pueden obtener ventajas de las comunicaciones dispositivo a dispositivo D2D. Una interconexión entre dispositivos es útil para determinar pseudo rangos entre dispositivos. Cada dispositivo recibe señal de los dispositivos de su alrededor. El procesamiento de los datos compartidos de sincronización y medidas tomadas del canal puede ayudar a estimar el retardo de la señal. A mayor número de conexiones, se disponen de más datos para estimar la posición y estas conexiones crecen con el número de dispositivos según $N_T(N_T-1)$ siendo N_T el número de terminales. [39]

Además, aunque los requisitos y especificaciones de 5G no han sido publicados aún por 3GPP (serán publicados en junio de 2020), se espera que cuente con las siguientes características:

- Alto ratio de datos, entre 100Mbps y 1Gbps.
- Baja latencia, en torno a 1ms.
- Soporta alta movilidad, velocidades entre 350km/h y 500km/h.
- Soporta tecnologías orientadas a IP. [40]

Con estas mejoras respecto a sus predecesores, 5G proveerá de una conexión mucho más rápida y una conectividad más estable, aplicando métodos similares a los utilizados con 4G y generaciones anteriores. Esto repercute en una mejora en precisión, continuidad y disponibilidad de la señal. Son por tanto aplicables los métodos basados en la multilateración (OTDOA), triangulación (AoA), RSS y los basados en mapas que contienen valores previamente medidos y modelos 3D del entorno. Así mismo son aplicables algoritmos que combinen técnicas utilizadas de estos métodos anteriores intentando conseguir una medida más precisa.

5.3. Estado de desarrollo

La implementación y despliegue de la red 5G estaba inicialmente prevista para 2020. Así mismo, las especificaciones y requisitos sería publicados por 3GPP en marzo de este mismo año. Sin embargo, dificultades surgidas de la pandemia de COVID-19 han retrasado la publicación de estas hasta junio, al igual que ha afectado igualmente a la implementación y despliegue de infraestructuras necesarias. [41]

Por su parte, la Agencia Espacial Europea, ESA por sus siglas en inglés, ya ha realizado pruebas de navegación y posicionamiento simulando la red 5G. Se ha realizado en carreteras alrededor de la ciudad de Múnich en Alemania y se ha utilizado una combinación de fuentes de provisión de posicionamiento para simular las prestaciones esperadas por 5G.

El test se centró en evaluar las prestaciones de posicionamiento de alta precisión híbrida satelital/terrestre en vehículos autónomos terrestres, RPAS, Smart Cities e IoT. Los resultados de las pruebas abren la puerta a la utilización del 5G cuando la señal GNSS no sea visible. [42]

5.4. Relación con el ámbito aeronáutico

Hasta ahora la relación de las redes móviles con el ámbito aeronáutico ha sido inexistente y no hay precedentes de su utilización. No obstante con la aparición de los RPAS y sus nuevas posibles aplicaciones, algunas de ellas desarrolladas en entornos urbanos, se puede esperar que comience dicha relación del 5G con el ámbito aeronáutico.

Por tanto, todos los casos de utilización son recientes y aplicados a esta nueva forma de tráfico aeronáutico, el constituido por aeronaves no tripuladas.

5.5. Performance

Tal y como se ha visto en el punto 5.3. Estado de desarrollo, la hoja de especificaciones y requisitos de 5G no ha sido aún publicados. A pesar de ello, numerosos estudios han estimado las prestaciones esperadas, que se tratarán a continuación.

Se espera el incremento en una orden de magnitud en capacidad, movilidad, precisión, integridad, continuidad y disponibilidad respecto a 4G.

Precisión	Disponibilidad	Continuidad	Integridad
10cm<Error<1m ¹	0.99999 ²	- ³	0.99999 ⁴

Tabla 11

[43][44]

¹ Aumenta el error a 2m para entornos suburbanos.

² En entornos urbanos.

³ La continuidad del servicio está estrechamente relacionada con la disponibilidad y con la línea de vista. La precisión requerida también influirá en la continuidad el servicio puesto que para requisitos de precisión muy elevados, la pérdida de línea de vista con una sola antena puede suponer la interrupción del servicio de dichas prestaciones.

⁴ La integridad de la información depende de nuevo de la cantidad de antenas desde las que se recibe señal y el valor que aparece en la tabla corresponde a la integridad del servicio agregado.

En cuanto a la continuidad, en las prestaciones estimadas o esperadas de la localización 5G, se tiene en cuenta como factor limitante la velocidad del dispositivo móvil. Este valor se estima superior a 500km/h para el transporte terrestre. [45]

Otras prestaciones a tener en cuenta son el tiempo de respuesta y la cantidad de datos por segundo que pueden transmitirse a través de la red, permitiendo usar técnicas basadas en el uso de mapas y modelados 3D del entorno. 5G presentará una latencia de 1ms y una velocidad de datos desde 10 hasta 100 veces superior a la ofrecida por la red 4G, de hasta 10Gbps.

