



Desarrollo de herramientas de evaluación de la conformidad de sistemas de vigilancia aérea en TMA y superficie

Jordi Marco Pérez

Tutor: Dr. Juan Vicente Balbastre Tejedor

Trabajo Fin de Máster presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Máster en Ingeniería Telecomunicación

Curso 2018-19

Valencia, 10 de septiembre de 2019



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



Resumen

Los sistemas de vigilancia aérea deben cumplir con estrictos requisitos de funcionamiento establecidos por las autoridades aeronáuticas correspondientes. Para asegurar la seguridad de los vuelos es necesario poder evaluar la conformidad de los sistemas desplegados antes de su entrada en servicio, así como durante su operación. Es por ello que se requieren herramientas que permitan evaluar dicha conformidad tanto en tiempo real como en tiempo diferido. Estas herramientas incluyen la comparación con la información proporcionada por sistemas de posicionamiento por satélite de alta precisión (GPS diferencial) y con trayectorias reconstruidas mediante filtros de seguimiento más o menos sofisticados. En Europa, Eurocontrol dispone de una herramienta (SASS-C) que permite realizar esta función para aeronaves en ruta, pero no para aeronaves en aproximación (TMA) ni superficie. El objetivo de este trabajo fin de máster, en el marco del JU SESAR, consiste en diseñar procedimientos para la evaluación de la conformidad con los requisitos establecidos por Eurocontrol para este último tipo de vuelos.

Mediante la herramienta de software matemático Matlab se ha procesado la información proporcionada por los sistemas de posicionamiento de forma que pueda ser tratada, diseñado los filtros de seguimiento que se ha decidido emplear para la reconstrucción de las trayectorias y evaluado su calidad, apoyándose en Google Earth como herramienta para la visualización de los resultados obtenidos.



Resum

Els sistemes de vigilància aèria deuen complir amb estrictes requisits de funcionament establits per les autoritats aeronàutiques corresponents. Per assegurar la seguretat dels vols es necessita poder avaluar la conformitat dels sistemes desplegats abans de la seua posada en servei, així com durant la seua operació. És per això que es requereixen eines que permeten avaluar aquesta conformitat tant en temps real com en temps diferit. Aquestes eines inclouen la comparació amb la informació proporcionada per sistemes de posicionament per satèl·lit d'alta precisió (GPS diferencial) i amb trajectòries reconstruïdes mitjançant filtres de seguiment més o menys sofisticats. En Europa, Eurocontrol disposa d'una eina (SASS-C) que permet realitzar aquesta funció per a aeronaus en ruta, però no per a aeronaus en aproximació (TMA) ni superfície. L'objectiu d'aquest treball fi de màster, en el marc del JU SESAR, consisteix en dissenyar procediments per l'avaluació de la conformitat amb els requisits establits per Eurocontrol per a aquest últim tipus de vols.

Mitjançant l'eina de software matemàtic Matlab s'ha processat la informació proporcionada pels sistemes de posicionament de forma que puga ser tractada, dissenyat els filtres de seguiment que s'ha decidit emprar per a la reconstrucció de les trajectòries i avaluat la seua qualitat, recolzant-se en Google Earth com a eina per a la visualització dels resultats obtinguts.



Abstract

Air surveillance systems must comply with strict operating requirements established by the corresponding aeronautical authorities. To ensure the safety of flights, it is necessary to be able to evaluate the conformity of the systems deployed before they are put into service, as well as during their operation. That is why some tools are required to assess this compliance both in real time and in deferred time. These tools include comparison with the information provided by high-precision satellite positioning systems (differential GPS) and with reconstructed trajectories using more or less sophisticated tracking filters. In Europe, Eurocontrol has a tool (SASS-C) that allows this function to be performed for en-route aircrafts, but not for aircrafts on approach (TMA) or surface. The objective of this master's final thesis, within the framework of JU SESAR, is to design procedures for the evaluation of conformity with the requirements established by Eurocontrol for this last type of flights.

The Matlab software tool has been used to: process the information provided by the positioning systems so that it can be treated, design the filters that have been selected to reconstruct the trajectories and evaluate their quality, relying on Google Earth as a tool for visualizing the results obtained.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TELECOM ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE INGENIERÍA DE
TELECOMUNICACIÓN



Índice

| | |
|---|----|
| Lista de Figuras | 4 |
| Lista de Tablas | 7 |
| Lista de Acrónimos | 8 |
| Capítulo 1. Objetivo y estructura de la memoria..... | 10 |
| 1.1 Objetivo..... | 10 |
| 1.2 Estructura de la memoria | 10 |
| Capítulo 2. Metodología..... | 11 |
| Capítulo 3. Introducción..... | 12 |
| 3.1 Contexto histórico, situación actual y visión de futuro | 12 |
| Capítulo 4. Sistemas CNS/ATM | 15 |
| 4.1 Introducción | 15 |
| 4.2 Fundamentos de radar | 17 |
| 4.2.1 Principio de funcionamiento..... | 17 |
| 4.2.2 Sistema de coordenadas..... | 18 |
| 4.3 Sistemas de vigilancia..... | 19 |
| 4.3.1 Radar primario..... | 19 |
| 4.3.2 Aplicaciones radar primario | 20 |
| 4.3.3 Radar secundario | 20 |
| 4.3.4 Aplicaciones radar secundario..... | 20 |
| 4.3.5 Sistema ADS | 21 |
| 4.3.6 Multilateración | 23 |
| 4.3.7 Aplicaciones multilateración | 24 |
| 4.4 Sistemas de navegación..... | 25 |
| 4.4.1 DGPS o GPS diferencial | 25 |
| Capítulo 5. Performance-Based Surveillance (PBS)..... | 27 |
| 5.1 SASS-C | 29 |
| 5.1.1 Verificación | 30 |
| 5.1.2 Predicción | 31 |
| Capítulo 6. Protocolo ASTERIX..... | 32 |
| 6.1 Introducción | 32 |
| 6.2 Objetivos ASTERIX | 32 |
| 6.3 Organización de los datos ASTERIX..... | 33 |
| 6.3.1 Data Categories | 33 |



| | | |
|-------------|--|----|
| 6.3.2 | Data Items..... | 34 |
| 6.3.3 | Data Field | 35 |
| 6.3.4 | User Application Profile..... | 35 |
| 6.4 | Estructura general de un mensaje ASTERIX..... | 35 |
| 6.4.1 | Data Block..... | 35 |
| 6.4.2 | Records..... | 38 |
| 6.5 | Identificación de la fuente..... | 38 |
| 6.5.1 | System Area Code (SAC)..... | 38 |
| 6.5.2 | System Identification Code (SIC) | 39 |
| 6.6 | Envío de datos radar..... | 39 |
| 6.7 | Descripción de la CAT 020..... | 39 |
| 6.7.1 | Estándar data ítems en CAT020..... | 40 |
| 6.7.2 | Descripción de los data ítems | 41 |
| Capítulo 7. | Filtros de seguimiento | 46 |
| 7.1 | Introducción | 46 |
| 7.2 | Filtro Gh..... | 48 |
| 7.2.1 | Filtros g-h especiales | 49 |
| 7.2.2 | Inicialización del filtro | 52 |
| 7.3 | Filtro GHK..... | 53 |
| 7.3.1 | Filtros g-h-k especiales..... | 54 |
| 7.4 | Filtro Kalman | 55 |
| 7.4.1 | Filtro Kalman Singer | 59 |
| Capítulo 8. | Desarrollo del trabajo | 61 |
| 8.1 | Tratamiento de los datos | 61 |
| 8.2 | MLAT – DGPS | 73 |
| 8.3 | Diseño filtros de seguimiento..... | 75 |
| 8.3.1 | Filtro GHK | 75 |
| 8.3.2 | Filtro Kalman | 80 |
| 8.3.3 | Filtro Kalman Singer | 84 |
| Capítulo 9. | Resultados y conclusiones..... | 89 |
| 9.1 | Trayectoria '342581'..... | 89 |
| 9.2 | Trayectoria '4249B6'..... | 91 |
| 9.3 | Trayectoria '345410'..... | 92 |
| 9.4 | Conclusiones y líneas futuras..... | 93 |
| 9.4.1 | Conclusiones | 93 |
| 9.4.2 | Líneas futuras | 93 |
| Anexo A: | Funciones Matlab por orden de aparición en la memoria..... | 95 |



Bibliografía 106

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 3-1 – Mejoras objetivo SESAR2020..... | 13 |
| Figura 3-2 – Áreas ATM para focalizar cambios..... | 14 |
| Figura 4-1 – Air traffic radar [23] | 15 |
| Figura 4-2 – Principio de funcionamiento radar [18]..... | 17 |
| Figura 4-3 – Sistema coordenadas radar [18]..... | 18 |
| Figura 4-4 – Diagrama bloques radar primario [26] | 19 |
| Figura 4-5 – Diagrama de bloques de sistema de vigilancia con radar secundario..... | 21 |
| Figura 4-6 – Esquema multilateración [28]..... | 24 |
| Figura 4-7 – CNS/ATM sistema completo en aproximación y superficie [27] | 26 |
| Figura 5-1 – Estándares PBCS y PBN habilitando un servicio ATM..... | 27 |
| Figura 5-2 – Alineación de PBC, PBN y PBS para control del tráfico aéreo [9]..... | 28 |
| Figura 5-3 – Arquitectura de un sistema genérico de monitorización de rendimiento de sistemas de vigilancia [8]..... | 29 |
| Figura 5-4 – Esquema SASS-C [8] | 30 |
| Figura 5-5 – Ejemplo de uso SASS-C [8] | 31 |
| Figura 6-1 – Organización de los datos..... | 33 |
| Figura 6-2 – Estructura de un bloque de datos [14] | 36 |
| Figura 6-3 – Estructura de un registro [14] | 37 |
| Figura 6-4 – Estructura del data block de CAT 020 [15]..... | 39 |
| Figura 6-5 – Estructura primer octeto I020/020..... | 41 |
| Figura 6-6 – Estructura octeto de extensión I020/020 | 41 |
| Figura 6-7 – Estructura I020/042 | 42 |
| Figura 6-8 – Estructura I020/090 | 42 |
| Figura 6-9 – Estructura I020/140 | 43 |
| Figura 6-10 – Estructura I020/202 | 43 |
| Figura 6-11 – Estructura I020/220 | 44 |
| Figura 6-12 – Estructura I020/500 1 | 44 |
| Figura 6-13 – Estructura I020/500 2 | 44 |
| Figura 6-14 – Estructura I020/500 3 | 45 |
| Figura 6-15 – Estructura I020/500 4 | 45 |
| Figura 7-1 – Ejemplo radar vigilancia..... | 46 |
| Figura 7-2 – Problema con el tracking | 47 |
| Figura 7-3 – Error resultante del salto de velocidad en filtro g-h [18]..... | 50 |
| Figura 7-4 – Ajuste erróneo para predicción [18] | 51 |



| | |
|--|----|
| Figura 7-5 – Ajuste de mínimos cuadrados para calcular la posición en $n = 7$ [18] | 52 |
| Figura 7-6 – Función de densidad de probabilidad de aceleración en Singer [18] | 59 |
| Figura 8-1 – Localización de algunas estaciones MLAT [20] | 61 |
| Figura 8-2 – ARP Barcelona-El Prat..... | 62 |
| Figura 8-3 – Datos importados en Matlab..... | 66 |
| Figura 8-4 – Datos ordenados por trayectoria | 68 |
| Figura 8-5 – Ejemplo de trayectoria..... | 69 |
| Figura 8-6 – Ejemplo de datos corruptos | 69 |
| Figura 8-7 – Datos DGPS..... | 70 |
| Figura 8-8 - Trayectoria '342581' | 71 |
| Figura 8-9 - Trayectoria '4249B6' | 71 |
| Figura 8-10 - Trayectoria '345410' | 72 |
| Figura 8-11 – MLAT – DGPS Trayectoria ‘342581’ | 73 |
| Figura 8-12 – MLAT – DGPS trayectoria ‘4249B6’ | 74 |
| Figura 8-13 MLAT – DGPS trayectoria ‘345410’ | 74 |
| Figura 8-14 – Tramo 1 trayectoria '342581' | 77 |
| Figura 8-15 – Tramo 2 trayectoria ‘342581’ | 77 |
| Figura 8-16 – Tramo 3 trayectoria '342581' | 78 |
| Figura 8-17 – Tramo 1 trayectoria ‘4249B6’ | 79 |
| Figura 8-18 – Tramo 2 trayectoria ‘4249B6’ | 79 |
| Figura 8-19 – Tramo 1 trayectoria ‘345410’ | 80 |
| Figura 8-20 – Tramo 1 trayectoria ‘342581’ | 81 |
| Figura 8-21 – Tramo 2 trayectoria ‘342581’ | 82 |
| Figura 8-22 – Tramo 3 trayectoria ‘342581’ | 82 |
| Figura 8-23 – Tramo 1 trayectoria ‘4249B6’ | 83 |
| Figura 8-24 – Tramo 2 trayectoria ‘4249B6’ | 83 |
| Figura 8-25 – Tramo 1 trayectoria ‘345410’ | 83 |
| Figura 8-26 – Tramo 1 trayectoria ‘342581’ | 85 |
| Figura 8-27 – Tramo 2 trayectoria ‘342581’ | 86 |
| Figura 8-28 – Tramo 3 trayectoria ‘342581’ | 86 |
| Figura 8-29 – Tramo 1 trayectoria ‘4249B6’ | 87 |
| Figura 8-30 – Tramo 2 trayectoria ‘4249B6’ | 87 |
| Figura 8-31 – Tramo 1 trayectoria ‘345410’ | 87 |
| Figura 9-1 – Tramo 1 trayectoria ‘342581’ | 89 |
| Figura 9-2 – Tramo 2 trayectoria ‘342581’ | 90 |
| Figura 9-3 – Tramo 3 trayectoria ‘342581’ | 90 |
| Figura 9-4 – Tramo 1 trayectoria ‘4249B6’ | 91 |



| | |
|---|----|
| Figura 9-5 – Tramo 2 trayectoria ‘4249B6’ | 91 |
| Figura 9-6 – Tramo 1 trayectoria ‘345410’ | 92 |



Lista de Tablas

| | |
|--------------------------------------|----|
| Tabla 6-1 – Data items CAT 020 | 40 |
| Tabla 9-1 – Resultados RMS | 92 |



Lista de Acrónimos

| | |
|---------|---|
| ADS-B | Automatic dependent surveillance – broadcast |
| ADS-C | Automatic dependent surveillance – contract |
| AGL | Above ground level |
| AIP | Aeronautical information publication |
| ARP | Airport Reference Point |
| ASTERIX | All purpose STructured Eurocontrol Radar Information Exchange |
| ATC | Air traffic control |
| ATM | Air traffic management |
| ATS | Air traffic service |
| CAT | Category |
| CNS | Communications, navigation and surveillance |
| CNS/ATM | Communication, navigation and surveillance/air traffic management |
| CRC | Cyclic redundancy check |
| DGPS | Differential global position system |
| DME | Distance measuring equipment |
| FANS | Future air navigation systems |
| FRN | Field reference number |
| GLONASS | Global'naya navigatsionnaya sputnikovaya sistema |
| GNSS | Global navigation satellite system |
| GPS | Global positioning system |
| IFF | Identification friend or foe |
| MSPSR | Multi-static primary surveillance radar |
| OACI | Organización de aviación civil internacional |
| PBC | Performance based communication |
| PBCS | Performance based communication and surveillance |
| PBN | Performance based navigation |
| PBS | Performance based surveillance |
| PSR | Primary surveillance radar |
| RCP | Required communication performance |
| RADAR | Radio detection and ranging |
| RNAV | Area navigation |
| RNP | Required navigation performance |
| RSMP | Required surveillance monitored performance |
| RSP | Required surveillance performance |



| | |
|---------|--|
| RMS | Root mean square |
| SA | Selective availability |
| SASS-C | Surveillance Analysis Support System for ATC-Centre |
| SESARJU | Single European Sky ATM Research Joint Undertaking |
| SPM | Surveillance performance monitoring |
| SSR | Secondary surveillance radar |
| STFRDE | Surveillance Task Force for Radar Data Exchange of Eurocontrol |
| TDOA | Time difference of arrival |
| TMA | Terminal Maneuvering Area |
| UAP | User application profile |
| VHF | Very high frequency |
| VOR | VHF omnidirectional range |
| WAM | Wide area multilateration |



Capítulo 1. Objetivo y estructura de la memoria

1.1 Objetivo

El objetivo de este trabajo consiste en diseñar procedimientos para la evaluación de la conformidad con los requisitos establecidos por Eurocontrol para aeronaves en superficie en el marco del SESARJU, puesto que en estos momentos tan solo existe una herramienta para aeronaves en ruta. Para ello se comparará información de sistemas de alta precisión con trayectorias reconstruidas mediante filtros de seguimiento.

1.2 Estructura de la memoria

La presente memoria consta de 9 capítulos, en los que se incluye el trabajo realizado durante todo el periodo de trabajo en este proyecto.

En el segundo capítulo, metodología, se presentan las tareas realizadas lo largo del trabajo.

Los siguientes cinco capítulos tendrán un alto componente teórico y contextualizador. En ellos se explicará de forma más o menos detallada dependiendo del capítulo los conceptos necesarios para el desarrollo que se llevará a cabo en el capítulo 8. También se proveerá de un contexto y marco de trabajo para comprender mejor la necesidad y novedad de este tipo de trabajos.

En el tercer capítulo, se realizará una introducción en la que se presentará un contexto histórico, se pasará por el momento actual y se explicarán los objetivos de cara al futuro, de forma que se comprenda mejor el objetivo y necesidad de este tipo de trabajos.

En el cuarto capítulo, es un capítulo teórico de introducción a la tecnología radar y sistemas CNS/ATM. Este conocimiento es necesario para saber cómo se lleva a cabo una parte de la vigilancia aérea.

En el quinto capítulo, se aborda de forma más detallada la denominada *performance-based surveillance*, como se verá en el capítulo tercero, un concepto novedoso y de actualidad en el contexto de la vigilancia aérea.

En el sexto capítulo, se presenta el formato de datos ASTERIX, algo necesario para saber cómo se recibe y se presenta la información que se obtiene por parte de los diferentes sistemas de vigilancia aérea.

En el séptimo capítulo, se desarrolla de forma detallada la teoría necesaria para comprender los filtros de seguimiento que se van a implementar en el siguiente capítulo.

En el capítulo octavo se incluye el desarrollo del proyecto. En él se desarrollará el trabajo realizado mediante Matlab; desde el procesamiento de los datos proporcionados, el diseño, parametrización y uso de los filtros seleccionados y la representación de las diferentes trayectorias obtenidas en Google Earth.

En el noveno y último capítulo se presentan los resultados que se han obtenido al evaluar los diferentes filtros de seguimiento y comparar con la información proporcionada por sistemas de posicionamiento de alta precisión; así como las conclusiones que se pueden extraer de los mismos y futuras líneas de trabajo.



Capítulo 2. Metodología

Para poder llevar a cabo este trabajo, se ha realizado en primer lugar, un proceso de documentación en el que se han estudiado los diferentes conceptos que se desarrollarán a lo largo de la memoria:

- Repaso y asentamiento de conceptos básicos de radar necesarios para entender el trabajo a realizar.
- Concepto de vigilancia basada en performance y situación actual de la industria para comprender las necesidades y que novedades se van a aportar.
- Estudio del formato de intercambio de información ASTERIX así como de la categoría en la que se van a recibir los datos a emplear en el trabajo.
- Estudio de los principales filtros de seguimiento y selección de los más apropiados.

Una vez terminado el proceso de documentación, se pasó a realizar el trabajo mediante la herramienta de software matemático Matlab. En primer lugar, se estudiaron los datos recibidos en CAT020 ASTERIX, se procesaron y trataron de la forma adecuada para disponer de los mismos ordenados y con una estructura adecuada para trabajar con ellos.

El siguiente paso fue la visualización y elección de las trayectorias resultantes del procesado de los datos y que podían resultar interesantes por su recorrido y coincidencia con los datos proporcionados de GPS diferencial.

Finalmente se procedió al desarrollo y uso de los filtros elegidos en las diferentes trayectorias. Parametrizando los filtros de manera la más adecuada empleando los datos obtenidos del ASTERIX.

Por último, se visualizaron los resultados mediante Google Earth y se calculó la exactitud de la posición horizontal respecto a las trayectorias dadas de cada filtro y de los datos de GPS diferencial con el fin de comprobar cuál es el más preciso y si la parametrización realizada en los filtros ha sido la correcta.

Capítulo 3. Introducción

3.1 Contexto histórico, situación actual y visión de futuro

Con el progresivo aumento del tráfico aéreo, surgió la necesidad de poseer diferentes herramientas que permitieran ordenar el tráfico y el espacio aéreo. La radio fue el primer medio tecnológico empleado para gestionar el tráfico aéreo. Tiempo después se empezó a aplicar el radar a la aviación de transporte regular comercial, esto hizo posible el seguimiento de múltiples aeronaves, de esta forma nacen los primeros sistemas de navegación aérea.

En 1983 el consejo de la Organización Internacional de Aviación Civil (OACI), estableció un comité especial sobre el futuro de los sistemas de navegación aérea, FANS por sus siglas en inglés, cuya tarea era estudiar e identificar las diferentes tecnologías, incluyendo el uso de satélites y proponer recomendaciones para el desarrollo futuro de la navegación civil aérea. Cuyo objetivo era dejar de recomendar qué equipos o tecnología debía de usarse para empezar a recomendar el cómo debe de funcionar cada equipo, ahí nace el concepto de: basado en performance [1]. El comité FANS determinó que el desarrollo de nuevos sistemas era necesario para superar las limitaciones de los sistemas convencionales y expandir las capacidades de la administración del espacio aéreo (ATM) a nivel global debido al aumento exponencial de vuelos civiles y el limitado espacio aéreo del que se dispone, para un uso más eficiente del mismo, es necesario reducir el espacio o separación entre aeronaves, lo cual por motivos de seguridad puede resultar muy complicado.