5.6. Aplicabilidad

El posicionamiento, navegación y sincronización de tiempo con 5G ya sería por si misma una aplicación de esta generación de red móvil. En lo que concierne a este trabajo, encontrar alternativas

al sistema GNSS, 5G podría tener cabida en las siguientes aplicaciones:

- Intelligent Transportation Systems (ITS): los ITS mejoran la seguridad operacional y movilidad en el transporte a través de la integración de las últimas tecnologías en comunicaciones en la infraestructura del transporte y el conjunto de vehículos. Este concepto habla de transformar el sistema de transporte actual en uno completamente conectado, rico en información y más respetuoso con el medio ambiente. Para carretera, se necesitaría una precisión de 30cm con un retardo máximo de 10ms, valores que podrían alcanzarse con el uso de 5G. [43][46]
- RPAS: los RPAS irán integrándose en diferentes aplicaciones a medida que se avance en su desarrollo. Pueden darse multitud de usos para estos vehículos, tanto civiles como militares. La operación de estos en entornos urbanos puede verse afectada por la pérdida de disponibilidad de

señal GNSS. Por ello, se hace necesaria una fuente de provisión de posicionamiento terrestre que ofrezca disponibilidad y continuidad donde no la ofrece el GNSS, con altos valores de precisión e integridad. Se espera que los RPAS combinen técnicas de localización basadas en tierra con técnicas de mapeado y reconocimiento de imágenes. [43]

- Localización indoor: la localización en entornos cerrados presenta ciertos problemas. Con la utilización de GNSS, hay problemas en la obtención de la señal, mientras que el uso de otras técnicas de localización indoor requieren la instalación de balizas en el entorno en el que se requiere el servicio de posicionamiento. Por otra parte, la red móvil actual ofrece una precisión muy pobre en entornos cerrados, ya que las técnicas de multilateración no son efectivas al no encontrarse en condiciones de línea de vista, y las técnicas de Cell ID dan errores en la precisión muy elevados. Con 5G aumentan las condiciones de línea de vista con el uso de frecuencias de portadora más elevadas, consiguiendo valores de precisión mucho más altos. [43][47]

- Vehicle to everything (V2X): este concepto consiste en la formación de un conjunto de enlaces de los agentes implicados en el transporte formando una red. Estos enlaces son vehículo a vehículo, proveyendo de información dinámica de tráfico, localización y los atributos del vehículo; vehículo a infraestructura, pudiéndose ejercer cierto control de área desde estas; vehículo a peatón, similar a la conexión vehículo a vehículo; y enlace vehículo a servidor, para procesar la

información.

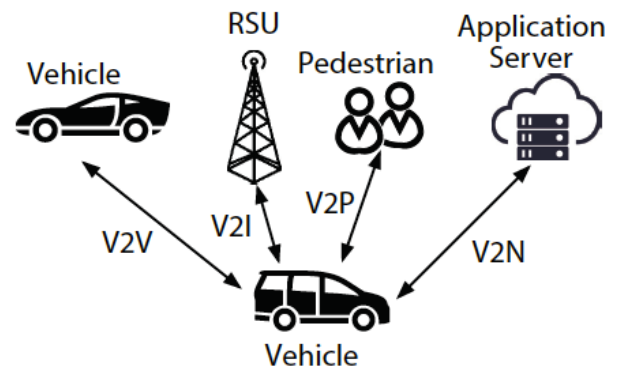


Ilustración 7

[48]

5.7. Conclusiones

Con la llegada de 5G, la localización basada en la red móvil dará un salto importante en cuanto a mejora de las prestaciones ofrecidas. Gracias a las nuevas características que presenta, hace posible su uso para aplicaciones donde hasta ahora solo se contaba con el GNSS con los consiguientes problemas en la precisión o en la recepción de la señal.

Para la operación de RPAS en entornos urbanos, es una solución que ofrece una precisión muy alta, incluso de decenas de centímetros, a la vez que la latencia presentada es mínima, en torno a 1ms, lo que permite su uso en un entorno donde la presencia de multitud de personas y vehículos continuamente en movimiento requieren de un refresco constante de la información. Además presenta la ventaja de aprovechar una infraestructura ya desplegada (no actualmente, pero en un futuro próximo) para otros propósitos.

Capítulo 6

Navegación basada en imágenes

La navegación basada en imágenes es un concepto poco conocido pero en el que se lleva trabajando de mitad del siglo XX. Consiste en la navegación estimando la posición a partir del reconocimiento del terreno y la comparación con un mapa de referencia. También tendría cabida el reconocimiento de un móvil al que seguir dentro de este grupo, aunque el estudio se basa en la navegación referenciada al terreno, TRN por sus siglas en inglés.

Tiene sus orígenes en el ámbito militar, en misiles terrestres. El primer dispositivo de navegación basada en el reconocimiento del terreno fue ATRAN (*Automatic Terrain Recognition & Guidance*), incluido en el misil Matador. En el ámbito militar muchas técnicas de navegación y posicionamiento se vieron desplazadas con la aparición del GNSS.