En 1991 un gran número de representantes de la OACI y otras organizaciones internacionales se reunieron para debatir el concepto de un sistema de navegación aérea del futuro con ayuda del comité FANS. El resultado se conoce como: administración de las comunicaciones, navegación y vigilancia del tráfico aéreo, CNS/ATM por sus siglas en inglés. Estos conceptos envuelven un complejo e interrelacionado conjunto de tecnologías, dependiendo en gran medida de los satélites.

El nacimiento de este concepto está considerado como el principio de una nueva era para la aviación civil internacional y asentó el camino para implementar nuevos sistemas alrededor de todo el mundo.

Durante la siguiente década y diferentes consejos se reconoció la ausencia de criterios objetivos para evaluar los requisitos de performance de comunicaciones. Estos criterios necesitaban un set de valores para parámetros que estarían basados en los requerimientos operacionales de los sistemas de comunicación en varias fases del vuelo. Los diferentes órganos implicados decidieron que era necesario evaluar las opciones técnicas existentes de sistemas de comunicación para relacionarlo con los parámetros mencionados anteriormente, de esta manera nace lo que se conoce como requisitos de performance de comunicaciones (RCP), que se empezaría a desarrollar durante la primera década de los 2000.

No sería hasta la década de 2010 cuando se incorporó a los documentos de la OACI el concepto de requisitos de performance de vigilancia (RSP) añadiendo así a los requisitos de comunicación, los requisitos de vigilancia proveyendo criterios operacionales, funcionales, de seguridad y performance para un sistema genérico de vigilancia ayudando a los servicios tradicionales de control del tráfico aéreo (ATC).

Esto generaría la aparición del término de comunicaciones y vigilancia basadas en la performance (PBCS)[1]. PBCS aplica los requisitos y especificaciones de performance en comunicaciones (RCP) y los requisitos de performance de vigilancia (RSP) a los elementos de vigilancia y comunicaciones, de forma que se puedan calificar los diferentes sistemas. Se

identifican unos criterios y requisitos de integridad, disponibilidad o precisión en el caso de los sistemas de vigilancia o de retardo y latencia en el caso de las comunicaciones. Siendo los primeros documentos que fijan los estándares para los sistemas de vigilancia basados en performance o PBS del año 2017 en adelante, por lo que se está tratando un tema muy novedoso en el que se pueden desarrollar muchos trabajos diferentes.

Aunque más adelante se mencionará y explicará las diferencias entre vigilancia basada en performance (PBS) y navegación basada en performance (PBN) es importante situar en este contexto histórico como desde hace más de 30 años se ha ido trabajando en sistemas de PBN y asentando los requisitos y criterios de diseño de procedimientos para la performance de navegación requerida o RNP [4]. Este trabajo se va a centrar en PBS, el concepto más novedoso y en línea con la hoja de ruta de asociaciones como SESARJU.

El desarrollo de novedosas soluciones, herramientas y servicios de control aéreo están en línea con el plan trazado por diversas organizaciones y empresas agrupadas en diversas asociaciones, entre las que destaca la mencionada SESARJU. Esta asociación tiene trazado un plan a largo plazo llamado: *European ATM Master Plan* [2]. Dentro del marco de trabajo del *Single European Sky*(SES), el plan maestro europeo para la gestión del tráfico aéreo es la hoja de ruta que se va a emplear para definir las prioridades que ayuden y lleven a la modernización del sistema de gestión del tráfico aéreo.

Ante la pregunta de por qué es este el momento adecuado para hacerlo, es debido a que la gestión del tráfico aéreo es un elemento muy importante en el contexto del transporte aéreo europeo y clave para la conexión y movilidad de cada vez más millones de personas, por lo que es importante garantizar la sostenibilidad y la competitividad de la aviación europea.

La visión que se tiene en este plan maestro se basa en el concepto de: «operaciones basadas en la trayectoria» y depende de la provisión de servicios de navegación aérea que ayuden a la ejecución de la trayectoria, esto significa que las aeronaves pueden volar las trayectorias deseadas sin verse limitadas por cómo está dividido el espacio aéreo. Esto será posible gracias a un aumento de la automatización, implantación de nuevas tecnologías de virtualización y uso de sistemas estandarizados e interoperables. De esta forma, los proveedores de servicios podrán realizar operaciones sin depender del país en el que se encuentran.

El objetivo de prestaciones que se marca SESAR es ambicioso, son mejoras en áreas muy relevantes como son el medio ambiente, eficacia en costes, eficiencia en operaciones y en seguridad.

Para lograr los objetivos en estas áreas será necesario una evolución técnica que incluya mejoras en los aspectos que se resaltan a continuación [2]:



Figura 3-1 – Mejoras objetivo SESAR2020

Para lograr este objetivo en prestaciones es necesario trabajar con vistas a cambios relevantes, especialmente como puede verse en la figura superior aumentando, digitalización y virtualización. Los cambios se categorizan en cuatro áreas de ATM [2]:



Figura 3-2 – Áreas ATM para focalizar cambios

El desarrollo de este trabajo pretende realizar su pequeña aportación en esta última área: futura infraestructura de aviación.

Dentro de una gran cantidad de puntos a realizar, por los equipos de investigación y desarrollo, se invita a consultar el *European ATM Master Plan edición 2015*[2] para tener una noción de los mismos, se encuentra el punto: *Surveillance performance monitoring* para sistemas de multilateración de área amplia (WAM), radares de vigilancia primarios multiestáticos (MSPSR), CNS integrados, ADS-B...

Todo esto con el objetivo de mejorar la seguridad en los aeropuertos. Debido al aumento progresivo del tráfico tanto de entrada a Europa como de salida, se producen muchas más operaciones de tierra en los aeropuertos, lo cual genera mayor probabilidad de colisión o simplemente más tiempo en realizar las operaciones si no se dispone de la seguridad de que los sistemas presentes van a tener un rendimiento muy alto. Este aspecto se pretende mejorar a través de un aumento en las prestaciones y la capacidad de ofrecer información más precisa, como puede ser a través trayectorias de referencia muy certeras.

Capítulo 4. Sistemas CNS/ATM

4.1 Introducción

Un sistema de navegación aérea, tiene como función principal proporcionar los servicios de navegación a las aeronaves, tanto en vuelo en ruta como en aterrizaje y despegue que les permita completar de forma satisfactoria alcanzar su destino.



Figura 4-1 – Air traffic radar [23]

En aviación se emplea el término CNS/ATM para hacer referencia a sistemas de comunicaciones aeronáuticas, navegación aérea, vigilancia y gestión del espacio aéreo [16]:

- **Comunicaciones aeronáuticas:** Medios de intercambio de información tanto de voz como de datos entre la aeronave y el técnico en tierra y viceversa.
- **Navegación aérea:** Medios para determinar la posición de la aeronave y realizar un seguimiento de la misma hasta que finalice su ruta.
- **Vigilancia aérea:** Medios para vigilar las distintas aeronaves en un determinado espacio aéreo.
- **Gestión del espacio aéreo (ATM):** El objetivo fundamental de la gestión del espacio aéreo es asegurar la seguridad de las aeronaves y que estas completen su ruta con normalidad.



Los servicios CNS:

- **Servicios de Comunicaciones:** Los sistemas de comunicaciones se pueden clasificar de múltiples formas, según ubicación de las estaciones, el tipo de información, el modo de transmisión, la criticidad de las comunicaciones... Su principal función es proporcionar soporte a los demás componentes de CNS/ATM:
 - **ATM:** Intercambio de información entre los controladores aéreos y los pilotos y entre controladores. Por otro lado, los sistemas de procesamiento de datos de control de tráfico aéreo tienen que intercambiar información entre centros ATC.
 - **Vigilancia:** Las estaciones radar utilizan las redes de datos para enviar información de vigilancia a los centros ATC.
 - **Navegación aérea:** Las radioayudas utilizan también las redes de datos como parte de su estructura de control y mantenimiento remoto.
- **Servicios de Navegación:** Diferentes instalaciones y servicios que ofrecen información a la aeronave sobre su posición. Los principales son [16][24]:
 - **Radiofaro Omnidireccional de VHF (VOR):** sistema de corto alcance para la radio navegación, permite la aeronave con un equipo receptor determinar su posición y mantenerse en la trayectoria o radial adecuada a través de recibir y procesar señales de radio transmitidas por balizas.
 - **Equipo Medidor de Distancias (DME):** Suele funcionar junto al VOR, es un sistema electrónico que va a permitir establecer la distancia entre este sistema y una estación emisora. Utiliza radiotelemetría para proporcionar una medida de la distancia según la velocidad al suelo. La sintonización simultánea de dos o más estaciones terrestres, junto con un calculador de navegación, permite el posicionamiento en dos dimensiones, latitud y longitud, de cualquier aeronave.
 - **Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS):** Constelaciones de satélites que transmiten señales que serán empleadas para el posicionamiento de distintos entes, desde coches, teléfonos hasta aviones, que es el caso que atañe a este trabajo. Con esta información se puede determinar las coordenadas geográficas de un punto en concreto al recibir información de diferentes satélites. Las constelaciones de satélites existentes son GPS, GLONASS y GALILEO
- **Servicios de Vigilancia:** Instalaciones y servicios utilizados para determinar las posiciones de las aeronaves y de esta forma establecer una distancia segura entre las mismas. Proporcionan posición, id y velocidad entre otros parámetros. Los principales sistemas que llevan a cabo este propósito son: radar primario (PSR) y radar secundario (SSR), ambos sistemas se analizarán a continuación con más detalle. Según el escenario, se usan diferentes tipos de radares:

- **Ruta:** SSR, radar secundario de largo alcance.
- **Aproximación:** PSR + SSR
- **Aeropuerto:** Multilateración y PSR

A continuación, se va a proceder a explicar de forma breve los conceptos básicos de la tecnología radar para posteriormente desarrollar los sistemas de vigilancia y navegación que más interesan en este trabajo: multilateración y GPS diferencial. Son estos dos puesto que los datos que se han proporcionado para el desarrollo del mismo son datos ASTERIX de categoría 020, es decir, multilateración y datos de GPS diferencial del aeropuerto de Barcelona para poder compararlos con diferentes trayectorias y así estudiar su performance.

4.2 Fundamentos de radar

El radar (RAdio Detection Ad Ranging) es un sistema que usa ondas electromagnéticas para medir distancias, altitudes, direcciones y velocidades de objetos estáticos o móviles como aeronaves, barcos, vehículos motorizados... El radar es un elemento esencial en los sistemas de control de tráfico aéreo, puesto que sin su uso no sería posible el control de la ingente cantidad de aeronaves en circulación [26].

4.2.1 Principio de funcionamiento

El funcionamiento del radar se basa en emitir un impulso de radio, una parte de este impulso se refleja en el objetivo y se recibe en el emisor original. A partir de esta onda reflejada se puede extraer gran cantidad de información.

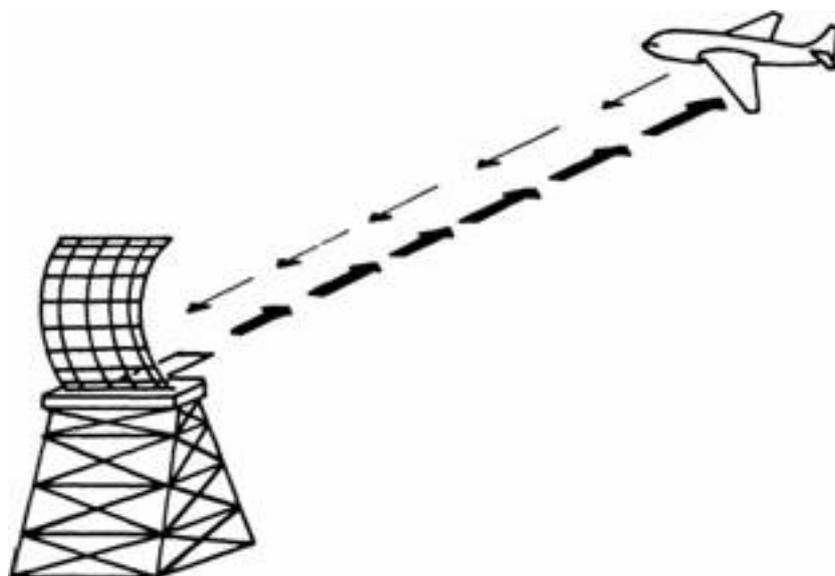


Figura 4-2 – Principio de funcionamiento radar [18]

Las ondas electromagnéticas se dispersan cuando entran en contacto con un objeto sólido, esto permite al radar detectar su presencia aun cuando se encuentran a distancias que el ojo humano no es capaz de ver. A pesar de que el radar no es capaz de distinguir algunas de las características de los objetos que reflejan las ondas, es capaz de detectarlos en la oscuridad o bajo condiciones climatológicas adversas. El radar puede medir la distancia a un objeto, la velocidad, el tamaño o la dirección en la que se mueve. La gran mayoría de los radares operan entre las frecuencias de 50 MHz y 20 GHz. La potencia reflejada que se recibe en el sensor viene dada por la siguiente ecuación conocida como ecuación radar:

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 R_t^2 R_r^2} \quad 4-1$$

4.2.2 Sistema de coordenadas

Los radares requieren de un sistema de coordenadas para poder situar la posición de los objetos detectados. Normalmente se emplea un sistema en el que el centro del mismo es la posición de la antena radar.

En este sistema, la superficie terrestre es representada por un plano imaginario, tangente a la superficie de la Tierra en el punto donde se encuentra la antena del radar, plano horizontal. El ángulo horizontal se realiza en la dirección de las agujas del reloj desde el norte geográfico o real. El ángulo vertical se mide sobre un plano perpendicular al plano horizontal, conocido como plano vertical. El radar se encuentra en el centro del sistema de coordenadas. La línea recta que une el radar con la aeronave es el rango. Por último, el ángulo que forma la línea recta entre radar y aeronave y el plano horizontal, se llama ángulo de elevación. Este ángulo junto con la distancia al blanco y el ángulo medido desde el norte real son las 3 coordenadas que definen la localización de una aeronave respecto al radar.

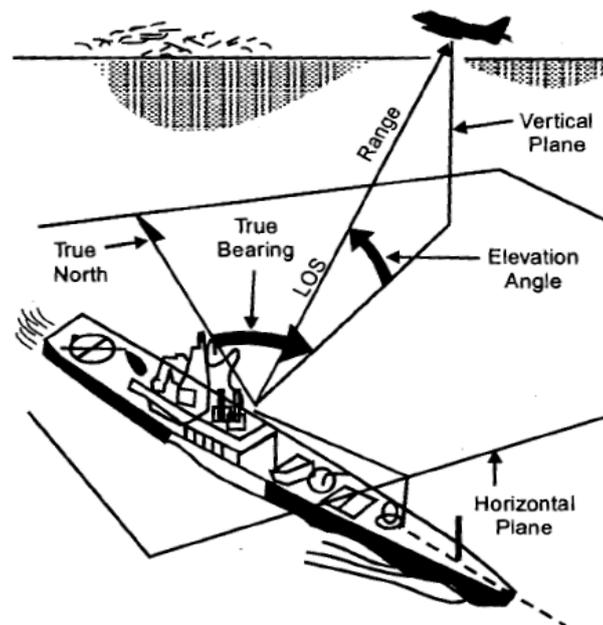


Figura 4-3 – Sistema coordenadas radar [18]

4.3 Sistemas de vigilancia

Los sistemas de vigilancia permiten el seguimiento e identificación de una aeronave a lo largo de toda su trayectoria para mantener la seguridad del tráfico aéreo. Actualmente la vigilancia se realiza fundamentalmente a través de radares (primarios y secundarios) [25].

4.3.1 Radar primario

El radar primario tiene como objetivo detectar la presencia de blancos empleando el principio explicado anteriormente de propagación y reflexión de una onda electromagnética. Permite posicionar el blanco en el espacio en relación al Norte verdadero, determinar la distancia al emisor y la altura a la que se encuentra el blanco.

El radar primario es capaz de determinar la presencia de aeronaves a través de las reflexiones que se producen de las señales que ha emitido el radar. No se requiere ningún tipo de colaboración por parte del blanco en cuestión. Esta es la principal ventaja que tiene este radar, funciona con independencia del blanco y puede detectar blancos no cooperativos, a diferencia de los radares secundarios (los cuales serán tratados más adelante).

4.3.1.1 Funcionamiento

El funcionamiento del radar primario es muy similar al funcionamiento explicado con anterioridad de un radar convencional. Se trata de un transmisor, el cual genera una onda electromagnética, que será emitida por un sensor y posteriormente una parte de la misma reflejada por un blanco. El porcentaje reflejado por parte del blanco conocido como eco se recibirá generalmente en el mismo sensor que envió la señal inicial y de ella se extraerá la información del blanco y se presentará como blanco detectado.

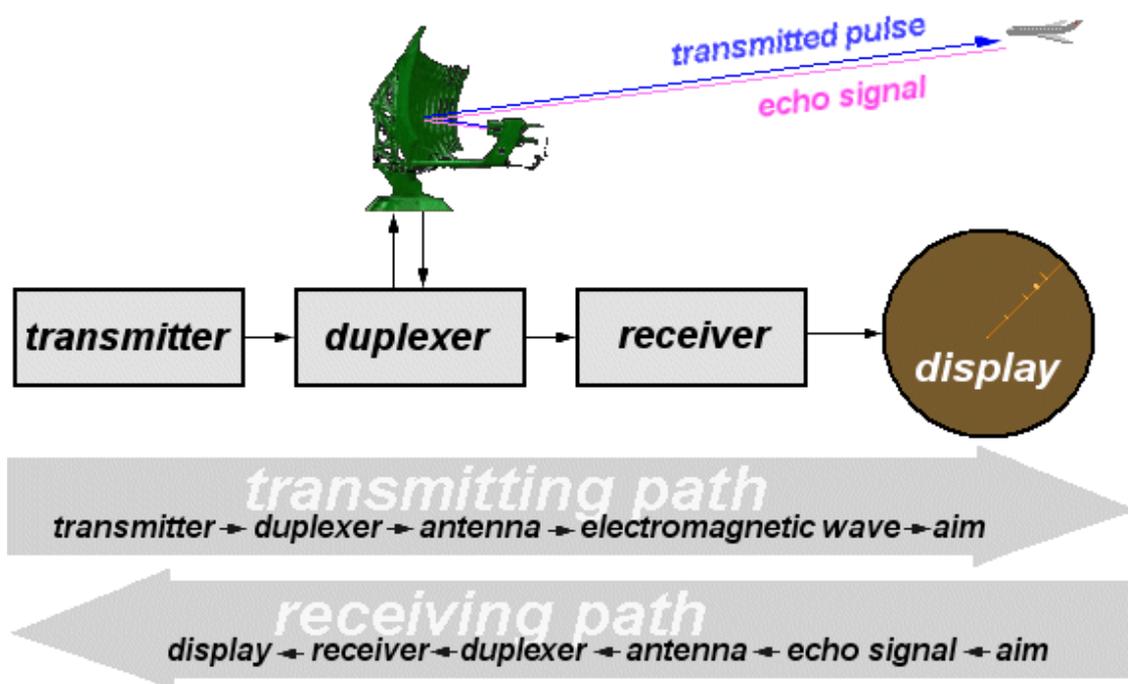


Figura 4-4 – Diagrama bloques radar primario [26]

4.3.2 *Aplicaciones radar primario*

Las distintas aplicaciones que puede tener un radar primario en el control del tráfico aéreo según la función que realice se puede dividir en las siguientes:

- **Radar de exploración o vigilancia (ASR):** Sistema para detectar aeronaves a grandes distancias.
- **Radar de precisión para aproximaciones (PAR):** Sistema de guiado de radar diseñado para dar guía a una aeronave para aterrizar en un punto acordado.

Radar de superficie (ASDE): Es un sistema de vigilancia cuya antena barre el suelo en lugar del aire. Con él se controlan los vehículos o aeronaves que se encuentran en las pistas. Empleado sobre todo en grandes aeropuertos.

4.3.3 *Radar secundario*

El radar secundario nace durante la segunda guerra mundial ante la necesidad de identificar como aliada o enemiga una aeronave, para ello se desarrolló un sistema de identificación conocido como *Identification, Friend or Foe* (IFF), que permitiera identificar de forma automática a las aeronaves según si las aeronaves responden de forma correcta o incorrecta a una interrogación realizada por el radar secundario.

El radar secundario de vigilancia actual es el desarrollo para la aviación civil del sistema militar anteriormente citado, a pesar de ello los sistemas son compatibles hoy en día.

4.3.3.1 *Funcionamiento*

Los radares secundarios (SSR) funcionan emitiendo señales de radio codificadas de forma repetitiva a través de una antena giratoria. Estas señales que se emiten de forma repetitiva reciben el nombre de interrogaciones. La aeronave en cuestión emite una señal de respuesta al recibir la interrogación. Esta señal de respuesta contiene una identificación y la altitud de vuelo, es emitida por un sistema instalado en el interior de la aeronave denominado transpondedor.

El radar secundario pues, permite determinar la identificación del avión, la ubicación con respecto al Norte, la distancia y la altitud a través de un modo específico denominado Modo C. Toda esta información solo se podrá obtener si el transpondedor situado en la aeronave se encuentra en funcionamiento.

Puesto que las señales transmitidas por el interrogador a la aeronave y de la aeronave al interrogador son en una única dirección, la potencia de salida de ambos puede ser más baja que en un radar primario. Por otro lado, puesto que la aeronave emite su propia señal, no se tiene dependencia del tamaño del blanco a la hora de recibir la señal en el radar.

4.3.4 *Aplicaciones radar secundario*

Las distintas aplicaciones que puede tener un radar secundario en el control del tráfico aéreo según la función que realice se puede dividir en las siguientes:

- **Control de ruta (RSR):** Detectan y determinan la posición, altitud e identifican las aeronaves que se encuentran en áreas grandes durante el vuelo.

- **Radar de precisión para aproximaciones (ASR):** Sistema de guiado de radar diseñado para dar guía a una aeronave para aterrizar en un punto acordado.

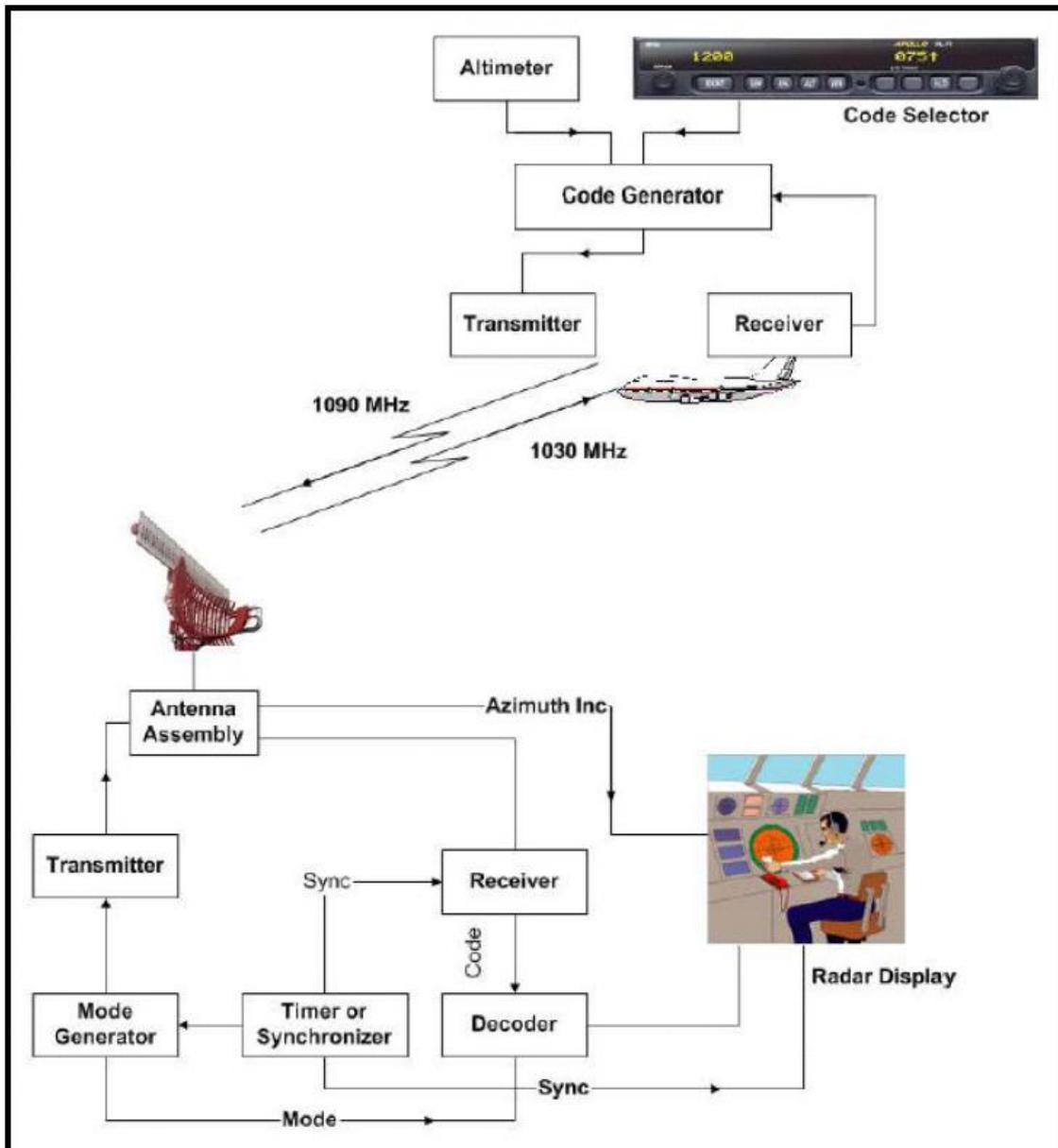


Figura 4-5 – Diagrama de bloques de sistema de vigilancia con radar secundario

4.3.5 Sistema ADS

La vigilancia dependiente automática (ADS) es una técnica de vigilancia por la que una aeronave transmite, a través de un enlace de datos, una serie de parámetros extraídos de los sistemas de navegación y posicionamiento a bordo.

Una transmisión ADS informa sobre:

- Identificación de la aeronave.
- Posición de la aeronave.

- Otra información variada.

A diferencia de los sistemas convencionales de vigilancia, en los que la posición de la aeronave se determina desde la estación en tierra, con el ADS las medidas de posición se realizan desde la misma aeronave.

La técnica ADS se caracteriza por dos rasgos distintivos: es automática, es decir, no necesita la intervención del piloto para que los datos de la aeronave se envíen a la torre de control, y es dependiente, puesto que la información que envía se genera en la misma aeronave, depende de los sistemas que se encuentran a bordo de la misma.

Un sistema ADS necesita de una parte en la aeronave y una en tierra:

- En la aeronave: un sistema de navegación y un enlace de datos que pueda intercambiar información con la estación en tierra.
- En tierra: una estación que reciba la información de forma que esta pueda ser utilizada por los sistemas de tratamiento de datos de vigilancia.

Este sistema es especialmente útil para complementar la vigilancia en zonas en las que la cobertura de radar es nula o casi nula, y para completar o mejorar a los sistemas de vigilancia en zonas donde existen vuelos de baja altitud o disponen de poca cobertura radar [11].

4.3.5.1 Principio de funcionamiento

El sistema instalado a bordo de una aeronave transmite su posición (en coordenadas geográficas), altitud, velocidad, identificación y otras informaciones que obtengan los sistemas de abordaje y puedan resultar útiles en ese momento. Todos los mensajes de posición ADS incluyen un indicador de la calidad de los datos, esto permite determinar si esos datos son suficientemente buenos para apoyar la función prevista.

Los indicadores de calidad se suelen obtener del sistema GNSS a bordo de la aeronave. Puesto que los mensajes ADS son radiodifundidos, pueden recibirse y procesarse en cualquier receptor apto para ello.

La ADS se puede clasificar en dos técnicas diferentes: ADS-B (Broadcast) y ADS-C (Contract) [11].

- **ADS-B:** consiste en la radiodifusión, mediante el enlace de datos situado en la aeronave, de parámetros de a bordo a intervalos frecuentes y regulares a todos los receptores posibles. Se caracteriza por:
 - Los datos que recoge son enviados y radiodifundidos periódicamente por las diferentes aeronaves.
 - Permite una transmisión de datos bidireccional, tanto de la aeronave a tierra como de tierra a la aeronave.
 - La transmisión de datos entre aeronaves permite la representación del tráfico cercano en el interior del avión.
- **ADS-C:** Se produce una transmisión por un enlace directo entre la aeronave y una estación concreta en tierra. Se caracteriza por:
 - Solo se transmiten los datos cuando se ha establecido una comunicación cifrada con una estación de tierra.



- La estación de tierra decide los parámetros de la transmisión, así como la frecuencia que se va a emplear.

4.3.6 Multilateración

En la actualidad, la mayor parte de la vigilancia del tráfico aéreo se realiza mediante radares secundarios y los correspondientes transpondedores instalados en las aeronaves. A pesar de que esto genera diversas limitaciones de cobertura debido a los obstáculos que encuentran las señales en el terreno como montañas o edificios.

Por este motivo y muchos otros de carácter tanto económico como funcional, las organizaciones encargadas de ofrecer servicios de navegación aérea no creen que la creciente demanda en el tráfico aéreo sea sostenible empleando sistemas de vigilancia basados en radar. Como consecuencia, se está migrando ha tecnologías como la multilateración o ADS-B.

4.3.6.1 Principio de funcionamiento

La multilateración o MLAT es una tecnología desarrollada por militares para localizar aeronaves con un alto grado de precisión mediante un método conocido como: diferencia de tiempos de llegada o TDOA por sus siglas en ingles [28].

Se emplean una serie de estaciones terrestres equipadas con un sensor, estas se colocan en lugares estratégicos alrededor de un área de interés como pueda ser un aeropuerto o un área más amplia. La multilateración determina la posición de la aeronave tomando como referencia la diferencia en los tiempos de llegada a las estaciones de una señal; bien emitida por la aeronave como respuesta a una interrogación o bien emitida por un radar primario que genera un eco en la aeronave a posicionar. Puesto que cada aeronave se encuentra a diferentes distancias de las estaciones, las señales serán recibidas en distintos instantes de tiempo, a partir de estos instantes y aplicando una serie de técnicas de procesamiento, se puede calcular con precisión la posición de cada una de las aeronaves.

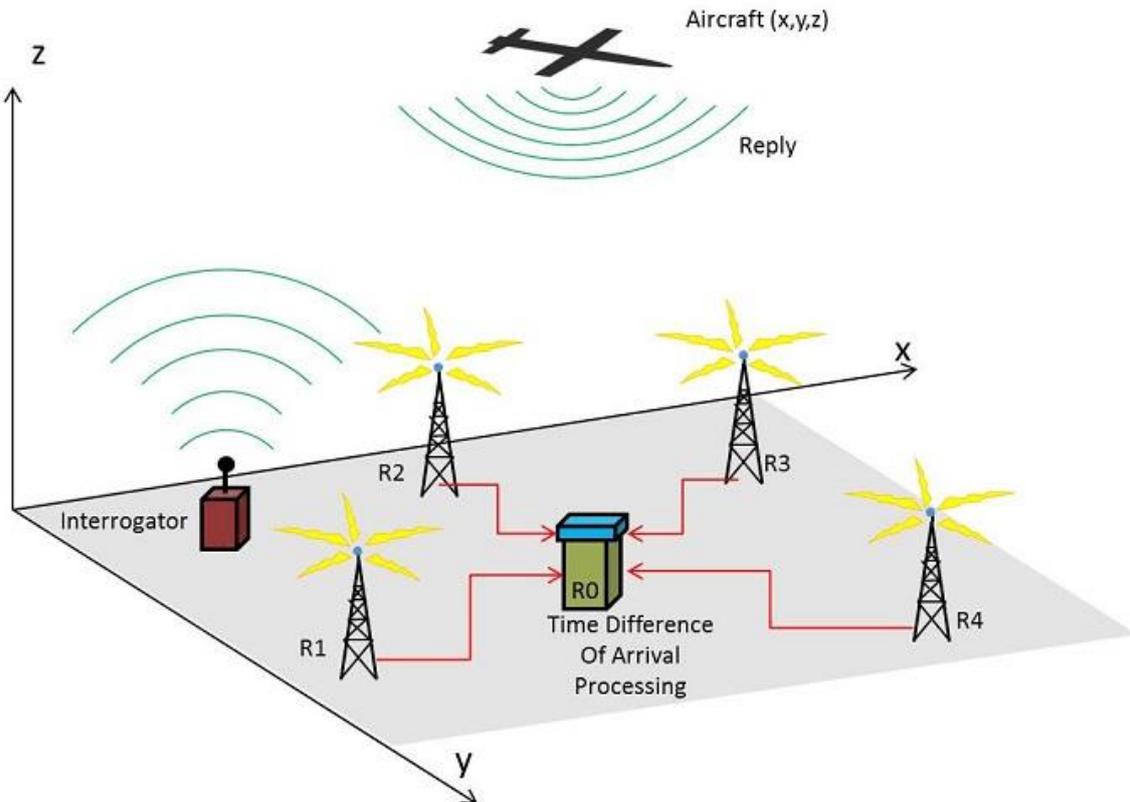


Figura 4-6 – Esquema multilateración [28]

4.3.7 Aplicaciones multilateración

Las aplicaciones del sistema de multilateración son diversas entre las que destacan: vigilancia de superficie, vigilancia en áreas terminales y vigilancia en ruta.

- **Vigilancia de superficie:** El primer uso de este sistema fue en el ámbito militar, una vez se introdujo en la aviación civil, su primera función fue en el seguimiento y vigilancia de los movimientos de aeronaves en la superficie del aeropuerto. A diferencia de los radares de superficie empleados anteriormente, la multilateración también proporciona identificación de las aeronaves y permite distinguir a dos aeronaves aun estando muy próximas entre sí.
- **Vigilancia en ruta:** La multilateración también puede utilizarse para vigilancia en áreas más extensas, conocidas como WAM (Wide Area Multilateration). En este caso, las estaciones se extienden mucho más lejos a distancias de hasta 100km entre sí.
- **Vigilancia en áreas terminales:** Las operaciones a baja altitud en el área terminal están restringidas por la presencia de distintas elevaciones del terreno, que pueden interferir en las interrogaciones a las aeronaves por parte de radares secundarios que se encuentran en la zona. Esto puede causar problemas a las aeronaves a la hora de aterrizar. Para solucionar estos problemas se podrían instalar más radares secundarios en la zona, pero es mucho más económico y además proporciona una cobertura mucho más óptima del área terminal la instalación de un sistema de multilateración.

En este trabajo se van a emplear datos de multilateración obtenidos en Barcelona para diversas trayectorias. Estos datos se entregan para su procesamiento como ASTERIX CAT 020. Es por esto que es necesario e interesante conocer y entender en que consiste la multilateración.

4.4 Sistemas de navegación

La actividad fundamental en la navegación aérea es la determinación de la posición de la aeronave. Los sistemas de ayuda a la navegación pueden clasificarse según la ubicación de los sistemas, en este sentido pueden hacerse dos grupos. Por un lado, los autónomos, en el interior de la nave y por otro, los que requieren una fuente de información exterior, en este segundo grupo se encuentran los espaciales, donde pertenece el DGPS, sistema que interesa explicar para este trabajo.

La OACI, junto con otras organizaciones puso en marcha varios grupos de trabajo para la normalización del uso de los sistemas de posicionamiento por satélite, definiéndose así el término: GNSS. Siglas de “Global Navigation Satellite System”. Término propuesto para denominar a cualquier sistema de navegación por satélite, GPS, GLONASS y Galileo se integran bajo este nombre genérico.

4.4.1 DGPS o GPS diferencial

Es una mejora al sistema de posicionamiento global o GPS por sus siglas en inglés. Este proporciona una localización mejorada llegando incluso a resoluciones de 1-3cm en caso de los sistemas mejor implementados. En campos como la aviación no es admisible un error tan grande como el que ostenta el GPS común de hasta 15 metros. Se concibió fundamentalmente a raíz de la introducción de la disponibilidad selectiva (SA) [13].

Las técnicas de GPS diferencial se basan en el hecho de que los errores sistemáticos en las medidas proporcionadas por un satélite poseen una gran correlación espacial. Es decir, un conjunto de receptores que estén colocados relativamente cerca, obtendrán medidas afectadas por los mismos problemas o interferencias. Las causas de error más comunes son:

- **Retardos en la transmisión debido a la ionosfera:** Este retraso en la recepción de la señal es calculable y por lo tanto se puede corregir su efecto.
- **Condiciones atmosféricas:** Si los receptores están situados cerca unos de otros, a la señal le habrán afectado los mismos fenómenos y condiciones.
- **Disponibilidad selectiva (SA):** El error inducido por los militares, empleando como excusa la seguridad nacional, tanto en la posición de los satélites como en el reloj de los mismos, será igual en todos los receptores.

Con estas mejoras se consiguió alcanzar una resolución de 5 metros, lo cual sí es algo aceptable para aplicaciones civiles.

Un sistema receptor de GPS que se encuentra situado fijo en el suelo y que se conoce como referencia, puede conocer exactamente su posición, ya sea por otras técnicas o por que se le introduzca manualmente. Este equipo, puede calcular el error que tiene una señal GPS comparando la posición que obtiene de dicho sistema GPS que se quiere corregir, con la posición exacta que sí conoce suya. De esta manera se corrige el error y puede enviarlo a otras estaciones receptoras de GPS que tenga cerca.

Un sistema DGPS constaría de las siguientes partes:

- **Estación monitorizada (referencia):** Estación que conoce su posición con una precisión muy elevada. Consta de las siguientes partes:
 - Un receptor GPS.
 - Un procesador que calcule los errores introducidos por el sistema GPS mencionados anteriormente. También se encarga de generar la estructura del mensaje que se envía a los otros receptores.
 - Una antena transmisora con el fin de mantener una comunicación con los equipos receptores de las otras estaciones y diferentes aeronaves.
- **Equipo de usuario:** formado por un receptor DGPS, es decir, un equipo GPS y una antena receptora que hable con la estación de referencia. Las técnicas de corrección que se emplean para aumentar la resolución en el GPS diferencial se escapan a los propósitos de este trabajo. Es interesante e importante conocer esta técnica puesto que unos de los conjuntos de datos que se van a comparar con las trayectorias de proporcionadas por los sistemas de multilateración provienen de GPS diferencial.

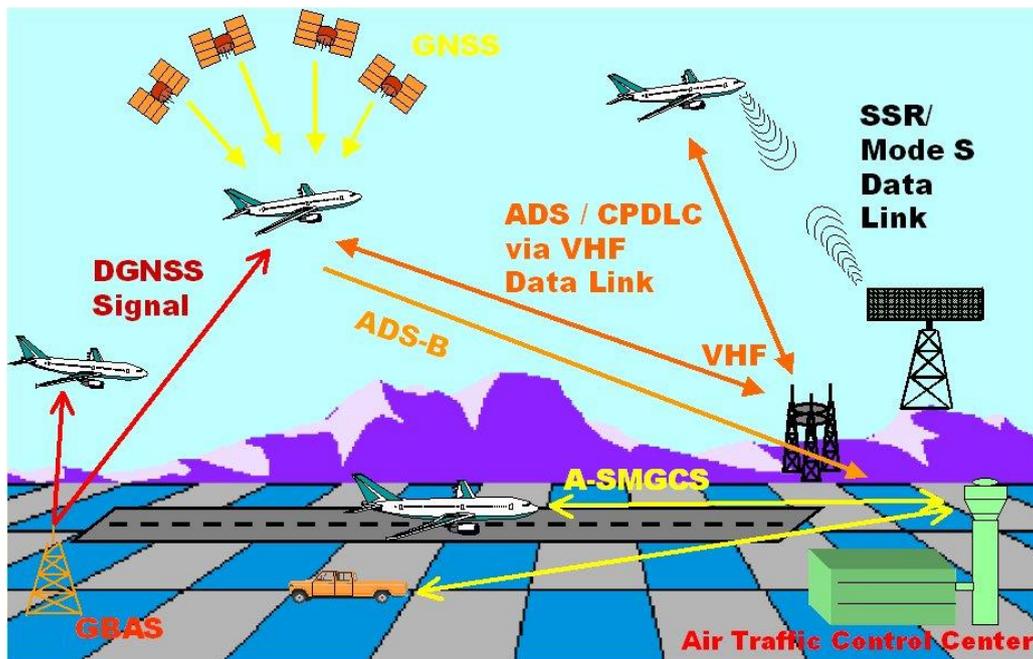


Figura 4-7 – CNS/ATM sistema completo en aproximación y superficie [27]

Capítulo 5. Performance-Based Surveillance (PBS)

En el campo de la vigilancia aérea se están desarrollando nuevas soluciones para integrar y mejorar los sensores cooperativos y no-cooperativos, multi-sensores con capacidad para realizar fusión de datos, funcionalidades relacionadas con la seguridad... Todo ello en línea con la visión de la vigilancia basada en rendimiento (PBS) [4][5].

PBS como se ha mencionado anteriormente proviene de las siglas en inglés *performance based surveillance* aplicada a la prestación de servicios de control del tráfico aéreo. De esta manera se determinan unos requerimientos mínimos operacionales, de seguridad y de rendimiento para la creación de sistemas genéricos de vigilancia en servicios de control del tráfico aéreo. El objetivo es evitar que los distintos organismos reguladores entren a definir las tecnologías y sistemas de vigilancia a usar y se centren en las prestaciones o rendimiento del servicio. Migrando así a una visión más en línea con lo que podría ser el mundo actual de las telecomunicaciones, donde lo importante es el servicio; su calidad o seguridad y no como se ofrece.

Los usuarios, en este caso las aeronaves, los controladores aéreos, los operadores de radar... Buscan obtener un servicio, como puede ser: conocer la posición de un avión, obtener información concreta de otro tipo de un avión cada determinado número de segundos... Todo ello con una cierta precisión e integridad, es decir, que la información no está corrompida. Esto es lo que se conoce como rendimiento en un sistema de vigilancia.

Llevar a cabo esto no es algo sencillo, ya que el rendimiento en la vigilancia depende del rendimiento de sistemas independientes, incluidos sistemas en las aeronaves o en tierra. Por lo que es necesaria la definición extremo a extremo del rendimiento basado en vigilancia.

También es necesario considerar diseños de sistemas de vigilancia específicos para obtener requisitos adicionales en subsistemas terrestres y aéreos. Esto es una diferencia clave respecto a la aproximación que plantean los sistemas *performance-based navigation* (PBN). Que consideran tan solo sistemas para aeronaves en ruta y no para aeronaves que estén en superficie como se plantea en este trabajo y que llevan muchos más años en desarrollo.

Esto no implica que PBCS y PBN no estén relacionados o puedan ser compatibles, ambos conceptos están alineados, PBN se aplica a los requisitos y especificaciones de rendimiento de navegación (RNP) y de área de navegación (RNAV).

La siguiente figura [6], proporciona una visión general del modelo de comunicaciones, navegación y vigilancia basadas en rendimiento para control de tráfico aéreo. Que describe la relación de las especificaciones basadas en el rendimiento entre elementos CNS para el control del tráfico aéreo. Muestra como la reducción de espacio entre distintas aeronaves se basa en la aplicación satisfactoria de los tres estándares RNP, RSP y RCP.