En los últimos años, está creciendo el interés en las técnicas de navegación TRN en la comunidad científica, como posible alternativa a GNSS, para situaciones de contingencia o para mejorar la precisión obtenida. TRN es una fuente alternativa de posición y actitud para trabajar junto a los sistemas inerciales, permitiendo la re-calibración de estos sin la necesidad de recibir señal GNSS.

El desarrollo de esta tecnología requerirá de la creación de mapas 3D para las zonas donde se pretenda su aplicación. Las mejoras en los sensores de imagen junto con el desarrollo de estos mapas con el modelado 3D de las ciudades y el terreno en general sobre el que se pretenda operar permitirán la implementación de esta tecnología como alternativa al GNSS.

6.1. Antecedentes

El primer sistema que permitió la navegación basada en reconocimiento del terreno fue ATRAN. Fue desarrollado en 1954 por *Goodyear Automatic Corporation*. Esta técnica de navegación se implantó en los misiles de crucero Matador. Usando una técnica de *radar map-matching* consiguiendo una precisión mucho mayor a la que se lograba mediante el control por radio. [49]

Más tarde y con el mismo propósito de guiar misiles de crucero, se desarrolló TERCOM. Consiste en un método procesamiento simultáneo de un conjunto de imágenes radar para determinar la posición. Se correlaciona un conjunto de medidas del radioaltímetro con un mapa topográfico almacenado. Es necesario un seguimiento continuo para determinar la posición. No obstante cuando se desarrolló encontró diversas dificultades, como una insuficiente capacidad de almacenaje, restricciones en la libertad de maniobras y la necesidad de una cuidadosa selección del terreno sobre el que operar. [50]

Poco después fue desarrollado SITAN (*Sandia Inertial Terrain Aided Navigation*), el primer método TRN de inferencia bayesiana. Permitted la linealización de las medidas TRN pudiendo incluirlas como una entrada más a un filtro Kalman Extendido (EKF). La no linealidad del terreno natural supone una importante limitación en cuanto a la obtención de resultados, así como la capacidad de computación cuando este sistema fue desarrollado. [51]

6.2. Funcionamiento

El funcionamiento de las técnicas TRN consiste principalmente en la comparación de medidas de altitud tomadas durante el vuelo con mapas topográficos a priori. Su uso junto con el equipo inercial INS puede servir como fuente de provisión de almacenamiento.

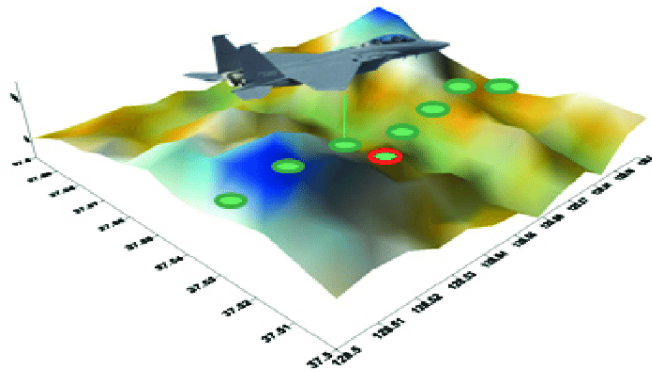


Ilustración 8

[52]

La ecuación básica para de medida de un equipo TRN es:

$$y = h(x) + e,$$

siendo h la elevación del terreno, x la posición del vehículo, e el error en la medida e y la altitud medida del terreno.

A partir de este concepto, se distinguen fundamentalmente dos tipos de métodos: métodos de procesado por lotes y métodos estimación bayesiana recursiva.

Métodos de procesado por lotes

Estos métodos implican el procesamiento simultáneo de un conjunto de mediciones para generar la estimación de posición. La idea es que con la recolección de un gran número de mediciones del terreno, la superficie de probabilidad TRN acabe convirtiéndose en una distribución quasi-unimodal, permitiendo que se obtenga un único valor solución de las mediciones.

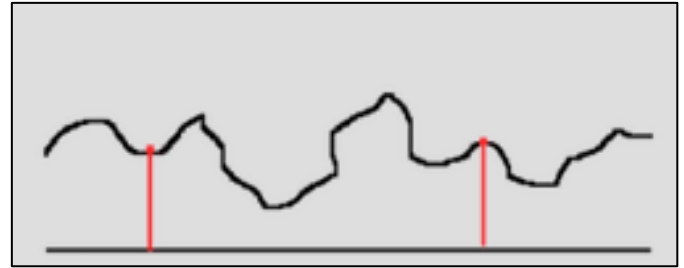


Ilustración 9

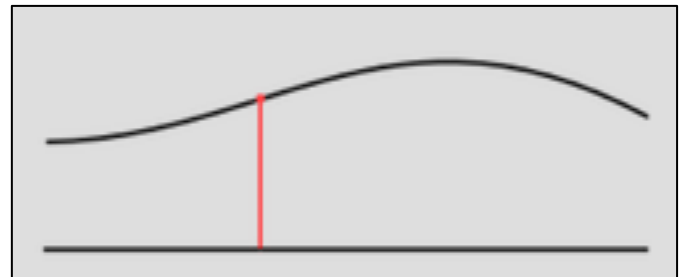


Ilustración 10

En la ilustración 9 se puede ver un ejemplo en el que la estimación de la posición sugiere dos posibles valores mientras que, si las medidas se distribuyen de manera quasi-unimodal se arroja un único posible valor solución.