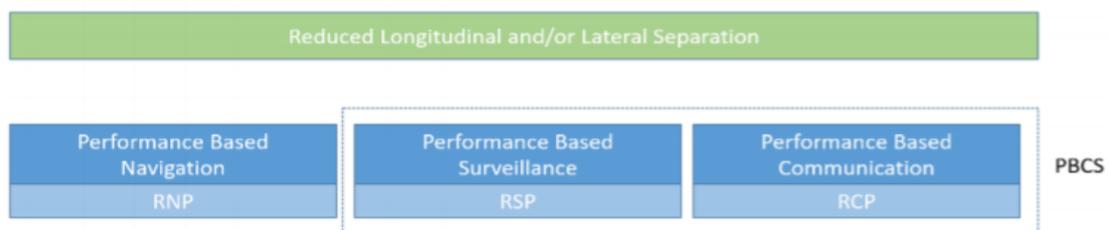


Figura 5-1 – Estándares PBCS y PBN habilitando un servicio ATM

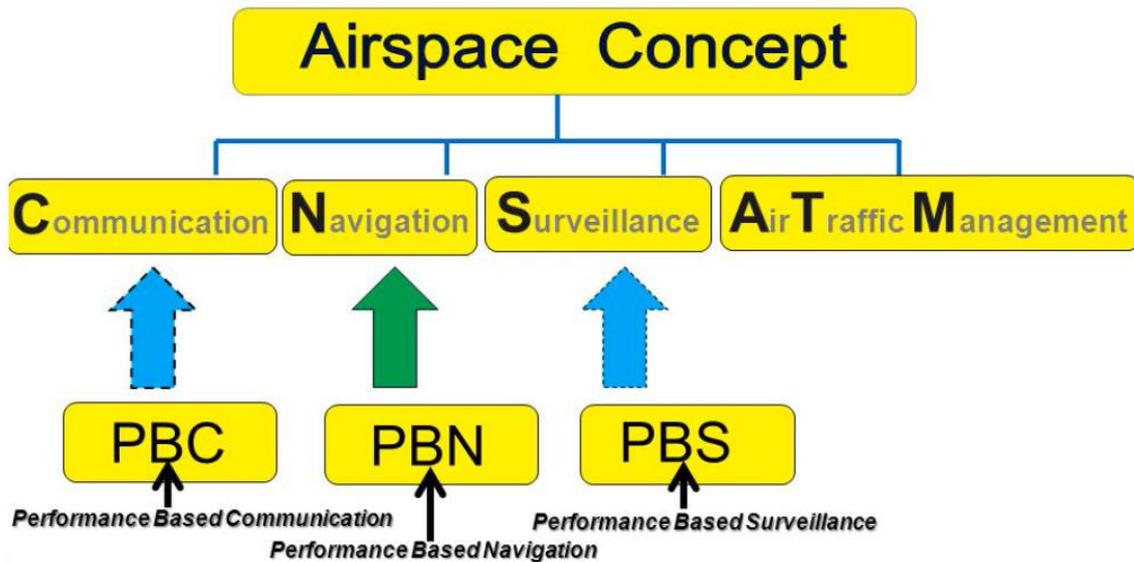


Figura 5-2 – Alineación de PBC, PBN y PBS para control del tráfico aéreo [9]

Para poder implementar estos conceptos basados en rendimiento es necesario saber cómo está funcionando aquel equipo o sistema que está generando la información a procesar, es decir, se debe ser capaz de detectar si se está cumpliendo o no con los requisitos de rendimiento que se están pidiendo. Por ello es necesario la monitorización del rendimiento cuando se utilizan sistemas de vigilancia, navegación o comunicación basado en rendimiento. Es necesario que un agente externo monitorice el rendimiento para poder prestar o garantizar que el servicio se presta en las condiciones adecuadas.

Con todo este contexto en mente, algunas de las soluciones que propone SESAR2020 se han propuesto desarrollar herramientas que faciliten la monitorización de los sistemas vigilancia o SPM por sus siglas en inglés. Estas herramientas SPM buscan identificar degradaciones en las prestaciones, usando tanto procesamientos en tiempo real o casi tiempo real como off-line. La gran mayoría de trabajos realizados hoy en día son del primer tipo. El procesamiento en tiempo real tiene un gran coste computacional, tiempo que por otro lado es crítico, al estar tratando con información en tiempo real.

En el tracking en tiempo real se busca emplear los filtros de seguimiento para predecir hacia dónde va el blanco en cuestión, esta información será usada para la detección de conflictos o trayectorias convergentes. Estos sistemas, tienen un gran hándicap, como se ha mencionado, este es el alto coste computacional. En este trabajo han tratado datos offline, se toman datos de trayectorias conocidas y se parametrizan los filtros de seguimiento con datos obtenidos directamente de esas trayectorias, de forma que se puede implementar el filtro de una manera más eficiente y así proporcione mejores resultados. En el entorno del tracking en tiempo real esto no tiene aplicación ya que no se conoce una trayectoria a priori.

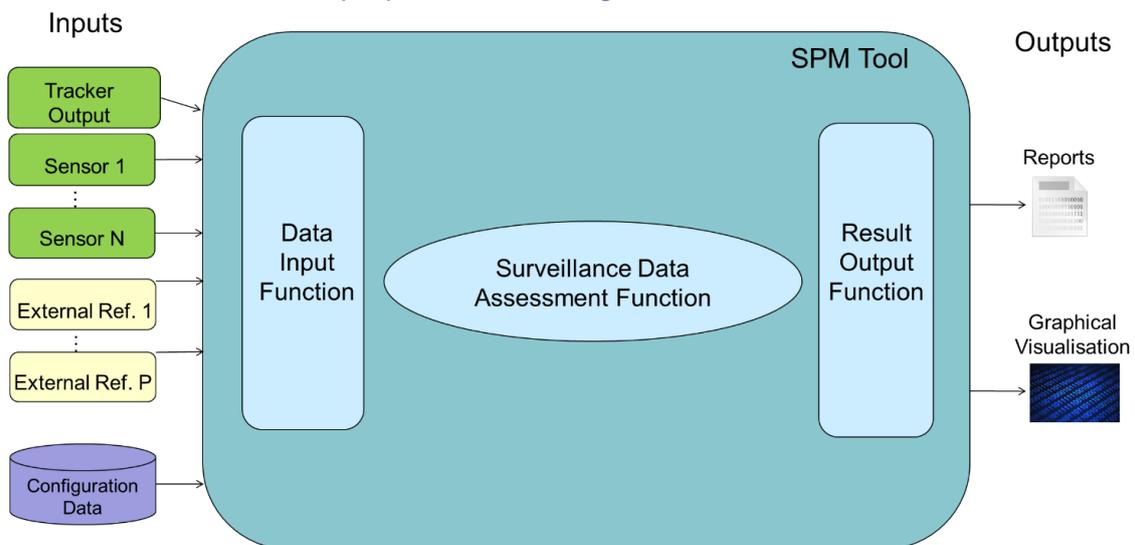
Estas técnicas de tracking que son conocidas desde hace décadas, se han venido empleado para predecir hacia dónde va un blanco concreto, pero en este trabajo se están empleando para mejorar la calidad de los datos, reducir el error de medida y obtener unas trayectorias de referencia limpias que sirven como base para establecer los sistemas y requisitos de rendimiento de vigilancia en superficie.

Las funciones principales de estas herramientas SPM se pueden resumir en la siguiente figura [3]:

- Datos de vigilancia de entrada que serán proporcionados en el formato estándar ASTERIX.

- Evaluación de los datos de vigilancia: Generación y asociación de referencias, cálculo de métricas de rendimiento de acuerdo a documentos de estándares relevantes.
 - Para superficie:
 - EUROCAE ED-117A for MLAT
 - EUROCAE ED-116 for SMR
 - EUROCAE ED-129B for ADS-B
 - Para ER-TMA:
 - EUROCAE ED-142 for WAM
 - EUROCAE ED-129B for ADS-B
 - EUROCONTROL ESSASP

SPM Tool architecture proposal: block diagram



2

Figura 5-3 – Arquitectura de un sistema genérico de monitorización de rendimiento de sistemas de vigilancia [8]

5.1 SASS-C

Como se ha mencionado con anterioridad en Europa, Eurocontrol dispone de una herramienta denominada SASS-C que permite realizar esta función para aeronaves en ruta, pero no para aeronaves en aproximación ni superficie. A continuación, se va a explicar de forma muy breve esta herramienta de forma que ayude a entender mejor la necesidad y el objetivo de este trabajo.

SASS-C es la abreviatura para referirse a Surveillance Analysis Support System para centros ATC. Se trata de un software diseñado por Eurocontrol que proporciona unos servicios de verificación y predicción a los organismos encargados de la vigilancia y control del tráfico aéreo.

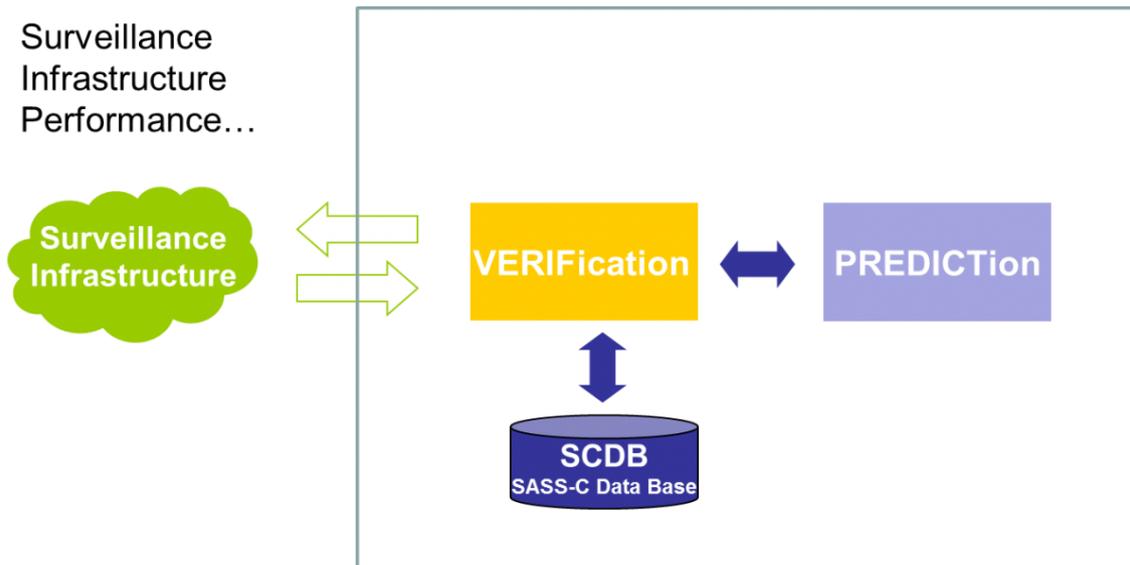


Figura 5-4 – Esquema SASS-C [8]

5.1.1 Verificación

La función de verificación en SASS-C tiene tres objetivos principales:

- Verificar que la estructura de vigilancia (sensores y procesado de datos de vigilancia, así como su sistema de distribución) cumple con los estándares y especificaciones de Eurocontrol.
- Ayudar en la investigación de incidentes aéreos.
- Ayudar en el desarrollo e implementación de nuevos sistemas de vigilancia ATM.

La verificación se lleva a cabo en cinco pasos:

- Adquirir o importar datos de vigilancia en una gran variedad de formatos.
- Reconstruir datos de diferentes sensores para construir una referencia de cada vuelo.
- Comparar los datos con la referencia reconstruida.
- Recopilar las comparaciones realizadas con los umbrales definidos en los estándares.
- Representar de forma visual la información al usuario.

Las técnicas de verificación pueden aplicarse a todas las técnicas y tecnologías de vigilancia actuales: PSR, SSR, ADS-B y multilateración. La función de verificación de SASS-C proporciona información de performance 24/7.

5.1.2 Predicción

La función de predicción permite calcular de forma teórica la *performance* de las infraestructuras de vigilancia, la probabilidad de recepción de mensajes y saber cómo de precisa es la posición calculada.

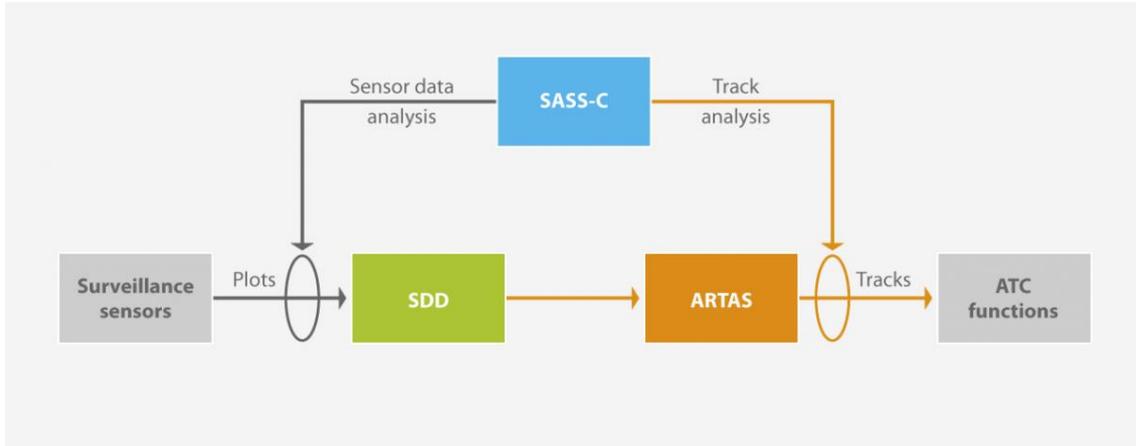


Figura 5-5 – Ejemplo de uso SASS-C [8]

Capítulo 6. Protocolo ASTERIX

6.1 Introducción

El protocolo ASTERIX es un protocolo estándar diseñado por Eurocontrol con la finalidad de intercambiar información entre distintos sistemas de vigilancia y centros de control mediante una estructura de mensajes determinada y estandarizada [14].

Tradicionalmente, cada fabricante de sistemas de vigilancia, implementaba tecnologías propietarias, esto provocaba que la integración entre los diferentes sistemas fuera una tarea muy complicada. Esto cambió cuando los organismos reguladores se empezaron a involucrar en el control de los servicios de vigilancia aérea (OACI, Eurocontrol...), así pues, se han desarrollado códigos “abiertos” de transmisión de datos para sistemas de detección aérea. Este código que se va a proceder a explicar es uno de los más usados a nivel mundial hoy en día.

ASTERIX es un acrónimo que se desglosa en “All Purpose **S**tructure **E**urocontrol **S**ur**R**veillance **I**nformation **E**xchange”, su desarrollo corre a cargo del Surveillance Task Force for Radar Data Exchange de Eurocontrol (STFRDE). Este organismo, se encarga de las publicaciones relativas a las diferentes categorías ASTERIX y otros menesteres. El citado protocolo codifica la información que obtiene de las aeronaves detectadas por el correspondiente sistema de vigilancia, dentro de una trama de datos que transmitirá a los diferentes puntos de interés.

A continuación, se hablará de la gran relevancia que ostenta el protocolo ASTERIX en la vigilancia aérea contemporánea por el motivo esgrimido anteriormente, la integración de sistemas y el intercambio de datos de vigilancia entre diferentes regiones o sistemas que antiguamente emplearían diferentes modos de comunicar la información.

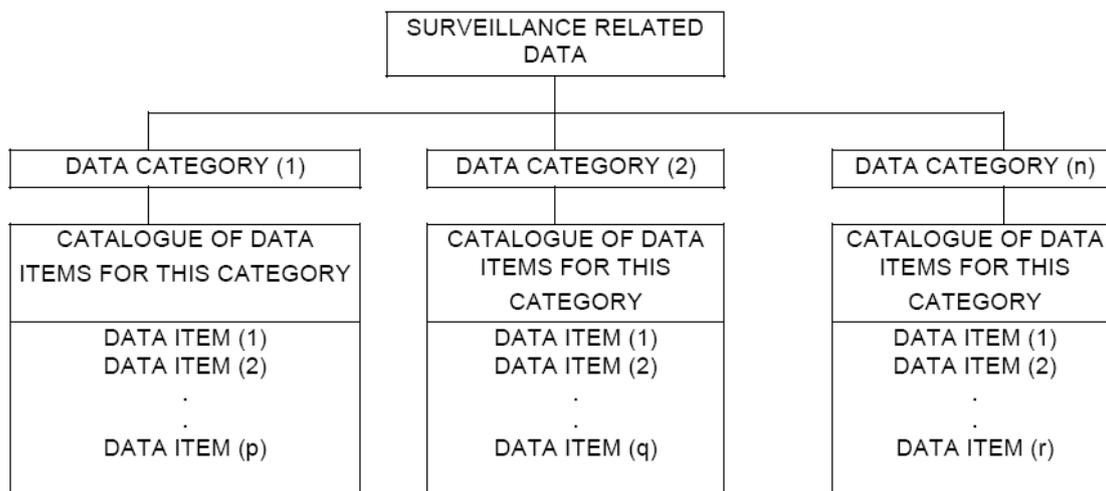
Se va a explicar: como se organizan los datos de ASTERIX, la estructura del mensaje, explicación detallada de la CAT020 y los campos más relevantes de esta categoría para este trabajo.

6.2 Objetivos ASTERIX

- Permite realizar un intercambio de datos de vigilancia aérea de forma sencilla y estándar, algo que todas las entidades y organizaciones implicadas en el campo se han afanado en promover.
- Es el código más utilizado a nivel mundial, lo cual facilita la integración de los sistemas de vigilancia de diferentes fabricantes y el intercambio de información entre distintas regiones de la OACI, lo que refuerza la visión internacional y unificada del control del tráfico aéreo.
- Su principal objetivo es permitir la transferencia de información entre dos equipos o aplicaciones diferentes usando unos datos estándar que serán entendidos por cualquier dispositivo.
- Las capas más inferiores para la comunicación no están definidas en el estándar y esto dependerá de los equipos encargados de transmitir y recibir la información

6.3 Organización de los datos ASTERIX

El intercambio de datos relacionado con la vigilancia entre distintos usuarios debe organizarse como se muestra en la siguiente figura [14]:



| | USER APPLICATION PROFILE | | | | | | | |
|-------------------|--------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| | DATA FIELD (1) | DATA FIELD (2) | DATA FIELD (3) | DATA FIELD (4) | DATA FIELD (5) | DATA FIELD (6) | DATA FIELD (7) | DATA FIELD (8) |
| DATA ITEM (1) | | x | | | | | | |
| DATA ITEM (2) | | | | | | x | | |
| DATA ITEM (3) | x | | | | | | | |
| DATA ITEM (4) | | | | x | | | | |
| DATA ITEM (5) | | | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |
| DATA ITEM (x) | | | x | | | | | |
| DATA ITEM (x + 1) | | | | | | | | x |
| ... | | | | | | | | |
| DATA ITEM (q) | | | | | x | | | |

Figura 6-1 – Organización de los datos

6.3.1 Data Categories

Al igual que ocurre en internet o la tecnología móvil, todos los datos que se pretendan intercambiar en un medio de comunicación, es lógico que se estandaricen. Esta estandarización en el caso de ASTERIX se divide en diferentes categorías. Dichas categorías, que definen el tipo de datos intercambiado debe de ser estándar y el mismo para todos los usuarios que empleen ASTERIX [14].



El hecho de clasificar esta información facilita:

- Identificación de que datos se están transmitiendo.
- Procesamiento de los datos recibidos.
- Encaminamiento de los datos a la aplicación receptora apropiada.

Se definen hasta 256 categorías diferentes de datos, su empleo dependiendo de la misma será el siguiente:

- CAT 000 a 127 → aplicaciones civiles y militares estándar.
- CAT 128 a 240 → reservadas para aplicaciones militares especiales.
- CAT 241 a 255 → aplicaciones civiles y militares no estándar.

Existe una lista completa de las categorías y su uso asignado, se puede consultar en la web de Eurocontrol, la información que contienen es pública y sin restricciones, aunque como es de esperar las aplicaciones militares especiales no están detalladas.

Algunos ejemplos de categorías y su uso:

- Cat 008 → Información monoradar de blancos meteorológicos.
- Cat 010 → Información de movimientos de superficie.
- Cat 020 → Mensajes de multilateración proporcionados por estaciones en tierra de multilateración.
- Cat 204 → Reconocimiento de imágenes aéreas. Empleada por la fuerza aérea alemana.

6.3.2 *Data Items*

Se trata de unidad de información más pequeña que puede transmitirse, cada categoría dispone de sus *data ítems* correspondientes y debidamente definidos.

Cada data ítem que se use tiene una identificación única, puesto que como se verá a continuación, incluye referencia a un número de data ítem y a la CAT a la que pertenece, por lo que no habrá dos iguales [14].

Los diferentes data items se definen de la siguiente forma → **I**nnn / **AAA**:

- **I**: Hace referencia a que la siguiente información presentada es un data ítem.
- **nnn**: tres números que indica la CAT a la que pertenece el data ítem correspondiente.
- **AAA**: tres números que identifican el data ítem en cuestión que se ha transmitido

Ejemplo:

I020/220 → Ítem de la categoría 20 con identificador 220. Siempre va a indicar el target address, que es el identificador inequívoco de la aeronave que lo produce.

6.3.3 *Data Field*

Para realizar la comunicación, varios data ítems deben de asignarse a *data fields*, cada uno de ellos está formado por un número entero de octetos y además se le referencia a través del FRN o Field Reference Number por sus siglas en inglés. Como se relacionan los data ítems y los data fields está estandarizado a través del User Application Profile.

6.3.4 *User Application Profile*

Es el mecanismo por el cual se estandariza la correspondencia entre los data ítems y los data fields, para cada aplicación haciendo uso de la estructura de los mensajes ASTERIX.

La UAP es una tabla de control vinculada al programa de empaquetado/desempaquetado de los sistemas de procesamiento de mensajes. Se encarga de definir que data ítems serán utilizados, su longitud, su asignación a los diferentes data fields y los requisitos específicos que deben ser normalizados para una transmisión e interpretación satisfactoria de los mensajes.

De esta forma se optimiza de forma sencilla la transmisión de datos sin necesidad de realizar modificaciones en los distintos elementos, teniendo en cuenta la frecuencia de aparición de determinados data ítems. Además, permite flexibilidad de elección entre las distintas formas de representar la misma información.

6.4 Estructura general de un mensaje ASTERIX

Los datos que se deseen transmitir deben de consistir de uno o más data blocks.

6.4.1 *Data Block*

Un *data block* está formado por [14]:

- Un octeto de datos conocido como categoría (CAT), el cual indica a qué categoría pertenecen los datos transmitidos.
- Dos octetos encargados de indicar el tamaño del bloque (LEN), incluye los campos CAT y LEN.
- Uno o más registros, los cuales contienen datos de la misma categoría.

Cada uno de los registros tiene una longitud variable, pero con un límite de octetos estipulado. La longitud del bloque de datos será siempre un múltiplo entero de octetos. Por otro lado, el tamaño máximo de un bloque de datos será de mutuo acuerdo entre el emisor de los datos y los usuarios.

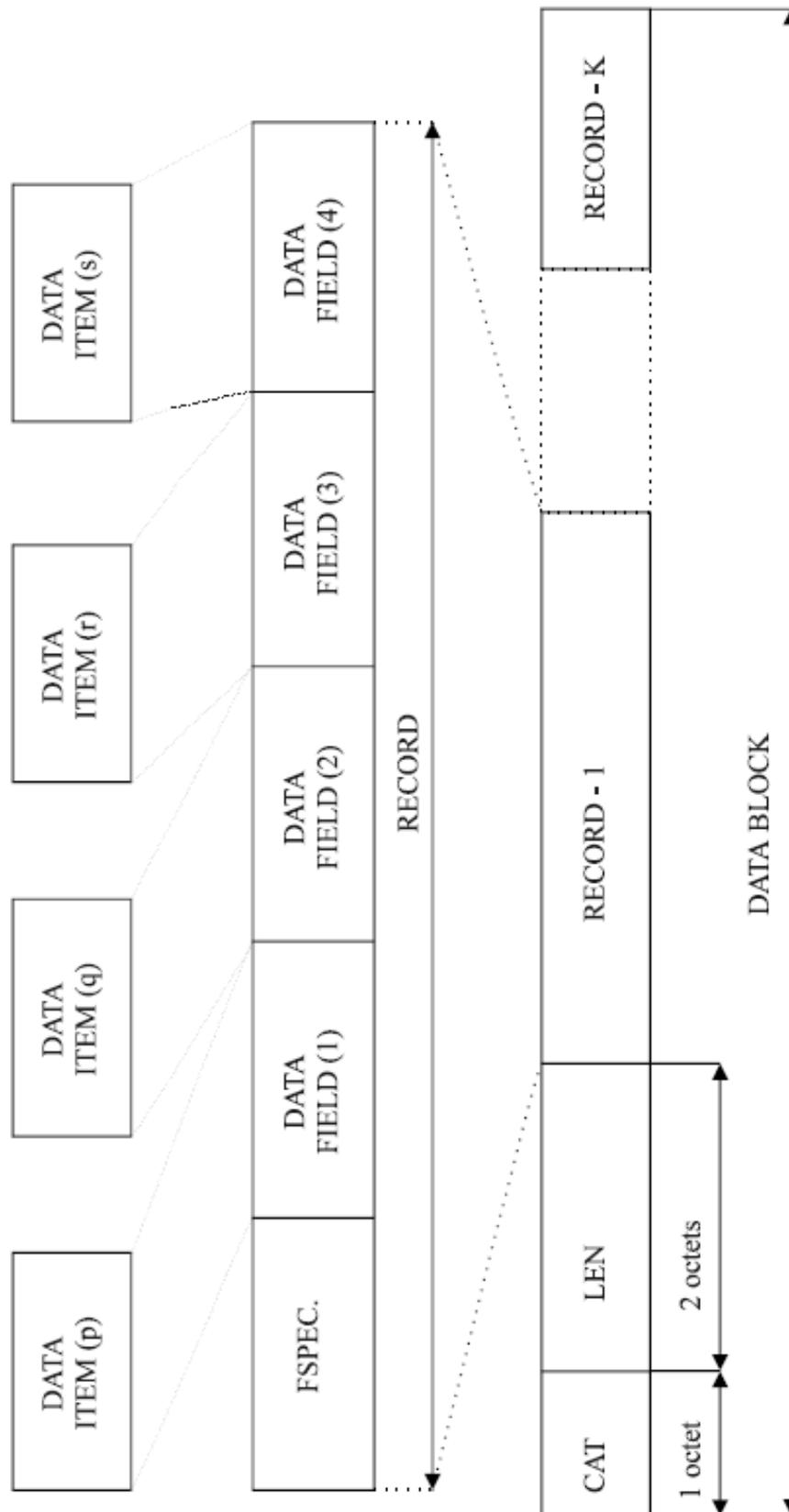


Figura 6-2 – Estructura de un bloque de datos [14]

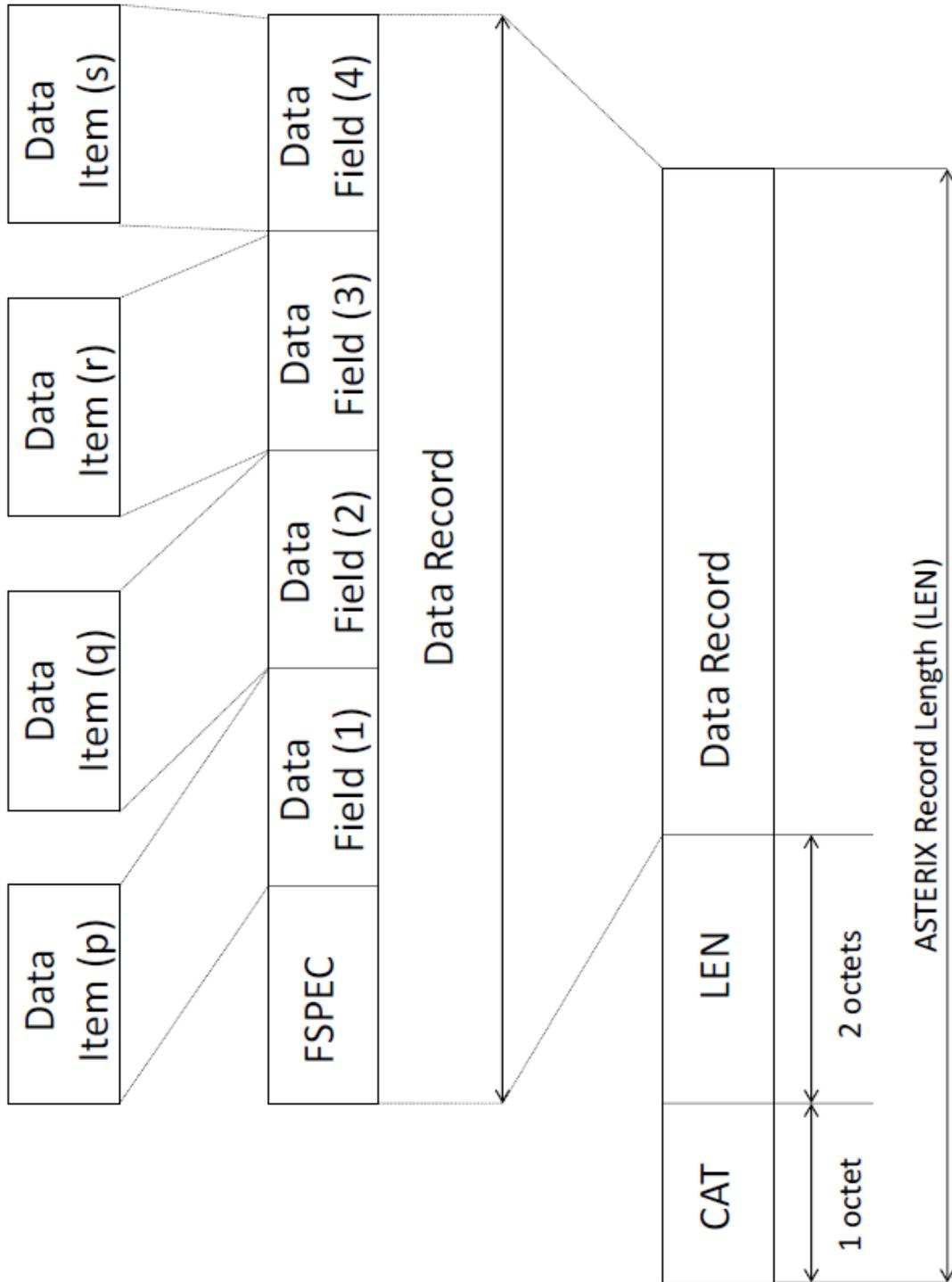


Figura 6-3 – Estructura de un registro [14]



6.4.2 Records

Un *record* o registro, debe de contener información de una sola categoría de datos que necesita una aplicación concreta y debe de estar constituido por [14]:

- Un octeto que indica de que categoría (CAT) pertenecen los datos que se van a transmitir a continuación.
- Dos octetos que indican el tamaño del registro (LEN), incluyendo los campos de CAT y LEN.
- Un registro de datos de longitud variable está formado por:
 - Un campo llamado Field Specification (FSPEC) el cual tiene longitud variable, se puede entender como una tabla de contenidos en forma de secuencia de bits, donde cada uno de los bits que lo forman indica la presencia (si está a 1) o ausencia (si está a 0) de un data field.
 - Un número variable de data fields. Cada uno de ellos está asociado con un solo data ítem, como está definido por el UAP.

Para cada data ítem se debe de poseer una regla de codificación indicando si el data ítem es obligatorio u opcional y las condiciones bajo las que este debe de ser incluido en el registro ASTERIX. La longitud de un registro debe siempre ser un múltiplo de octetos.

6.5 Identificación de la fuente

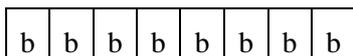
El sistema de identificación ASTERIX está compuesto por dos subcampos:

| | Nombre del campo | Tipo de elemento | Tamaño |
|-----|----------------------------|------------------|----------|
| SAC | System Area Code | Binary | 1 octeto |
| SIC | System Identification Code | Binary | 1 octeto |

El formato de los campos es el siguiente:

6.5.1 System Area Code (SAC)

El campo SAC consiste en un número de ocho bits asignado a un área geográfica o un país concreto. Tendrá la forma ilustrada a continuación:



Donde cada b representa un dígito binario.

6.5.2 System Identification Code (SIC)

El campo SIC consiste en un número de ocho bits asignado a cada sistema (estación de vigilancia, sistema de procesamiento, servidor...) localizado en el área geográfica o país definido en el SAC. En el caso de sistemas virtuales de vigilancia más de un SIC puede ser asignado al mismo sistema físico.

Tendrá la forma ilustrada a continuación:

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| b | b | b | b | b | b | b | b |
|---|---|---|---|---|---|---|---|

Donde cada b representa un dígito binario.

6.6 Envío de datos radar

Después de procesarse todos los datos de los diferentes sensores o equipos y cuando estos se han trasladado ya a formato ASTERIX, se procederá a su envío al centro de control para su uso y explotación. Se enviarán a los diferentes operadores de control de tránsito aéreo y control radar. Para esto se utiliza el protocolo de propósito general punto a punto HDLC (High-Level Data Link Control) de la ISO.

6.7 Descripción de la CAT 020

La categoría 020 describe la aplicación de mensajes ASTERIX a la transmisión de información de blancos obtenidos mediante multilateración [15].

Para la transmisión de datos de multilateración se han definido dos tipos de mensajes:

- Target reports
- Service messages

La categoría 020 se centra en los *target reports*, los *service messages* se definen y explican en la categoría 019.

En la categoría 020 solo se define un UAP y debe ser usado tanto para los *target reports* como para los *service messages*. La estructura es como se muestra en la siguiente figura:

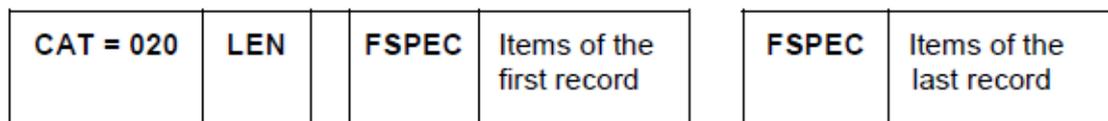


Figura 6-4 – Estructura del data block de CAT 020 [15]

6.7.1 Estándar data ítems en CAT020

Los data ítems mostrados en la siguiente tabla son aquellos estandarizados y usados para la transmisión de datos de multilateración. En las siguientes páginas se explicarán con más detalle aquellos empleados para la realización de este trabajo [15].

| Data Ítem | Descripción | Resolución |
|-----------|---|-----------------------|
| I020/010 | Identificador de la fuente | N.A. |
| I020/020 | Informe de descripción del blanco | N.A. |
| I020/030 | Condiciones de error | N.A. |
| I020/041 | Posición en coordenadas WGS-84 | 180/2 ²⁵ |
| I020/042 | Posición en coordenadas cartesianas | 0.5 m |
| I020/050 | Código Mode-2 en representación octal | N.A. |
| I020/055 | Código Mode-1 en representación octal | N.A. |
| I020/070 | Código Mode-3/A en representación octal | N.A. |
| I020/090 | Altura sobre el nivel del mar en representación binaria | ¼ FL |
| I020/100 | Código Mode-C | 1 FL |
| I020/105 | Altura geométrica (WGS-84) | 6.25 ft |
| I020/110 | Altura medida (coordenadas locales) | 6.25 ft |
| I020/140 | Hora del día | 1/128 s |
| I020/161 | Número de seguimiento | N.A. |
| I020/170 | Estado de seguimiento | N.A. |
| I020/202 | Velocidad calculada en coordenadas cartesianas | 0.25 m/s |
| I020/210 | Aceleración calculada | 0.25 m/s ² |
| I020/220 | Identificador del blanco | N.A. |
| I020/230 | Estado del vuelo | N.A. |
| I020/245 | Identificación del blanco | N.A. |
| I020/250 | Datos Modo S | N.A. |
| I020/260 | Informe de resolución | N.A. |
| I020/300 | Identificación de flota del vehículo | N.A. |
| I020/310 | Mensaje pre-programado | N.A. |
| I020/400 | Contribución a los receptores | N.A. |
| I020/500 | Precisión de la posición | 0.25 / 0.5 m |

Tabla 6-1 – Data items CAT 020

6.7.2 Descripción de los data ítems

A continuación, se va a proceder a describir los data ítems más relevantes para la realización de este trabajo, se va a incluir una imagen de cada uno de los octetos que lo forman [15].

6.7.2.1 Ítem I020/020 Informe de descripción del blanco

Formato: Longitud variable, puede tener hasta dos octetos en caso de que la información en el segundo octeto se quiera transmitir.

Estructura:

Primer octeto:

| Octet no. 1 | | | | | | | |
|-------------|----|----|------|-----|-----|----|----|
| 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| TYP | | | | | | | FX |
| SSR | MS | HF | VDL4 | UAT | DME | OT | |

Figura 6-5 – Estructura primer octeto I020/020

Segundo octeto:

| Octet no. 1 | | | | | | | |
|-------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| RAB | SPI | CHN | GBS | CRT | SIM | TST | FX |

Figura 6-6 – Estructura octeto de extensión I020/020

En este campo el interés radica en los bits 8 y 5:

Bit 8 (RAB) → = 0 Dato viene de un transpondedor de un blanco
= 1 Dato viene de un blanco de prueba

Bit 5 (GBS) → = 0 El transpondedor no asegura encontrarse en tierra
= 1 El transpondedor se encuentra en tierra

6.7.2.2 Item I020/042 posición en coordenadas cartesianas

Formato: Longitud fija de seis octetos para todo el data ítem.

Estructura:

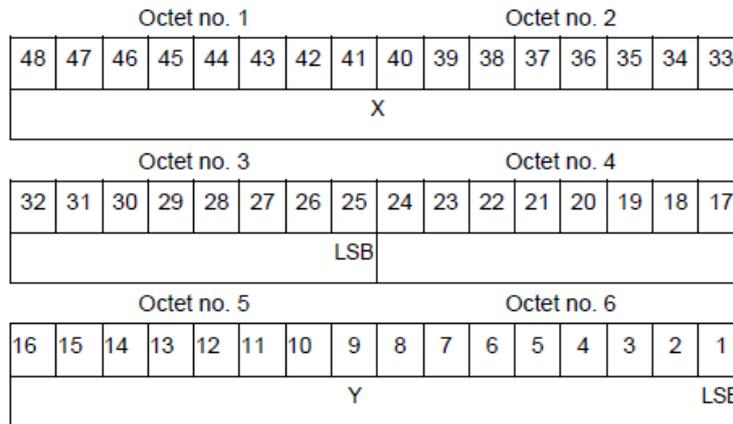


Figura 6-7 – Estructura I020/042

- Bits 48/25 → X
- Bit 25 → 0.5 m, rango máximo = +/- 4194.3km
- Bits 44/1 → Y
- Bit 1 → 0.5 m, rango máximo = +/- 4194.3km

6.7.2.3 Item I020/090 Nivel de vuelo (altura)

Formato: Longitud fija de dos octetos para todo el data ítem

Estructura:

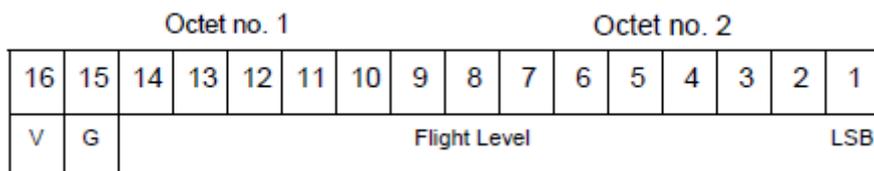


Figura 6-8 – Estructura I020/090

- Bit 16 → = 0 Código validado
= 1 Código no validado
- Bit 15 → = 0 Por defecto
= 1 Código confuse
- Bits 14/1 → Nivel de vuelo

6.7.2.4 Item I020/140 Hora del día

Formato: Longitud fija de tres octetos para todo el data ítem

Estructura:

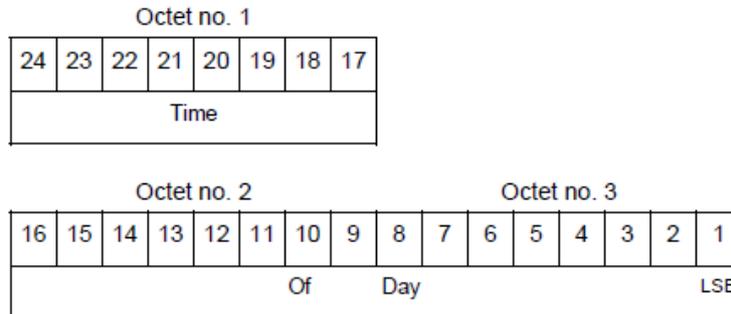


Figura 6-9 – Estructura I020/140

Nota: Cada día a la media noche el valor se resetea a 0.

6.7.2.5 Item I020/202 Velocidad calculada en coordenadas cartesianas

Formato: Longitud fija de 4 octetos para todo el data ítem

Estructura:

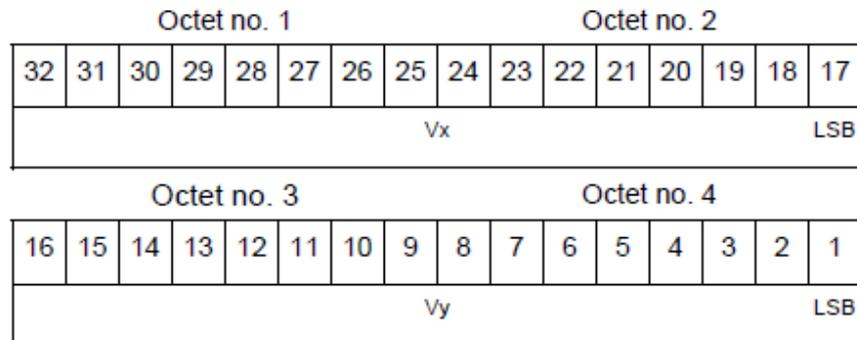


Figura 6-10 – Estructura I020/202

Bits 32/18 → Velocidad en coordenada X

Bits 16/2 → Velocidad en coordenada Y

Bits 17 y 1 → 0.25 m/s

6.7.2.6 Item I020/220 Target Address

Formato: Longitud fija de 3 octetos para todo el data ítem

Estructura:

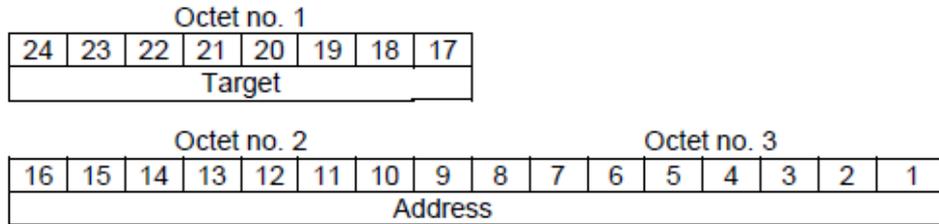


Figura 6-11 – Estructura I020/220

6.7.2.7 Item I020/500 Desviación estándar de la posición

Formato: Data ítem compuesto, comprimiendo un primer subcampo en un octeto, seguido de uno o más subcampos.