Otra opción dentro de los métodos de procesado por lotes es DSMAC (*Digital Scene Matching Area Correlator*). Consiste en la adquisición continua de imágenes de la superficie para compararlas con imágenes del terreno previamente tomadas y almacenadas.

En primer lugar se toman medidas de altitud haciendo uso del LiDAR (*Light Detection and Ranging*). Una vez tomadas las medidas, se genera una ventana con los valores de altitud medida para proceder al contraste de áreas. Esta ventana, al igual que el mapa, consiste en una cuadrícula con los valores de altitud correspondientes a la media en cada una de dichas cuadrículas. A continuación se desliza la ventana generada sobre el mapa (en un entorno conocido a priori gracias a otros sensores) hasta encontrar las áreas más similares, como se muestra en la ilustración 10. [53]

21	21	27	26
23	22	25	24
18	17	17	18
13	16	15	17



19	21	23	27	27	25	24	23
18	21	21	27	26	23	23	22
19	23	22	25	24	20	22	22
15	18	17	17	18	19	20	21
14	13	16	15	17	17	18	19
11	12	14	13	15	15	17	17
9	10	13	12	14	13	14	15
8	8	10	10	12	11	12	12

Ilustración 11

Métodos estimación bayesiana recursiva

La estimación bayesiana recursiva, también conocida como filtro de Bayes, es un enfoque probabilístico general para la estimación de un desconocido, en este caso la posición, función de una densidad de probabilidad. En estos, la información se procesa de manera secuencial.

La variable observada en cada iteración se procesa, modificando la densidad de probabilidad. En una distribución unimodal se llegaría a la solución exacta, sin embargo en una distribución multi-modal como la que presenta el conjunto de elevaciones del terreno, solo se puede llegar a una estimación. [52]¹

En el pasado estos modelos se vieron limitados por la carga computacional que suponían para obtener estimaciones precisas. No obstante, hoy ese problema se vería saldado sin dificultad.

¹ Para más información sobre el proceso de estimación bayesiana, consultar referencia [52]

TRN-SLAM

El disponer de un mapa 3D a priori constituye un problema importante. Con el desarrollo de técnicas TRN-SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*), se construye un mapa del entorno utilizando otros sensores tales como cámaras, radares o balizas.[54]

Con este método se pueden conseguir precisiones de hasta 3-4m en el plano horizontal y 2-3m en vertical, con el uso de cámaras como vector de apoyo. [55]

Advance Extreme Learning Machine (a-ELM)

Ante la necesidad de presiones muy altas y cálculo en tiempo real, se hace necesario el uso de algoritmos de aprendizaje de alta velocidad avanzados. Estos aceleran los procesos en la estimación bayesiana recursiva. [56]

6.3. Estado de desarrollo

Aunque la tecnología de la navegación basada en imágenes fue creada hace más de medio siglo, con la aparición del GNSS cayó el interés en su investigación y desarrollo. No obstante, ha resurgido el interés en la última década en la búsqueda de una alternativa al GNSS.

Después de los antecedentes nombrados en el punto 6.1. Antecedentes los esfuerzos han ido enfocados al desarrollo de algoritmos. No obstante, la mayoría de los estudios dedicados a la búsqueda de algoritmos que mejoren la precisión son por parte de particulares o grupos reducidos, a falta proyectos provenientes de alguna organización, cosa que no ocurre con eLORAN o 5G.

6.4. Relación con el ámbito aeronáutico

La relación con el ámbito aeronáutico comenzó con la implantación de estos métodos en los misiles de crucero. Desde el *Matador* hasta el *Tomahawk*.

No obstante, el enfoque mayoritario actual para esta metodología de posicionamiento es hacia su

uso en los UAVs. También se contempla su uso en aeronaves tripuladas, pero son menos numerosos los estudios.

6.5. Performance

Al no ser un método de provisión de posición integrado en el ámbito civil ni regulado por ninguna entidad, no existen requisitos ni especificaciones de este. Si hay resultados experimentales de precisión y tiempo de procesado con la utilización de diferentes algoritmos para estimar la posición.

Con la utilización de algoritmos a-EML, se consiguen precisiones de en torno a 5m con un tiempo de respuesta de 45 μ s. Además, si se combina con el sistema de navegación inercial, se aumenta la precisión hasta los 3m. [56]

Otros estudios aseguran que con sistemas INS de alta precisión se puede obtener una precisión de 0.5-1m con TRN-SLAM.