Estructura:

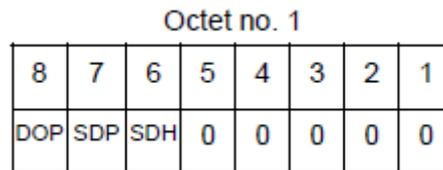


Figura 6-12 – Estructura I020/500 1

Estructura del subcampo 1

DOP de la posición

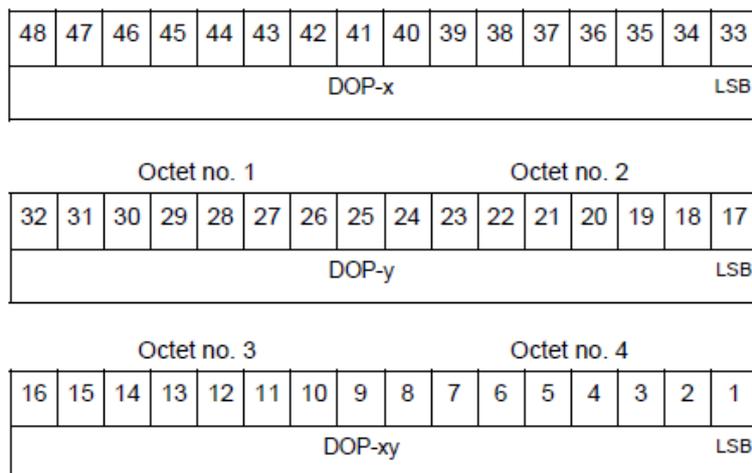


Figura 6-13 – Estructura I020/500 2

Bits 32/25 (DOP-x) → DOP sobre el eje X

Bits 24/17 (DOP-y) → DOP sobre el eje Y

Bits 16/1 (DOP-XY) → $\rho(X, Y)$

Estructura del subcampo 2

Desviación estándar de la posición

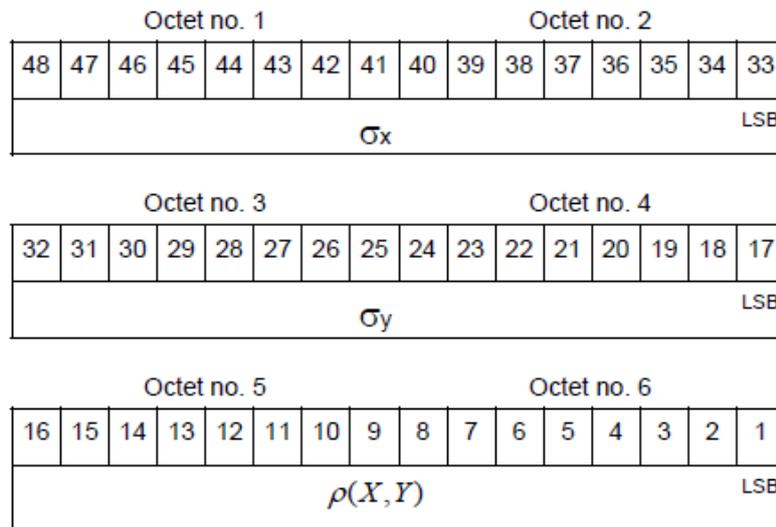


Figura 6-14 – Estructura I020/500 3

Bits 48/33 () → Desviación estándar de la componente X

Bits 32/17 () → Desviación estándar de la componente Y

Bits 16/1 () → Coeficiente de correlación en las dos componentes

Estructura del subcampo 3

Desviación estándar de la altura geométrica

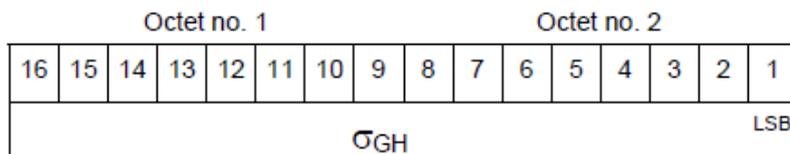


Figura 6-15 – Estructura I020/500 4

Capítulo 7. Filtros de seguimiento

En este capítulo se van a ver las técnicas más usuales para estimar la posición de una aeronave. Los algoritmos que se van a explicar en profundidad incluyen los filtros que se han desarrollado y empleado en el trabajo: filtro g-h, filtro g-h-k y filtro de Kalman. Se van a explicar también algunas variantes especiales de estos. Se darán también las ecuaciones para su diseño [18].

7.1 Introducción

Se va a empezar indicando por que la predicción y tracking son necesarios en un radar. Se va a asumir que se tiene un radar típico de vigilancia como el que se muestra en la figura 7.1 Este tipo de radar continuamente rota 360°, con un periodo de por ejemplo 10 segundos. Este tipo de radar proporciona información en dos dimensiones sobre el blanco. La primera dimensión es la distancia a la que está el blanco (calculando el tiempo que tarda el pulso en llegar al blanco y volver); la segunda dimensión es el azimuth del blanco, que viene determinado por el ángulo azimuth, (ver figura 7.1) [18] que el haz del radar está apuntando.

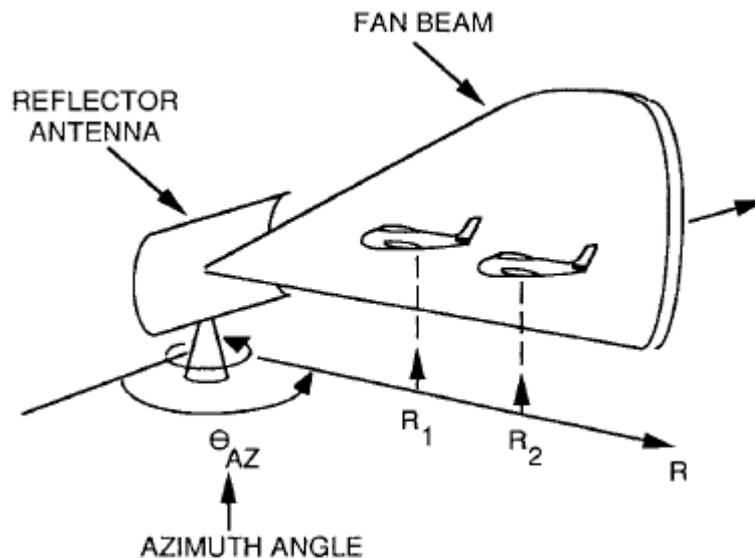


Figura 7-1 – Ejemplo radar vigilancia

Se asume que en el tiempo $t = t_1$ el radar está apuntando en un ángulo θ y se detectan dos blancos a distancias R_1 y R_2 . En el segundo escaneo en el tiempo $t = t_1 + T$ ($t_1 + 10$ sec), se vuelven a detectar dos blancos (ver figura 7.2) [18]. La pregunta que surge es si estos dos blancos en el segundo escaneo son los mismos o dos nuevos blancos. La respuesta a esta pregunta es muy importante tanto en aplicaciones civiles como militares, ya que una confusión puede provocar una colisión o un conflicto.

Se sigue con la suposición de que dos ecos se han detectado en el segundo escaneo, se ha determinado que estos dos ecos provienen de los mismos blancos que en el primer escaneo. La pregunta que surge es como conseguir una asociación buena del eco del blanco 1 en el segundo escaneo con el eco de ese mismo blanco en el primer escaneo y lo mismo con el blanco 2.

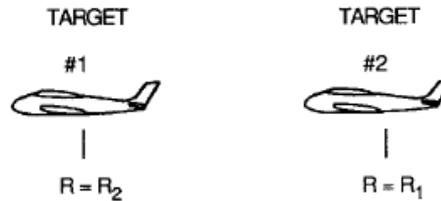
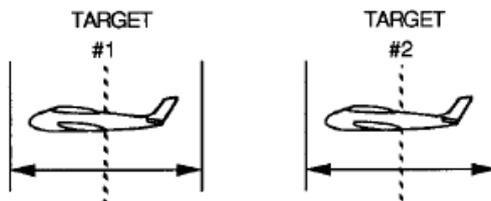
FIRST SCAN, $t=t_1$ SECOND SCAN, $t = t_2 = t_1 + T = t_1 + 10 \text{ SEC}$ 

Figura 7-2 – Problema con el tracking

Si se hace una asociación errónea, entonces se asociará una velocidad incorrecta a ambos blancos, lo cual dependiendo del contexto podría tener un resultado muy grave. Las posibilidades de que esto ocurra, se reducen mucho si se puede predecir con antelación donde van a estar los ecos de los dos blancos antes de que se reciban. Esta predicción se puede hacer de forma sencilla si se tiene una estimación de posición y velocidad de los blancos en el instante de tiempo del primer escaneo. Entonces se puede predecir la distancia que el blanco 1 se ha movido durante el periodo de escaneo y como resultado tener una estimación de la posición futura del blanco. Asumiendo que la predicción se ha hecho para el blanco 1 y que la posición en la que el blanco 1 se espera que esté es la que viene indicada en la figura superior con una línea punteada. Puesto que la posición y velocidad exacta no son sabidas en el primer escaneo, esta predicción no es exacta, por lo que en realidad se tiene una ventana en la que el blanco se espera que pueda estar. Esta ventana sería: $\pm 3\sigma$ siendo σ el valor de la desviación estándar de la suma de la predicción más el rms del rango de medida. Si el blanco se detecta dentro de esta ventana, con una gran probabilidad será un eco del blanco 1.

Estos filtros nacieron con este propósito, pero en este trabajo no se van a emplear con este fin, no se van a emplear para predecir una posición en tiempo real. Se van a usar para evaluar la calidad de los sistemas de multilateración del aeropuerto de Barcelona. La empresa encargada de explotar el radar de dicho aeropuerto, pretende evaluar la calidad de su radar, por lo que periódicamente recoge datos de los que el radar proporciona en tiempo real y los almacena para posteriormente y de forma off-line evaluarlos. Los filtros se van a emplear y parametrizar con los datos grabados. La idea es mejorar la calidad de los datos obtenidos, reducir así el error de medida y poder evaluar la performance de los equipos que se están empleando en dicho aeropuerto viendo que filtro ajusta mejor y puede ayudar a obtener trayectorias de referencia más limpias.

7.2 Filtro Gh

Los filtros g-h son filtros recursivos con una estructura bastante simple. Son estimadores de segundo orden, es decir, estiman la posición futura y la velocidad de un objeto basándose en un modelo dinámico donde el blanco en cuestión se mueve a velocidad constante [18].

La notación que se va a emplear en estos filtros es la siguiente: el superíndice '*' denota que es una posición estimada. Los parámetros sin asterisco representan valores reales en posición y velocidad del objeto. El segundo subíndice indica el instante en el que se ha producido la última medida para realizar la estimación. Por lo que: $x_{n,n-1}^*$ indica la posición estimada en el instante n basada en las medidas realizadas hasta el instante $n-1$; en cambio $x_{n,n}^*$ denota la posición estimada en el instante n teniendo en cuenta la medida realizada en ese instante, es decir, teniendo en cuenta y_n . Esta será la notación empleada a partir de ahora.

La ecuación de actualización de la posición que se emplea es la siguiente:

$$x_{n,n}^* = x_{n,n-1}^* + g_n(y_n - x_{n,n-1}^*) \quad 7-1$$

En el parámetro g_n el subíndice n se usa para indicar que este parámetro va a depender del instante de tiempo en el que se pretende estimar la posición. La función de este parámetro será dar mayor o menor peso a la medida y_n . Es decir, g_n determina si se desea que la estimación de la posición esté más cerca de la medida o de la predicción anterior $x_{n,n-1}^*$.

A pesar de que como se ha mencionado anteriormente, este filtro se emplea en situaciones en las que el blanco se mueve a velocidad constante, se realiza también una estimación de la velocidad. La ecuación de actualización de la velocidad es la siguiente:

$$\dot{x}_{n,n}^* = \dot{x}_{n,n-1}^* + h_n \left(\frac{y_n - x_{n,n-1}^*}{T} \right) \quad 7-2$$

El parámetro h_n tiene una función similar a g_n , es decir, dar un peso mayor o menor a la medida

Las dos ecuaciones anteriores proporcionan la actualización de la posición y de la velocidad del blanco en el instante n después de realizar la medida y_n , estas ecuaciones son conocidas como ecuaciones de filtrado.

$$\dot{x}_{n,n}^* = \dot{x}_{n,n-1}^* + h_n \left(\frac{y_n - x_{n,n-1}^*}{T} \right) \quad 7-3$$

$$x_{n,n}^* = x_{n,n-1}^* + g_n(y_n - x_{n,n-1}^*) \quad 7-4$$

Ahora es posible predecir la posición de un blanco y su velocidad en el instante $n+1$ y repetir el proceso de actualización en el instante $n+1$ después de tener la medida y_{n+1} , la cual será realizada

en el instante $n+1$. Con este objetivo se obtienen las siguientes ecuaciones de predicción asumiendo una velocidad constante:

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* = \dot{\mathbf{x}}_{n,n}^* \quad 7-5$$

$$\mathbf{x}_{n+1,n}^* = \mathbf{x}_{n,n}^* + T\dot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* \quad 7-6$$

Estas ecuaciones permiten realizar una transición entre la velocidad y posición en el instante n a la velocidad y posición en el instante $n+1$, por eso se conocen también como ecuaciones de transición.

Los dos pares de ecuaciones anteriores permiten realizar el seguimiento del blanco en cuestión. La combinación de ambas ecuaciones proporciona las ecuaciones de predicción y filtrado de un filtro g-h.

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* = \dot{\mathbf{x}}_{n,n-1}^* + \mathbf{h}_n \left(\frac{y_n - \dot{\mathbf{x}}_{n,n-1}^*}{T} \right) \quad 7-7$$

$$\mathbf{x}_{n+1,n}^* = \mathbf{x}_{n,n-1}^* + T\dot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* + \mathbf{g}_n (y_n - \mathbf{x}_{n,n-1}^*) \quad 7-8$$

Estos filtros también se pueden conocer como filtros $\alpha - \beta$, la única diferencia es la notación, puesto que los parámetros $\alpha - \beta$ equivalen a los parámetros g - h.

7.2.1 Filtros g-h especiales

7.2.1.1 Filtro de Benedict-Bordner

El filtro de Benedict-Bordner es un filtro g-h donde los parámetros g y h están elegidos de forma que minimiza el error de predicción cuando se produce un salto de velocidad, es necesario recordar que en el filtro g - h explicado anteriormente se asume que la velocidad es constante a lo largo de toda la trayectoria, algo que rara vez será cierto [18].

En esta figura se puede apreciar la situación anteriormente descrita, la línea violeta indica la trayectoria real del blanco, el cual en un instante de tiempo concreto sufrirá un cambio de velocidad, como resultado, en la figura puede verse como el filtro cometerá un error de predicción en los instantes posteriores, línea azul, hasta que finalmente vuelve a seguir la trayectoria de forma satisfactoria:

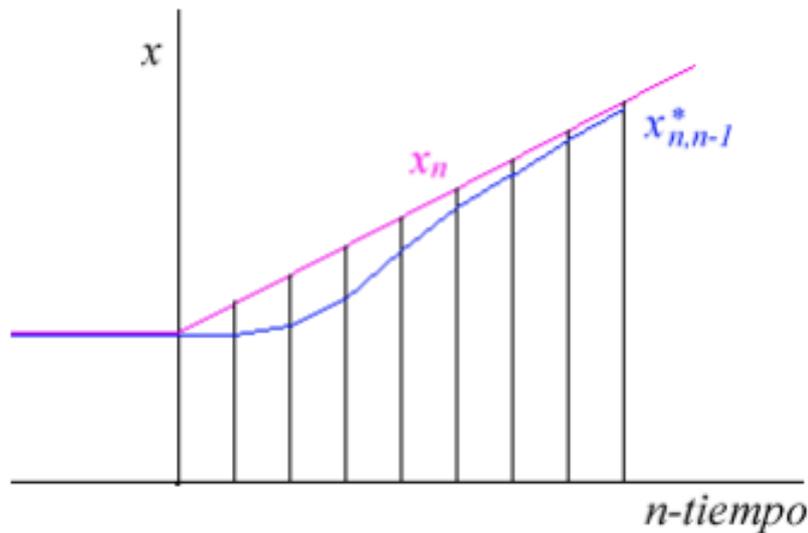


Figura 7-3 – Error resultante del salto de velocidad en filtro g-h [18]

La velocidad es 0 hasta que en un instante dado pasa a una velocidad constante pero distinta de 0.

El objetivo es minimizar la ecuación que describe la diferencia entre la trayectoria real y la trayectoria predicha, lo que se conoce como error de transición. El error total de transición es la suma de cuadrados de esta diferencia:

$$Dx_{n+1,n}^* = \sum_{n=0}^{\infty} (x_{n+1,n}^* - x_{n+1})^2 \quad 7-9$$

Este tipo de filtros están diseñados de forma que los parámetros g y h dicho error. Para que se produzca esta minimización la relación entre los parámetros h y g debe ser:

$$h = \frac{g^2}{2-g} \quad 7-10$$

7.2.1.2 Filtro críticamente amortiguado

Supóngase que se pretende estimar la posición de un blanco en un instante de tiempo $n = 7$ a partir de las medidas obtenidas en los instantes anteriores de tiempo, desde $n = 0$ hasta $n = 6$. La solución más sencilla sería trazar la línea que mejor ajuste a los puntos “a ojo” que ya son conocidos y con ello obtener en el instante $n = 7$ la predicción deseada, tal y como se muestra en la siguiente figura:

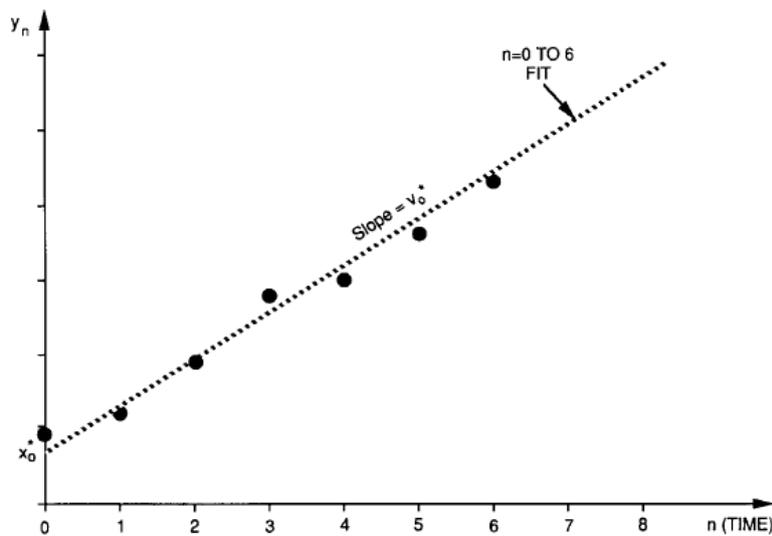


Figura 7-4 – Ajuste erróneo para predicción [18]

Claramente esta no es la solución más exacta que puede realizarse a este problema, lo que puede hacerse es optimizar y calcular la recta que mejor ajuste estos puntos. Concretamente la recta de mínimos cuadrados o linear least-squares. Esta recta nos dará el error mínimo entre la línea y las medidas obtenidas con anterioridad al minimizar la suma de cuadrados de las diferencias entre las medidas y una línea recta.

$$\epsilon t = \sum_{n=0}^N \epsilon_n^2 = \sum_{n=0}^N (x_n^* - y_n)^2 \quad 7-11$$

El problema que introduce este cálculo es que se le otorga el mismo peso al primer dato que al último, siendo normalmente más importante la medida directamente anterior a la que se desea predecir. Esto se soluciona introduciendo un término θ en el cálculo del error, este número estará comprendido entre 0 y 1, de tal forma que se le de un peso menor a las medidas más antiguas:

$$\epsilon D = \sum_{n=0}^N \theta \epsilon_{n-r}^2 \quad 7-12$$

Se puede realizar una serie de cálculos, que relacionan los parámetros g y h presentados con anterioridad en el filtro g - h con el término incluido en la ecuación anterior, de forma que se introduzca esta minimización del error a la hora de realizar las predicciones directamente con las mismas ecuaciones que se han presentado, estos cálculos quedan fuera del objetivo de este trabajo. El resultado obtenido es el siguiente:

$$g = 1 - \theta^2 \quad 7-13$$

$$h = (1 - \theta)^2 \quad 7-14$$

De esta manera no es necesario almacenar todas las medidas realizadas para realizar cada vez el cálculo de mínimos cuadrados, tan solo las ultimas predicciones de posición y velocidad. Estos datos contienen toda la información encasaria.

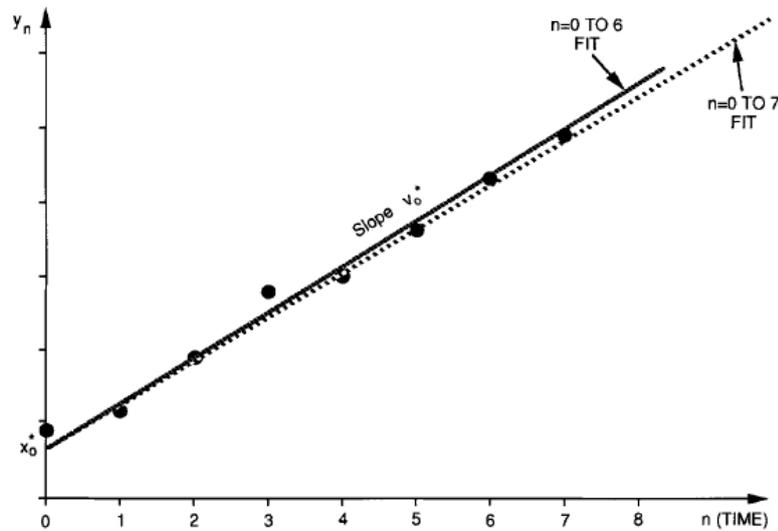


Figura 7-5 – Ajuste de mínimos cuadrados para calcular la posición en $n = 7$ [18]

Para calcular el valor de θ se emplearán las ecuaciones anteriores junto al parámetro conocido como VRF (Variance Reduction Factor), este valor relaciona el error de medida σ_x^2 con la varianza de $x_{n+1,n}^*$ y viene definido por:

$$VRF(x_{n+1,n}^*) = \frac{VAR(x_{n+1,n}^*)}{\sigma_x^2} = \frac{\sigma_{n+1,n}^2}{\sigma_x^2} = \frac{2g^2 + 2h + gh}{g(4 - 2g - h)} \quad 7-15$$

7.2.2 Inicialización del filtro

Este es un punto relevante que no se ha tratado al explicar el principio del filtro g-h, se ha asumido que ya se parte de una posición adecuada. Es importante resaltar que los parámetros g y h no pueden ser constantes al inicio del filtrado si se pretende realizar una buena predicción, se emplean constantes cuando el filtro ya está asentado. Si se emplean los valores g y h fijos que pueden calcularse según las fórmulas de los filtros de Benedict-Bordner o críticamente amortiguado, los resultados no serán satisfactorios [18].