6.6. Aplicabilidad

TRN como solución de navegación se enfoca generalmente hacia UAVs. Esto se debe a que realizan vuelos de baja altitud, necesitando una referencia precisa de la elevación del terreno. A su vez esta proximidad, permite obtener información del terreno más precisa con sensores de menos calidad que a mayor altitud. No obstante, para el correcto posicionamiento, si se requieren

precisiones muy altas, la aeronave deberá contar con un INS de alta precisión.

Para aeronaves tripuladas, puede ser un método para utilización en caso de contingencia. Los errores obtenidos con el uso de LiDAR para realizar las mediciones dan valores similares a los obtenidos con la señal GNSS (sin aumentaciones), por lo que seguramente daría la precisión necesaria para la fase de en-ruta. No obstante, habría que estudiar la disponibilidad, continuidad e integridad del servicio a partir de los elementos que componen el sistema.

6.7. Conclusiones

Los proyectos TRN desarrollados en el pasado, junto con una capacidad de cálculo computacional mucho más potente y una previsible revolución en entornos urbanos con la aparición del 5G y conceptos como las *Smart Cities*, podría adaptarse su uso para aplicaciones en ciudad que requieran alta precisión.

Aun siendo una tecnología que apareció hace más de medio siglo, serían necesarios estudios más en profundidad sobre la posibilidad de utilización en situaciones de contingencia del sistema GNSS, ya que hay escasez de datos sobre las prestaciones del sistema, aunque en principio parecen igualar a las del Sistema Global de Navegación por Satélite al menos en cuanto a precisión.

Capítulo 7

Otras soluciones

En este capítulo se presenta un conjunto de soluciones que también pueden resultar de interés para el objetivo de este estudio. Se han considerado posibles soluciones de interés al encontrarse en la agenda de instituciones europeas y americanas.

7.1. e-DME

El término de enhanced-DME hace referencia a un conjunto de evoluciones de los sistemas DME actuales. Estos son 4: *DME-Recap*, *DME-Next*, *DME-Sync* e *Híbrido Ranging*.

DME-Recap

Se aplican los mismos principios que en el DME tradicional, tan solo ajustando las tolerancias de tiempo y de forma de pulso. Con esto se mejora el alcance. Estas modificaciones limitan futuras mejoras pero constituyen la evolución DME más asequibles.

DME-Next

Añade al DME actual una adquisición y seguimiento de fase de la portadora, una señal de pulso y lo dota de un canal de datos. Con la adquisición y seguimiento de fase de la portadora se consigue suavizar el ruido y el *multipath*. Con la señal de pulso, se permite que el receptor rastree un transpondedor por debajo del umbral de detección. Estas nuevas características conjuntamente facilitan el uso de algoritmos que mejoran la precisión, la integridad y la robustez del sistema.

DME-Sync

Además de las nuevas características que presenta *DME-Next*, *DME-Sync* añade una sincronización precisa entre los transpondedores de tierra. Esta sincronización permite la obtención del

pseudo-rango. Para el correcto funcionamiento del sistema se debe garantizar la correcta sincronización del sistema en ausencia del GNSS.

Híbrido Ranging

Combina DME bidireccional y pseudorangos con pseudorangos obtenidos de la sincronización de tiempo terrestre Modo-S y balizas UAT. Supone una mejora en la cobertura a cambio de un importante incremento en la complejidad del sistema. [57]

7.2. Mosaic/DME

Se trata de un sistema de posicionamiento basado en una única estación. Ha sido diseñado específicamente como alternativa PNT, actuando como respaldo del GNSS. Se compone de una estación DME tradicional y un conjunto de transmisores externos. La estación DME opera emitiendo una señal bidireccional, mientras que los transmisores externos transmiten una señal unidireccional continua, utilizada para medir la fase de portadora.

Con los transmisores externos se mide la fase, con lo que se determina el ángulo, mientras que con la estación DME tradicional se obtiene el alcance. Así, con una sola estación se consigue la posición de la aeronave, con unas prestaciones adecuadas para APNT. [58]

7.3. LDACS-NAV

L-Band Digital Aeronautical Communication System es un sistema terrestre de banda ancha que se pretende que trabaje con VDL-2. Funciona en línea de vista y opera en la banda L, con excelentes características de propagación.

Utiliza una multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM), control de acceso basado en reservas y protocolos de red avanzados.

Aunque se trata de un sistema de comunicaciones, es posible su aplicación en soluciones de navegación. Se basa en los mismos principios que la red móvil para proveer de servicio de posicionamiento. A partir de trilateración o multilateración, se puede determinar la posición del usuario, siempre que se esté dentro del alcance de un suficiente número de antenas.[60]

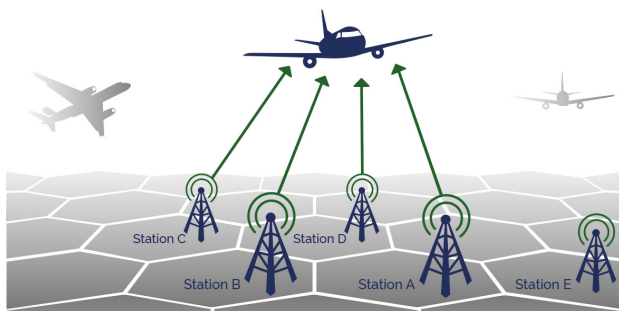


Ilustración 12

7.4. WAM

Wide Area Multilateration es una técnica de vigilancia que utiliza las señales emitidas por el transponder de la aeronave al ser interrogado por el SSR y de ellas obtiene información como identificación y altitud de la aeronave.

Para extender su uso a la navegación, la propia aeronave debe recibir el mensaje TIS-B transmitido desde las estaciones en tierra con su posición, extraída de los sistemas de vigilancia. La configuración del FMS para la aceptación de este método de navegación, degradado respecto al GNSS, hace que se más sencilla la aplicación a aeronaves pequeñas, sin FMS, como sistema de contingencia en caso de pérdida de la señal GNSS.[61]

Capítulo 8

Conclusiones

Este estudio trata de la búsqueda de soluciones ante situaciones de contingencia del sistema GNSS a largo plazo. Esto implica, que no son aplicables hoy día pues no están debidamente certificadas, o ni si quiera han sido completamente desarrolladas. No obstante y tras analizar diferentes estudios sobre ellas, se han escogido para el presente estudio por las posibilidades que ofrecen en un futuro, un futuro próximo para algunas de ellas.

En la búsqueda de alternativas al sistema GNSS, se busca satisfacer las prestaciones exigidas en PBN, con fuentes de provisión de posición y

sincronización de tiempo ajenas al Sistema Global de Navegación Satelital. No se dispone de datos de todas las prestaciones a evaluar, puesto que no ha sido necesario establecer estándares y requisitos aún, al no encontrarse completamente desarrollados estos métodos. No obstante, los valores de precisión obtenidos por los sistemas estudiados igualan o mejoran a los de la navegación por satélite. Aún así, se deben valorar otros, como continuidad, disponibilidad e integridad.

Sistema	Precisión	Disponibilidad	Continuidad	Integridad
GPS	$\leq 9\text{m}$ 95% Error horizontal $\leq 15\text{m}$ 95% Error vertical	≥ 0.99	≥ 0.9998	≥ 0.99999
eLORAN	8-20m	0.999 – 0.9999	1×10^{-7}	0.999-0.9999 en 150 segundos
5G	$10\text{cm} < \text{Error} < 1\text{m}^1$	0.99999^2	$_{-3}$	0.99999^4
TRN	$0.5\text{-}5\text{m}^5$	$_{-6}$	$_{-6}$	$_{-6}$

Tabla 12

¹ Aumenta el error a 2m para entornos suburbanos.

² En entornos urbanos.

³ La continuidad del servicio está estrechamente relacionada con la disponibilidad y con la línea de vista. La precisión requerida también influirá en la continuidad el servicio puesto que para requisitos de precisión muy elevados, la pérdida de línea de vista con una sola antena puede suponer la interrupción del servicio de dichas prestaciones.

⁴ La integridad de la información depende de nuevo de la cantidad de antenas desde las que se recibe señal y el valor que aparece en la tabla corresponde a la integridad del servicio agregado.

⁵ La precisión según método, algoritmo y estudio realizado, consiguiéndose los como mejores valores ese rango.

⁶ Los valores de disponibilidad, continuidad e integridad deben valorarse a partir de los elementos que conforma el sistema.

La solución más obvia como APNT en-ruta a largo plazo parece e-LORAN. No son pocos los esfuerzos de entidades como la FAA puestos en la investigación y desarrollo del LORAN mejorado como alternativa viable al GNSS. Presenta una gran ventaja respecto al resto de radioayudas terrestres, que su elevado rango permite cubrir grandes áreas con un número reducido de estaciones y centros de control. Además cumple con los requisitos NPA, por lo que también sirve de alternativa en aproximaciones de no precisión.

En entornos urbanos y para aplicación en RPAS, la solución puede pasar por un modelo híbrido de provisión de posicionamiento. Si bien la implantación de la red 5G y los métodos de multilateración pueden suponer en sí mismos una solución válida, la combinación con el reconocimiento de imágenes y los sistemas

inerciales de navegación pueden ofrecer un servicio de navegación y posicionamiento muy preciso.

El gran cambio que se espera con la aparición de la nueva red de telefonía móvil también puede significar la disposición de nuevos recursos, como mapeados 3D de los entornos urbanos y balizas u otros elementos que puedan ayudar a estimar la posición en entornos suburbanos o *indoor*.

Además, otras soluciones actualmente menos desarrolladas, como mejoras en los equipos DME o la utilización de sistemas de comunicación aeronáuticos para estimar la posición al igual que lo hacen las redes móviles, pueden consolidarse en un futuro como fuertes alternativas PNT según avance su desarrollo.