El mejor procedimiento para inicialización del seguimiento es el de mínimos cuadrados, donde los parámetros g y h varían a lo largo del tiempo según n mediante las siguientes expresiones:

$$h_n = \frac{6}{(n+2)(n+1)} \quad 7-16$$

$$g_n = \frac{2(2n+1)}{(n+2)(n+1)} \quad 7-17$$

$$VRF = \frac{2(2n+3)}{(n+1)n} \quad 7-18$$

Con esta selección los pesos decrecen según aumenta n . Al principio se asume que se tiene una estimación no muy buena siendo g y h grandes, pero va mejorando con el paso del tiempo, por lo que g y h decrecen.

7.3 Filtro GHK

Los filtros g-h-k modelan la dinámica del blanco suponiendo que el blanco ya no se mueve a una velocidad constante, si no que esta varía con el tiempo, en este caso se mueve con una aceleración constante, por lo que las ecuaciones de movimiento del blanco correspondientes serían [18]:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + \dot{\mathbf{x}}_n T + \ddot{\mathbf{x}}_n \frac{T^2}{2} \quad 7-19$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1} = \dot{\mathbf{x}}_n + \ddot{\mathbf{x}}_n T \quad 7-20$$

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n+1} = \ddot{\mathbf{x}}_n \quad 7-21$$

Mediante el mismo procedimiento que con los filtros g-h se obtienen las ecuaciones de actualización del filtro:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n,n}^* = \ddot{\mathbf{x}}_{n,n-1}^* + \frac{2k}{T^2} (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_{n,n-1}^*) \quad 7-22$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{n,n}^* = \dot{\mathbf{x}}_{n,n-1}^* + \frac{h}{T} (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_{n,n-1}^*) \quad 7-23$$

$$\mathbf{x}_{n,n}^* = \mathbf{x}_{n,n-1}^* + \mathbf{g}_n (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_{n,n-1}^*) \quad 7-24$$

Y del mismo modo se obtienen las ecuaciones de predicción:

$$\ddot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* = \ddot{\mathbf{x}}_{n,n}^* \quad 7-25$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1,n}^* = \dot{\mathbf{x}}_{n,n}^* + \ddot{\mathbf{x}}_{n,n}^* T \quad 7-26$$

$$\mathbf{x}_{n+1,n}^* = \mathbf{x}_{n,n}^* + \dot{\mathbf{x}}_{n,n}^* T + \ddot{\mathbf{x}}_{n,n}^* \frac{T^2}{2} \quad 7-27$$

Combinando estas ecuaciones de la misma forma que para el caso anterior se alcanzan las ecuaciones para el filtro g-h-k de predicción y filtrado:

$$\ddot{x}_{n+1,n}^* = \ddot{x}_{n,n-1}^* + \frac{2k}{T^2} (y_n - x_{n,n-1}^*) \quad 7-28$$

$$\dot{x}_{n+1,n}^* = \dot{x}_{n,n-1}^* + \dot{x}_{n,n-1}^* + \frac{h+2k}{T} (y_n - x_{n,n-1}^*) \quad 7-29$$

$$x_{n+1,n}^* = \ddot{x}_{n,n-1}^* + \dot{x}_{n,n-1}^* + x_{n,n-1}^* + \left(\frac{h+2k}{T} + g_n \right) (y_n - x_{n,n-1}^*) \quad 7-30$$

El filtro $g-h-k$ o $\alpha-\beta-\gamma$ proporcionará un resultado satisfactorio cuando la aceleración sea constante, pero tendrá un error constante cuando esta aceleración varíe.

Los filtros explicados con anterioridad también existen para el caso del $g-h-k$, donde estos parámetros son fijos.

7.3.1 Filtros $g-h-k$ especiales

Los filtros de esta sección son equivalentes a los presentados para los filtros $g-h$, como el críticamente amortiguado, Benedict-Bordner y el polinomial de memoria extendida.

7.3.1.1 Filtro críticamente amortiguado

El filtro críticamente amortiguado representa el filtro que minimiza el error cuadrático medio para un blanco moviéndose con aceleración constante. En este caso los parámetros g , h y k vienen dados por:

$$g = 1 - \theta^3 \quad 7-31$$

$$h = 1.5(1 - \theta^2)(1 - \theta) \quad 7-32$$

$$k = 0.5(1 - \theta)^3 \quad 7-33$$

$$VRF(x_{n+1,n}^*) = \frac{8hk^2}{T^4(4-2g-h)(gh+gk-2k)} \quad 7-34$$

7.3.1.2 Filtro Benedict-Bordner

El filtro $g-h-k$ Benedict-Bordner está diseñado para minimizar el error transitorio ante un cambio repentino de la aceleración. La relación entre g , h y k en este caso debe de ser:

$$2h - g(g + h + k) = 0 \quad 7-35$$

$$g = 0.5(-h + \sqrt{8h}) \quad 7-36$$

$$h = 2(2 - g) - 4\sqrt{1 - g} \quad 7-37$$

$$k = \frac{h^2}{4g} \quad 7-38$$

El filtro de memoria extendida o mínimos cuadrados, al igual que ocurre con el filtro gh es utilizado en el proceso de inicialización de seguimiento. Se caracteriza porque los parámetros g , h y k cambian a lo largo del tiempo.

En el caso del filtro g-h-k diseñado y empleado en este trabajo, los valores para los parámetros g , h y k que variarán con el tiempo han sido los siguientes:

$$g = 3 \frac{(3n^2 + 3n + 2)}{(n+1)(n+2)(n+3)} \quad 7-39$$

$$h = 18 \frac{(2n+1)}{(n+1)(n+2)(n+3)} \quad 7-40$$

$$k = \frac{60}{(n+1)(n+2)(n+3)} \quad 7-41$$

7.4 Filtro Kalman

Los filtros g-h y g-h-k son estimadores que modelan la dinámica del blanco como si tuviera una velocidad o aceleración constante. En un caso real, esto no suele producirse puesto que existe una incertidumbre en la trayectoria o cambios en la velocidad. El filtro de Kalman de dos estados es un filtro g-h que tiene en cuenta esta incertidumbre añadiendo una componente aleatoria a la dinámica del blanco [10][18]:

$$\mathbf{x}_{n+1} = \mathbf{x}_n + T\dot{\mathbf{x}}_n \quad 7-42$$

$$\dot{\mathbf{x}}_{n+1} = \dot{\mathbf{x}}_n + \mathbf{u}_n \quad 7-43$$

Donde u_n posee una varianza σ_u^2 . Representa un cambio aleatorio en la velocidad en el instante previo a la observación $n+1$. u_n es independiente del cambio de instante de tiempo de n a $n+1$ para todo valor de n .

El filtro óptimo en este caso es un filtro g-h, con las mismas ecuaciones de predicción y actualización de estado, donde los parámetros g_n y h_n dependen de n . A su vez dependen de la varianza de la medida y de la precisión con la que se desea conocer la posición.

Puede surgir la pregunta de ¿Por qué usar filtro de Kalman si las ecuaciones son iguales a las que se han presentado anteriormente en los filtros g-h y g-h-k? La clave está en que los valores de g y h o g , h y k en el caso de Kalman de tres estados son funciones de la varianza de la medida de posición del radar. Algunas de las ventajas que puede ofrecer el filtro de Kalman son las siguientes [12]:

- Permite el manejo óptimo de las medidas de precisión que varían con n ; medidas perdidas; tiempo entre medidas consecutivas no igual.
- Permite el uso óptimo de información a priori si está disponible.
- Permite que la dinámica del blanco sea usada directamente para optimizar los parámetros del filtro, y esto es clave en la parametrización que se va a realizar del filtro más adelante.
- Se añade una componente de velocidad aleatoria, lo que fuerza al filtro de Kalman a ser siempre estable.

Las ecuaciones de predicción en este caso pueden escribirse de la siguiente forma, la cual ilustra la dependencia de los parámetros g, h, k con la varianza de la medida de posición:

$$\mathbf{x}_{n,n}^* = \mathbf{x}_{n,n-1}^* + \frac{VAR(x_{n,n}^*)}{VAR(y_n)} (\mathbf{y}_n - \mathbf{x}_{n,n-1}^*) \quad 7-44$$

Siendo $\frac{VAR(x_{n,n}^*)}{VAR(y_n)} = g_n$. La derivación de esta equivalente está fuera de los objetivos de este trabajo, aunque puede consultarse en la bibliografía correspondiente.

De la misma manera se puede derivar que el parámetro h_n :

$$\mathbf{h}_n = \frac{COV(x_{n,n}^*, x_{n,n}^*)}{VAR(y_n)} \quad 7-45$$

Notación matricial:

En este apartado se va a presentar la notación matricial para el filtro de Kalman. En primer lugar se debe anotar la dinámica del modelo en forma matricial:

$$\mathbf{X}_{n+1} = \boldsymbol{\phi} \mathbf{X}_n \quad 7-46$$

$$\mathbf{X}_n = \begin{bmatrix} x_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \quad 7-47$$

$$\boldsymbol{\phi} = \begin{bmatrix} \mathbf{1} & T \\ \mathbf{0} & \mathbf{1} \end{bmatrix} \quad 7-48$$

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ \dot{x}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n + T\dot{x}_n \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} \quad 7-49$$

\mathbf{X}_n es el vector de trayectoria del blanco. Este vector se representa mediante una matriz columna. $\boldsymbol{\phi}$ es la matriz de transición de estados. Esta matriz posibilita la transición del vector estado \mathbf{X}_n en un tiempo n al vector estado \mathbf{X}_{n+1} en tiempo $n + 1$ transcurrido un periodo T . Para finalizar la dinámica del sistema solo es necesario añadir el componente aleatorio U_n .



$$X_{n+1} = \phi X_n + U_n \quad 7-50$$

$$\begin{bmatrix} x_{n+1} \\ \dot{x}_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_n + T\dot{x}_n \\ \dot{x}_n + u_n \end{bmatrix} \quad 7-51$$

A continuación, se expresan los datos medidos en forma matricial de la siguiente forma:

$$Y_n = MX_n + N_n \quad 7-52$$

$M = [1 \ 0]$ = matriz de observación

$N_n = [v_n]$ = error de observación

$Y_n = [y_n]$ = matriz de medida

La ecuación anterior se conoce como ecuación de observación del sistema. Esta ecuación relaciona las cantidades estimadas con un parámetro observado.

La siguiente ecuación presentada es la conocida como ecuación de predicción, mediante ésta se predice la posición y velocidad de un blanco en el instante $n + 1$ basándose en la posición y velocidad del instante anterior.

$$X_{n,n}^* = X_{n,n-1}^* + H_n(Y_n - MX_{n,n-1}^*) \quad 7-53$$

La matriz H_n que se puede observar en la ecuación anterior es una matriz que contiene las constantes g_n y h_n .

$$H_n = \begin{bmatrix} g_n \\ h_n \\ T \end{bmatrix} \quad 7-54$$

En el caso del filtro de Kalman g-h-k la matriz H_n viene dada por:

$$H_n = \begin{bmatrix} g_n \\ h_n \\ T \\ \frac{2k_n}{T^2} \end{bmatrix} \quad 7-55$$

Para obtener estas constantes g_n y h_n se aplicará la siguiente ecuación:

$$H_n = S_{n,n-1}^* M^T [R_n + M S_{n,n-1}^* M^T]^{-1} \quad 7-56$$

Donde

$$S_{n,n-1}^* = COV(X_{n,n-1}^*) \quad 7-57$$

$$S_{n,n-1}^* = \phi S_{n,n-1}^* \phi^T + Q_n \quad 7-58$$

La matriz Q_n , covarianza del elemento aleatorio del modelo de dinámica del blanco, proporciona la magnitud de la incertidumbre de la trayectoria del blanco. La componente aleatoria de la velocidad añadida a la trayectoria del blanco.

$$Q_n = COV[U_n] = E[U_n U_n^T] \quad 7-59$$

$$Q_n = COV[U_n] = \overline{U_n U_n^T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & u_n^2 \end{bmatrix} \quad 7-60$$

La matriz R_n , es la matriz de covarianza del error N_n de los valores que se han medido, proporciona información sobre como de precisos son los datos proporcionados por el sensor radar.

$$R_n = COV[Y_n] = COV[N_n] = E[N_n N_n^T] \quad 7-61$$

$$R_n = COV[N_n] = \overline{v_n v_n^T} = [\sigma_x^2] \quad 7-62$$

Por último, la matriz $S_{n,n-1}^*$, matriz de covarianza del vector de estado $X_{n,n-1}^*$, cuyo significado físico es el de un estimador de la precisión a la hora de predecir la posición del blanco y su velocidad (también su aceleración en caso de que se trate de un filtro de tres estados) en un instante de tiempo n basada en las medidas hechas en el instante de tiempo $n - 1$ y también sus predecesores.:

$$S_{n,n-1}^* = COV(X_{n,n-1}^*) = E[X_{n,n-1}^* X_{n,n-1}^{*T}] \quad 7-63$$

$$S_{n-1,n-1}^* = COV(X_{n-1,n-1}^*) = [I - H_{n-1} M] S_{n-1,n-2} \quad 7-64$$

7.4.1 Filtro Kalman Singer

El modelo Singer es el estándar para modelar las maniobras de un móvil. Sin embargo, su principal debilidad reside en que depende del conocimiento de la aceleración, y no siempre es factible obtener una estimación precisa de la misma, como se verá en el capítulo de desarrollo del trabajo en nuestros casos particulares [18].

La aceleración se va a considerar una función aleatoria cuya función de autocorrelación viene dada por:

$$E[\ddot{x}(t)\ddot{x}(t+t')] = \sigma^2 \exp\left(-\frac{|t'|}{\tau}\right) \quad 7-65$$

Donde τ es la constante de tiempo de maniobra del blanco, σ^2 es la desviación estándar del tiempo de maniobra del blanco y t es el intervalo de muestreo. Algunos valores típicos para τ son 60 si el giro es lento o valores entre 10 y 30 si es un giro de un móvil rápido, pero no demasiado. Por otro lado, el modelo Singer asume que la aceleración tiene una función de densidad de probabilidad tal y como muestra la figura inferior. Esta figura indica que el blanco estará acelerando con su aceleración máxima o A_{\max} con una probabilidad P_{\max} y con aceleración nula con una probabilidad P_0 .

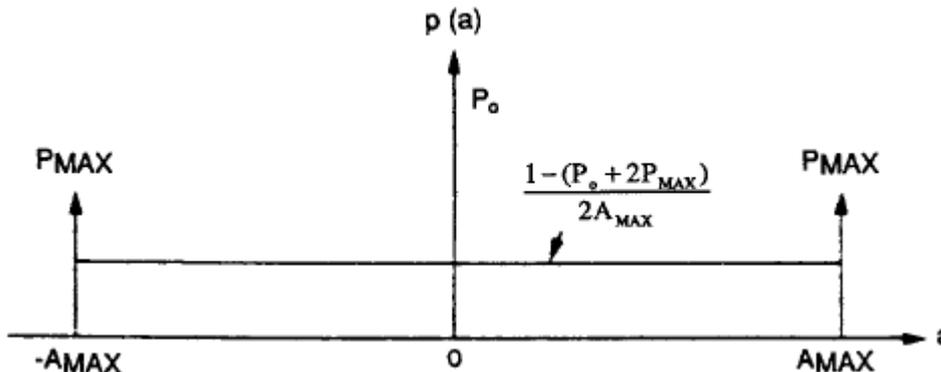


Figura 7-6 – Función de densidad de probabilidad de aceleración en Singer [18]

La matriz de transición es ahora la siguiente para el caso en el que T/τ sea pequeño, es decir, el tiempo de muestreo es mucho menor que el tiempo de maniobra, se asume que se va a dar esta situación siempre para los sistemas de vigilancia que se tienen entre manos.

$$\phi = \begin{bmatrix} 1 & T & 0.5T^2 \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad 7-66$$

La matriz de covarianza en el caso citado anteriormente en el que el tiempo de muestreo es mucho menor que el tiempo de maniobra es la siguiente:



$$Q = 2\alpha\sigma_a^2 \begin{bmatrix} \frac{1}{20}T^5 & \frac{1}{8}T^4 & \frac{1}{6}T^3 \\ \frac{1}{8}T^4 & \frac{1}{3}T^3 & \frac{1}{2}T^2 \\ \frac{1}{6}T^3 & \frac{1}{2}T^2 & T \end{bmatrix} \quad 7-67$$

El filtro de Kalman para este modelo de blanco tiene una matriz de observación que viene dada por:

$$M = [1 \quad 0 \quad 0] \quad 7-68$$

Se inicializa usando:

$$x_{1,1}^* = y_1 \quad 7-69$$

$$\dot{x}_{1,1}^* = \frac{y_1 - y_0}{T} \quad 7-70$$

$$\ddot{x}_{1,1}^* = 0 \quad 7-71$$

La ecuación de la dinámica del blanco viene dada por la ya conocida:

$$X_{n+1} = \phi X_n \quad 7-72$$

La ecuación de actualización vendrá definida de la misma manera que en el filtro de Kalman explicado anteriormente:

$$X_{n,n}^* = X_{n,n-1}^* + H_n(Y_n - MX_{n,n-1}^*) \quad 7-73$$

Capítulo 8. Desarrollo del trabajo

En este capítulo se va a detallar el procedimiento seguido para la realización del trabajo. Para la realización del mismo se ha empleado el software matemático Matlab, también se ha empleado como ayuda para la visualización de los resultados el programa Google Earth. Se darán los detalles del procedimiento, así como de las funciones más relevantes que han sido implementadas, en los anexos se podrán encontrar las funciones de los filtros que se han diseñado.

8.1 Tratamiento de los datos

Los datos con los que se va a trabajar durante todo el desarrollo son datos procedentes del sistema de multilateración del aeropuerto de Barcelona-el Prat, un sistema instalado por la empresa Indra que cuenta con 36 estaciones receptoras y 6 estaciones de referencia que hablan con la estación central de proceso a través de unos anillos de fibra óptica [19]. Una vez procesada, esta información pasa de la estación central a ser empleada por los controladores y demás empleados de la Torre del Aeropuerto de Barcelona-el Prat [22].



Figura 8-1 – Localización de algunas estaciones MLAT [20]

Es importante conocer la situación del ARP o Airport Reference Point del aeropuerto en cuestión con el que se trabaja, ya que, para representarlo sobre un mapa en coordenadas geodésicas, para hacer cambios de coordenadas geométricas...será necesario este punto. En el caso de los aeropuertos españoles, este dato puede consultarse en la web de ENAIRE [21].

ARP Barcelona-El Prat → $41^{\circ} 17' 49''$ N $02^{\circ} 04' 41''$ E
O lo que es lo mismo → Lat = 41.2970766
Lon = 2.0784629167
h = 4.32



Figura 8-2 – ARP Barcelona-El Prat

Los datos de las medidas de las aeronaves se obtienen en formato .json, que es un formato de texto sencillo para el intercambio de datos. Su principal ventaja como formato de intercambio de datos es que resulta mucho más sencillo escribir un analizador sintáctico para él.

La sintaxis en JSON tiene disponibles los siguientes tipos de datos:

- Números
- Cadenas
- Booleanos
- Null
- Array
- Objetos: Colecciones no ordenadas de pares de la forma **<nombre>:<valor>** separados por comas y puestas entre llaves. El nombre tiene que ser una cadena y el valor puede ser cualquier tipo de dato.