Referencias

- [1] El País (2019). ‘Galileo’ vuelve a funcionar tras la avería en los equipos del centro de control.
https://elpais.com/tecnologia/2019/07/17/actualidad/1563376486_505398.html
- [2] Defensa (2019). Israel acusa a Rusia de perturbar los sistemas de navegación GPS civiles.
<https://www.defensa.com/africa-asiapacifico/israel-acusa-rusia-perturbar-sistemas-navegacion-gps-civiles>
- [3] Vicente Ortega y M. Ángeles Moya – Cátedra Isdefe ETSIT UPM (2013). Los orígenes del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
[http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wiki/index.php/Los_or%C3%ADgenes_del_Sistema_de_Posicionamiento_Global_\(GPS\)](http://catedraisdefe.etsit.upm.es/wiki/index.php/Los_or%C3%ADgenes_del_Sistema_de_Posicionamiento_Global_(GPS))
- [4] GPS.gov (2017). Other Global Navigation Satellite Systems (GNSS).
<https://www.gps.gov/systems/gnss/>
- [5] GPS.gov (2017). Space Segment
<https://www.gps.gov/systems/gps/space/>
- [6] GPS.gov (2017) Control Segment
<https://www.gps.gov/systems/gps/control/>
- [7] GPS.gov (2017) User Segment
<https://www.gps.gov/applications/spanish.php>
- [8] Natalia Garrido-Villén (2014) Researching GNSS and Real Estate delimitation: Señal GPS – GNSS: portadora, código y mensaje.
<https://nagarvil.webs.upv.es/senal-gps/>
- [9] Juan Carlos G (2020). Qué es y como funciona el GNSS.
<https://gpstotal.org/es/que-es-irnss>
- [10] Researchgate. Principio básico de posicionamiento por trilateración de satélites digitales.
https://www.researchgate.net/figure/Figura-3-Principio-basico-do-posicionamento-por-trilateracao-com-satelites-artificiais_fig2_329766095
- [11] Michael Garbor, Texas University. GPS overview.
http://www.csr.utexas.edu/texas_pwv/midterm/gabor/gps.html
- [12] Pedro Rastrilla Marañón, AENA (2013). Descubrir las ayudas a la navegación y su calibración.
- [13] Space and Geophysics Laboratory Applied Research Laboratories - The University of Texas at Austin (2019). An Analysis of Global Positioning System (GPS) Standard Positioning Service (SPS) Performance for 2018.
- [14] OACI (2017). DOC 9849 Global Navigation Satellite System (GNSS) Manual
- [15] Russian Institute of Space Device Engineering (2020). Precision of GLONASS navigation definition.
http://www.sdc.ru/smglo/st_glo?version=eng&update&site=extern
- [16] European Global Navigation Satellite Systems Agency (2020). Galileo
<https://www.gsa.europa.eu/european-gnss/galileo/services/search-and-rescue-sargalileo-service>
- [17] Christian Hernández, Carlos Catalán, María A. Martínez (2019). Galileo Integrity Concept and its Applications to the Maritime Sector
- [18] ESA – Navipedia (2011). Galileo Performances
https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_Performances
- [19] European Global Navigation Satellite Systems Agency (2019). EGNOS Safety of Life (SoL) Service Definition Document Issue 3.3
https://egnos-user-support.essp-sas.eu/new_egnos_ops/sites/default/files/library/official_docs/egnos_sol_sdd_in_force.pdf
- [20] Hexagon- Novatel (2013). Understanding the difference between jamming and spoofing.

- <https://www.novatel.com/tech-talk/velocity/velocity-2013/understanding-the-difference-between-anti-spoofing-and-anti-jamming/>
- [21] Sally Cole. Securing military GPS from spoofing and jamming vulnerabilities
<http://mil-embedded.com/articles/securing-military-gps-spoofing-jamming-vulnerabilities/>
- [22] International LORAN Association (2007). Enhanced LORAN (eLORAN) Definition Document.
- [23] Mario E. Casado García, Laura Vicente Ortega y Jaime Vaquerizo Organista. Sistema de Navegación Hiperbólico de Largo Alcance – LORAN-C
- [24] Skybrary. LORAN-C
- [25] Albert Botella Plana Joan Carles Olmedillas (2010). Geotelemática. Posicionamiento y navegación.
- [26] Fco. Rogelio Palomo Pinto. (2006). Aviónica y sistemas de navegación.
- [27] Alan Cordwell. LORAN-C signal characteristics.
- [28] Stephen Bartlett, Gerard Offermans and Charles Schue (2015). A Wide-Area Multi-Application PNT Resiliency Solution
- [29] Maritime Journal (2019). UK GOVERNMENT SUPPORTING E-LORAN
<https://www.maritimejournal.com/news101/onboard-systems/navigation-and-communication/uk-government-supporting-e-loran>
- [30] Reelektronika. eDLORAN
<https://www.reelektronika.nl/manuals/edloran-flyer.pdf>
- [31] Vithala R. Rao (2010). Global Navigation Satellite Systems.
- [32] Researchgate
https://www.researchgate.net/figure/Loran-C-Coverage-Worldwide_fig1_319112191
- [33] Sherman Lo, Benjamin Peterson. Enhanced Loran
- [34] GMV (2019). Primeras pruebas de campo del proyecto para localización GNSS mejorada sobre redes 5G.
<https://www.gmv.com/es/Empresa/Comunicacion/Noticias/2019/10/GINTOC5G.html>
- [35] Z. Koppányia, T. Lovas, A. Barsia, H. Demeterc, A. Beehareeb, A. Berenyia (2012). Tracking vehicle in GSM network to support intelligent transportation systems.
- [36] Spirent (2012). A view of LTE positioning.
https://www.spirent.com/~media/white%20papers/mobile/lte_lbs_white_paper_2012.pdf
- [37] Elina Laitinen, Jukka Talvitie, Elena-Simona Lohan and Markku Renfors (2011). Comparison of positioning accuracy of Grid and Path Loss based mobile positioning methods using Received Signal Strength
- [38] Francescantonio Della Rosa, Helena Leppäkoski1, Ata-ul Ghalib, Leyla Ghazanfari1, Oscar Garcia, Simone Frattasi and Jari Nurmi1(2011). Ad Hoc Networks for Cooperative Mobile Positioning
- [39] Armin Dammann, Ronald Raulefs, Siwei Zhang - Institute of Communications and Navigation, German Aerospace Center (DLR). On Prospects of Positioning in 5G
- [40] Bao-Shuh Paul Lin1, Li-Ping Tung1, Fu-Kuo Tseng, I-Ching Hsieh, Yi-Lun Wang, Shu-Yuan Chou (2015). Performance Estimation of MAR for Outdoor Navigation Applications based on 5G Mobile Broadband by using Smart Mobile Devices
- [41] 3GPP (2020). Release 16
<https://www.3gpp.org/release-16>
- [42] ESA (2019). ESA leads drive into our 5G positioning future.
https://www.esa.int/Applications/Navigation/ESA_leads_drive_into_our_5G_positioning_future

- [43] IRACON (2018). Whitepaper on New Localization Methods for 5G Wireless Systems and the Internet-of-Things
- [44] Gemalto (2019) Presentación de las redes 5G Características y usos
- [45] European Commission 5GPP (2016). 5G Vision: The 5G Infrastructure Public Private Partnership: the next generation of communication networks and services.
- [46] United States Department of Transportation. Intelligent Transportation Systems Joint Program Office
<https://www.its.dot.gov/about/faqs.htm>
- [47] IEEE SIGNAL PROCESSING MAGAZINE (2016). High-Accuracy Localization for Assisted Living
- [48] Michelle X. Gong and Shiwen Mao (2017). An Overview of 3GPP Cellular Vehicle-to-Everything Standards
- [49] Encyclopedia Britannica(2018). Rocket and missile systems
<https://www.britannica.com/technology/rocket-and-missile-system/Strategic-missiles#ref57346>
- [50] Deborah Kathleen Meduna (2011). Terrain relative navigation for sensor-limited systems with application to underwater vehicles
- [51] Sandia National Laboratories (1988). AFTI/SITAN Final Report.
- [52] Dongjin Lee, Yeongju Kim and Hyochoong Bang (2013). Vision-based Terrain Referenced Navigation for Unmanned Aerial Vehicles using Homography Relationship
- [53] Yeonha Hwang, Min-Jea Tahk (2012). Terrain referenced UAV Navigation with LiDAR – A comparison of sequential processing and batch processing algorithm.
- [54] Ananth Kalyan Vadlamani (2010). Airborne Laser Scanner Aided Inertial for Terrain Referenced Navigation in Unknown Environments
- [55] Kim, J. & Sukkarieh, S. (2004). Autonomous Airborne Navigation in Unknown Terrain Environments
- [56] Jungshin Lee, Changky Sung, and Juhyun Oh (2018). Terrain Referenced Navigation Using a Multilayer Radial Basis Function-Based Extreme Learning Machine.
- [57] Adam O. Naab-Levy (2015). Enhanced Distance Measuring Equipment Data Broadcast Design, Analysis, Implementation, and Flight-Test Validation
- [58] O-Jong Kim, Chongwon Kim, Junesol Song, Taikjin Lee, Byungwoon Park, Changdon Kee (2015). A Single Distance Measuring Equipment (DME) Station-Based Positioning System for Alternative Position Navigation and Timing (APNT)
- [59] EUROCONTROL. L-band digital aeronautical communication system.
<https://www.eurocontrol.int/system/l-band-digital-aeronautical-communication-system>
- [60] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) - Institut für Kommunikation und Navigation. LDACS Navigation Concept
<https://www.ldacs.com/ldacs1-navigation/concept/>
- [61] Frederick A. Niles, Robert S. Conker, M. Bakry El-Arini, Daniel G. O’Laughlin, Dmitri V. Baraban. Wide Area Multilateration for Alternate Position, Navigation, and Timing (APNT)