De esta última forma están estructurados los datos con los que se van a trabajar, si se inspecciona el documento JSON que se proporciona se puede observar en el siguiente ejemplo, el cual es sólo una entrada, es decir, una medición del sistema de multilateración. Como esta hay miles en el archivo:



```
{"id":1,  
"length":61,  
"crc":"D52237D8",  
"timestamp":59246286,  
"CAT020":{  
  "I010":{  
    "SAC":0,  
    "SIC":107},  
  "I020":{  
    "SSR":0,  
    "MS":1,  
    "HF":0,  
    "VDL4":0,  
    "UAT":0,  
    "DME":0,  
    "OT":0,  
    "FX":1,  
    "RAB":0,  
    "SPI":0,  
    "CHN":0,  
    "GBS":1,  
    "CRT":0,  
    "SIM":0,  
    "TST":0,  
    "FX":0},  
  "I140":{  
    "ToD":41683.9921875},  
  "I042":{  
    "X":-297.0000000,  
    "Y":-135.5000000},  
  "I161":{  
    "spare":0,  
    "TrkNb":612},  
  "I170":{  
    "CNF":0,  
    "TRE":0,  
    "CST":0,  
    "CDM":0,  
    "MAH":0,
```



```
"STH":0,  
"FX":0},  
"I070":{  
  "V":0,  
  "G":0,  
  "L":0,  
  "spare":0,  
  "Mod3A":"6754"},  
"I202":{  
  "Vx":-22.2500000,  
  "Vy":-10.5000000},  
"I090":{  
  "V":0,  
  "G":0,  
  "FL":-2.2500000},  
"I220":{  
  "TAddr":"8960F2"},  
"I245":{  
  "STI":0,  
  "spare":0,  
  "TId":"UAE185  "},  
"I500":{  
  "DOP":{  
    "DOPx":0.0000000,  
    "DOPy":0.0000000,  
    "DOPxy":27.7500000},  
  "SDP":{  
    "SDPx":0.0000000,  
    "SDPy":0.0000000,  
    "SDPxy":0.0000000},  
  "SDH":{  
    "STD_GH":0.0000000}},  
"I400":[{  
  "RUx":0},{  
  "RUx":0},{  
  "RUx":0},{  
  "RUx":0},{  
  "RUx":198},{  
  "RUx":82},{
```



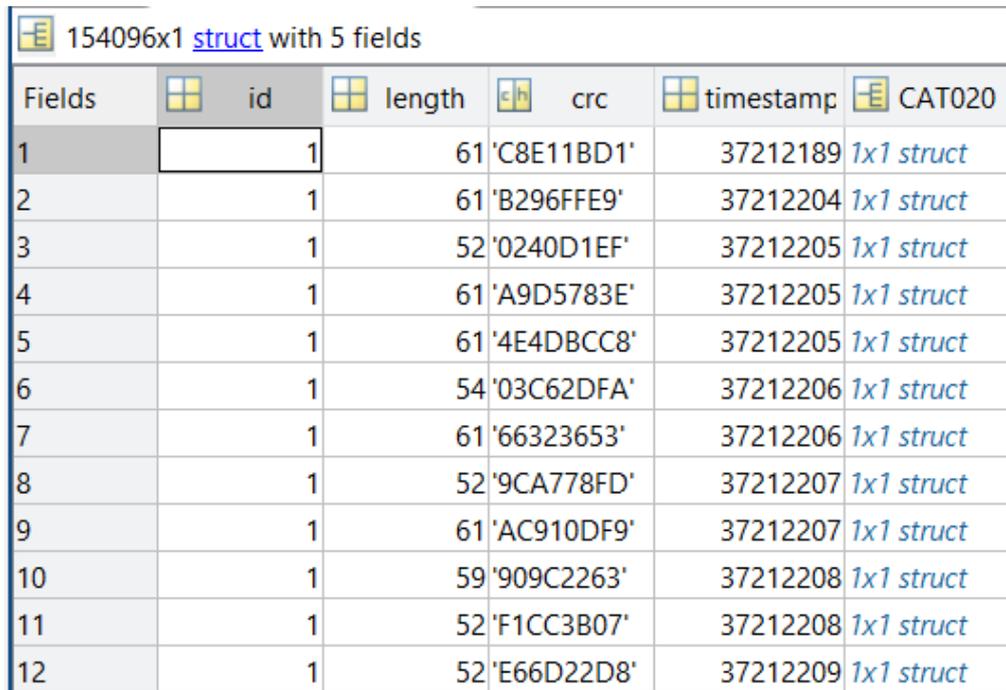
```
"RUx":0},{  
"RUx":1}}}],
```

Estudiando este ejemplo de medición, puede verse como cada dato va a venir conformado por una serie de objetos:

- Id → Un identificador del conjunto de mediciones, todas las mediciones van a llevar el mismo id.
- Length → Como de grande es la medición, ya que no todas las mediciones van a traer los mismos campos dentro de la CAT020, cabe recordar que no todos los campos son obligatorios, por lo que es posible que algunos tengan más datos que otros.
- CRC → Cyclic redundancy check, un identificador que sirve para comprobar que el bloque en su conjunto no contiene errores.
- Timestamp → Un identificador temporal, no confundir con el campo ToD que contiene un archivo en formato ASTERIX.
- CAT020 → Indica de que categoría ASTERIX es el archivo. Este objeto engloba a otros, en concreto los objetos que anida son los data ítems de esta categoría que contiene esta medición. Se puede ver cómo están los que se han destacado en el capítulo dedicado a ASTERIX que se han identificado como relevantes e importantes para poder desarrollar el trabajo:
 - I220
 - I140
 - I042
 - I090
 - I202
 - I500

El siguiente paso será hacer usables estos datos en el entorno de trabajo seleccionado, en este caso Matlab. Existe una función predefinida en la herramienta que va a decodificar estos datos, en concreto la función es: `jsondecode()`. Se le pasa como entrada el archivo en cuestión que se desea decodificar y puesto que la entrada es un array de objetos, la salida de la función será un array de celdas, en Matlab este tipo de dato se le conoce como `cell`. Es importante asegurarse de que la entrada al decodificador es del tipo `char`/caracteres. Aunque carece de relevancia para el desarrollo del trabajo y se podría continuar manejando los datos en un `cell`, se han transformado en una estructura o `struct` en lenguaje Matlab mediante la función preconstruida `cell2struct()`

Una vez se dispone de los datos en este formato se puede observar algo así:



| Fields | id | length | ch | timestamp | CAT020 |
|--------|----|--------|------------|-----------|------------|
| 1 | 1 | 61 | 'C8E11BD1' | 37212189 | 1x1 struct |
| 2 | 1 | 61 | 'B296FFE9' | 37212204 | 1x1 struct |
| 3 | 1 | 52 | '0240D1EF' | 37212205 | 1x1 struct |
| 4 | 1 | 61 | 'A9D5783E' | 37212205 | 1x1 struct |
| 5 | 1 | 61 | '4E4DBCC8' | 37212205 | 1x1 struct |
| 6 | 1 | 54 | '03C62DFA' | 37212206 | 1x1 struct |
| 7 | 1 | 61 | '66323653' | 37212206 | 1x1 struct |
| 8 | 1 | 52 | '9CA778FD' | 37212207 | 1x1 struct |
| 9 | 1 | 61 | 'AC910DF9' | 37212207 | 1x1 struct |
| 10 | 1 | 59 | '909C2263' | 37212208 | 1x1 struct |
| 11 | 1 | 52 | 'F1CC3B07' | 37212208 | 1x1 struct |
| 12 | 1 | 52 | 'E66D22D8' | 37212209 | 1x1 struct |

Figura 8-3 – Datos importados en Matlab

Estos datos no siguen ningún orden, y no están listos todavía para ser empleados, es más, es posible que existan mediciones catalogadas como prueba, que sean datos de aeronaves en aproximación, hay que recordar que interesan aquellos datos de aviones que se encuentran en pista y otras circunstancias que se explicarán a continuación, por lo que hay que tratarlos más en profundidad.

El siguiente paso es, mediante una serie de funciones (que se incluirán en los anexos del trabajo) eliminar todas las entradas que como se ha mencionado con anterioridad no son aptas para ser empleadas.

1. En primer lugar, se va a crear una función que elimine todas aquellas entradas en la estructura que no tengan el data ítem I220, este ítem se corresponde con el Taddr o Target Address. Este elemento, como se ha mencionado en el capítulo correspondiente a ASTERIX, identifica el blanco, en este caso va a servir para identificar las distintas trayectorias que se han monitorizado con los sistemas de multilateración y agrupar los datos que tengan el mismo Taddr.

Por otro lado, se van a eliminar los campos de Id, length, crc y timestamp ya que se ha identificado que no aportan nada relevante para el desarrollo del trabajo. Para ello se emplean las funciones relacionadas con estructuras `rmfield` para eliminar los campos mencionados e `isfield` para comprobar si el data ítem 220 se encuentra entre los incluidos para esa medición:

```
MLAT = rmfield(MLAT, 'id');
MLAT = rmfield(MLAT, 'length');
MLAT = rmfield(MLAT, 'crc');
MLAT = rmfield(MLAT, 'timestamp');
tiene_codigo = isfield(MLAT(i).CAT010, 'I220');
```

Simplemente si no existe el campo 220 se elimina esa entrada.

2. El segundo paso es comprobar con una función muy similar a la anterior, que no se trata de un blanco de pruebas, para ello se comprobará el estado del data ítem 042, si este tiene valor 1 quiere decir que el blanco es de prueba y se eliminará, ya que no se corresponde con datos reales. Como se ha dicho el procedimiento es muy similar al de la función anterior, recorrer la estructura y comprobar el valor del campo en cuestión:

```
RAB = MLAT(i).CAT020.I020.RAB;
```

Estos dos campos son los dos que harían que el dato fuera inservible para los intereses del trabajo, el siguiente paso es comprobar qué datos son correspondientes a trayectorias plenamente en superficie y que recorren el aeropuerto y qué datos se corresponden con aviones que o bien aterrizan o bien despegan.

3. Con el fin de realizar esta comprobación se ha realizado una función que va a clasificar los datos en dos estructuras diferentes a su salida dependiendo del valor que tenga el bit correspondiente al parámetro GBS del data ítem 020. Si el valor de GBS es 1, la medición se corresponde a una aeronave en tierra, si por el contrario es 0 se corresponde con un avión que está tomando tierra o emprendiendo la marcha. El procedimiento seguido es almacenar el valor para cada entrada e ir distribuyendo en las dos estructuras de salida según corresponda.

```
aire_tierra = MLAT(i).CAT020.I020.GBS;
```

Para que los datos sean ya manejables solo queda agrupar los diferentes datos según a qué trayectoria pertenezcan. Para ello se ha diseñado una función que realizará este cometido. Su funcionamiento será comprobar el TAddr de cada una de las mediciones y en caso de ser uno nuevo crear una nueva entrada en una estructura, la cual será el parámetro de salida, donde se añadirán todos los datos provenientes de los data ítems relevantes que se han mencionado ya con anterioridad:

```
CAT020AA{1,1}=[CAT020{1}.I220.TAddr];  
CAT020AA{1,2}=[CAT020{1}.I140.ToD];  
CAT020AA{1,3}=[CAT020{1}.I042.X];  
CAT020AA{1,4}=[CAT020{1}.I042.Y];  
CAT020AA{1,5}=[CAT020{1}.I090.FL];  
CAT020AA{1,6}=[CAT020{1}.I202.Vx];  
CAT020AA{1,7}=[CAT020{1}.I202.Vy];  
CAT020AA{1,8}=[CAT020{1}.I500.DOP.DOPx];  
CAT020AA{1,9}=[CAT020{1}.I500.DOP.DOPy];  
CAT020AA{1,10}=[CAT020{1}.I500.DOP.DOPxy];
```

El resultado en este caso, será una estructura con 60 entradas diferentes, correspondientes a cada una de las trayectorias que se han monitorizado, cada una de ellas contiene los 10 datos que se pueden observar arriba, pudiéndose en cualquier momento obtener nuevos datos que se encuentren en la CAT020 si fuera necesario su uso.

| 60x10 cell | | | | | | | | | | |
|------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | '344292' | 1x485 doub... |
| 2 | '342398' | 1x50 double |
| 3 | '4CA27C' | 1x93 double |
| 4 | '34568B' | 1x201 doub... |
| 5 | '440175' | 1x237 doub... |
| 6 | '34540F' | 1x5926 dou... |
| 7 | '344352' | 1x3679 dou... |
| 8 | '400C4A' | 1x408 doub... |
| 9 | '344348' | 1x3799 dou... |
| 10 | '344356' | 1x26 double |
| 11 | '3421D9' | 1x371 doub... |
| 12 | '4CA94D' | 1x250 doub... |
| 13 | '344351' | 1x1971 dou... |

Figura 8-4 – Datos ordenados por trayectoria

Ahora solo queda seleccionar las trayectorias que resulten interesantes, ya que manejar las 60 y trabajar con las 60 es algo que requeriría una cantidad de tiempo de la que no se dispone.

Para poder elegir las trayectorias se ha recurrido a la herramienta Google Earth y para poder importar los datos desde Matlab a un formato KMZ que permita la visualización de las trayectorias en la herramienta anteriormente citada se ha buscado una toolbox gratuita llamada 'KML toolbox' [17] y que ha sido descargada desde la web para intercambiar archivos de Matlab. Esta toolbox entre otras muchas cosas más complejas, permite generar un archivo KMZ a través de unos vectores con datos de latitud y longitud. Hay que recordar que los datos de los que se dispone son datos en coordenadas geométricas X/Y/Z. Por lo que habrá que convertirlas a coordenadas geodésicas, para ello se ha empleado la función:

```
[lat,lon,h] = enu2geodetic(xEast,yNorth,zUp,lat0,lon0,h0,spheroid)
```

Esta función tomará como entradas los vectores de x, y ,z que se han obtenido de los datos proporcionados y el punto de referencia u origen local de coordenadas geodésicas, que como se ha mencionado antes, se corresponde con el ARP del aeropuerto:

Lat0 = 41.2970766

Lon0 = 2.0784629167

H0 = 4.32

A la salida, esta función proporcionará vectores de latitud, longitud y altura correspondientes a la trayectoria que se haya seleccionado. Con ello se generará el KMZ a través de los comandos correspondientes de la toolbox mencionada con anterioridad. Son tres sencillos comandos en los que se genera un kml, se realiza un plot con los datos (en este caso en 2D ya que los aviones se encuentran en superficie) y por último se guarda.

```
tray = kml('tray6');
```

```
tray.plot(lon_6,lat_6);
```

```
tray.save
```

Obteniendo por ejemplo el siguiente resultado:

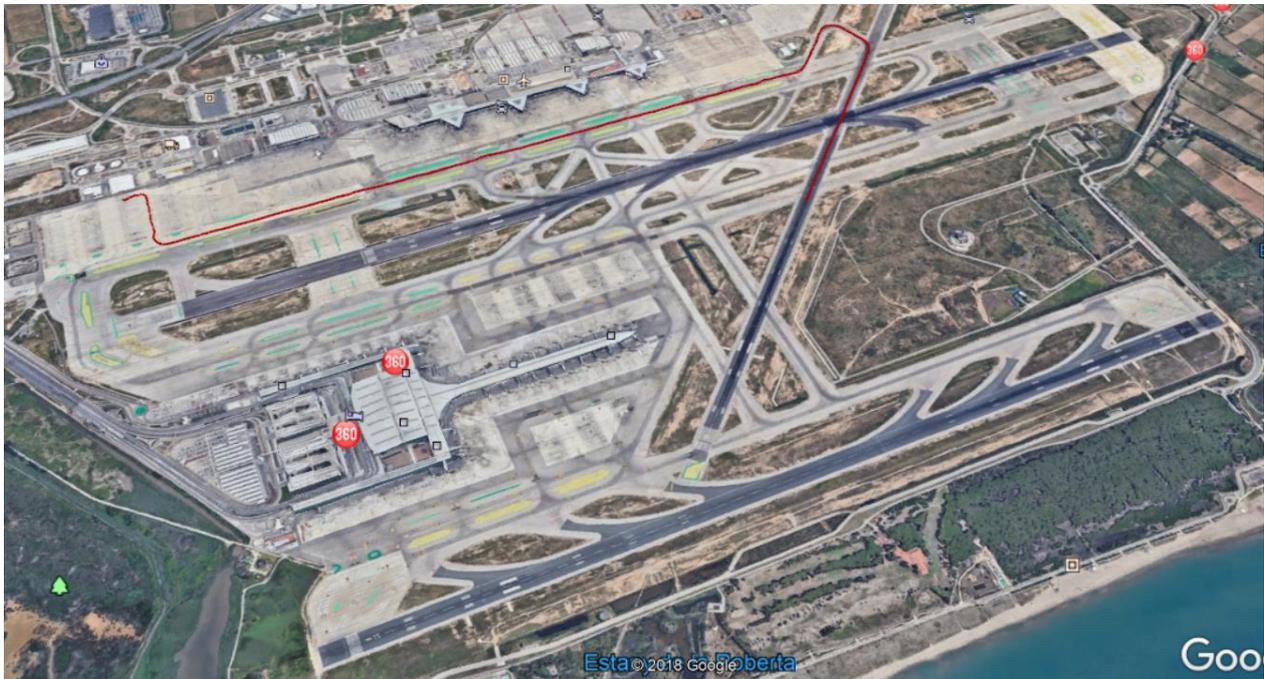


Figura 8-5 – Ejemplo de trayectoria

Aunque se han tratado de eliminar todos los datos que pudieran contener errores y no fueran útiles para el desarrollo del trabajo, se ha detectado que existen trayectorias que contienen errores y por tanto se han desechado como posibles seleccionadas para aplicar los filtros de seguimiento. Aplicando los conceptos y desarrollando trabajos como este se espera poder minimizar los errores de estos sensores y mejorar así la performance en los servicios que se ofrecen para el control del tráfico aéreo:



Figura 8-6 – Ejemplo de datos corruptos

El siguiente paso ha sido seleccionar diferentes trayectorias que cumplieran ciertos requisitos y además, representar todas las posibles maniobras, de forma que se ponga a prueba las mediciones y la respuesta de los filtros:

- Trayectorias que no fueran cortas
- Rectas largas
- Curvas cerradas
- Curvas abiertas
- Rectas cortas entre dos curvas
- Se ajusten con los datos proporcionados de DGPS

A continuación, se va a proceder a explicar este último punto relacionado con el DGPS y donde radica su importancia. A parte de los datos de multilateración, también han sido proporcionados datos obtenidos con el DGPS o GPS diferencial. Estos datos, se compararán con las trayectorias de referencia obtenidas por multilateración y se medirá la calidad de sus datos respecto a los obtenidos con los filtros de seguimiento.

Los datos del DGPS no tienen una correspondencia directa con las diferentes trayectorias de los sistemas de multilateración, por lo que no van a coincidir al 100% con las trayectorias que se seleccionen, ya que, aunque como se puede ver en la imagen inferior, contienen gran parte del aeropuerto, no disponen de algunas curvas o zonas que están presentes en una gran parte de las trayectorias. Teniendo en cuenta esto que se ha explicado, es otro factor a la hora de tener en cuenta que trayectorias usar, ya que deben coincidir lo máximo posible en los puntos que se consideren clave para evaluar la calidad de los datos.

Las mediciones del DGPS han sido proporcionadas como una sola gran trayectoria por así decirlo, por lo tanto, a estos datos tan solo ha sido necesario realizarles un cambio de coordenadas y plasmarlas en un kmz para poder visualizar el resultado.



Figura 8-7 – Datos DGPS

Teniendo todas las variables mencionadas anteriormente en cuenta, se han seleccionado las siguientes trayectorias:



Figura 8-8 - Trayectoria '342581'



Figura 8-9 - Trayectoria '4249B6'



Figura 8-10 - Trayectoria '345410'

8.2 MLAT – DGPS

A continuación, se va a proceder a comparar visualmente la trayectoria ofrecida por el sistema de multilateración con el sistema DGPS. Es importante recordar que las trayectorias no coinciden al 100% y se ha tratado de buscar la mayor cantidad de coincidencia y solape entre ambos conjuntos de datos.

8.2.1.1 Trayectoria '342581'



Figura 8-11 – MLAT – DGPS Trayectoria '342581'

8.2.1.2 Trayectoria '4249B6'



Figura 8-12 – MLAT – DGPS trayectoria '4249B6'

8.2.1.3 Trayectoria '345410'



Figura 8-13 MLAT – DGPS trayectoria '345410'

8.3 Diseño filtros de seguimiento

En este apartado se va a tratar el diseño de tres filtros que han sido explicados en el capítulo 7, en concreto el filtro g-h-k o $\alpha\beta\gamma$, filtro de Kalman de 3 estados y filtro de Kalman Singer. También se tratará como se han parametrizado a partir de los datos que han sido proporcionados y se presentarán los resultados obtenidos para las tres trayectorias que se han seleccionado en el apartado anterior.

8.3.1 Filtro GHK

Este filtro toma como parámetros de entrada el vector de posiciones medidas del blanco, el vector de una de las coordenadas geométricas. El vector de velocidades medidas, en la misma coordenada que la de posiciones y un vector de tiempos, este vector de tiempos debe de corresponderse con el periodo de actualización del sensor que ha realizado las mediciones. En este caso se ha tomado una muestra cada segundo, este dato se puede obtener viendo los datos del data ítem I140 que contiene la información de ToD, simplemente viendo el paso entre un punto y otro se puede saber.

Como salida se obtendrá la posición estimada, la velocidad estimada y la aceleración estimada. La aceleración se puede estimar debido a que estrata de un filtro g-h-k, donde las velocidades no son constantes.

Para la primera actualización del filtro se han tomado de las tablas existentes para régimen permanente unos valores de g, h y k concretos, después de probar con distintas combinaciones se han elegido los siguientes valores:

$$g=0.271;$$

$$h=0.029;$$

$$k=0.001;$$

Estos valores tan bajos, implican que se le va a dar un peso bajo al conjunto de predicciones anteriores y por lo tanto el mayor peso recaerá sobre el valor predicho anterior. El siguiente paso es inicializar el filtro para el primer punto:

$$x_a(1)=x(1);$$

$$v_a(1)=v(1);$$

$$a_a(1)=(v(2)-v(1))/(t(2)-t(1));$$

Hecho esto se empieza un bucle en el que los parámetros g,h y k se actualizarán en cada iteración, siempre y cuando cumplan que las ecuaciones presentadas en el capítulo 7 obtienen un valor de g, h y k mayor que los de régimen permanente:

$$g = 3 \frac{(3 * n^2 + 3n + 2)}{(n + 1)(n + 2)(n + 3)}$$



$$h = 18 \frac{(2n + 1)}{(n + 1)(n + 2)(n + 3)}$$

$$k = \frac{60}{(n + 1)(n + 2)(n + 3)}$$

Este tipo de actualizaciones de los parámetros en función del instante de tiempo, se conoce como filtro de memoria extendida o mínimos cuadrados. Una vez realizado este cálculo tan solo queda escribir las ecuaciones de predicción y actualización:

```
%Ecuaciones de predicción
x_p(n)=x_a(n-1)+T*v_a(n-1)+(T^2/2)*a_a(n-1);
v_p(n)=v_a(n-1)+T*a_a(n-1);
a_p(n)=a_a(n-1);

%Ecuaciones de actualización
x_a(n)=x_p(n)+g_din*(x(n)-x_p(n));
v_a(n)=v_p(n)+h_din*(v(n)-v_p(n));
a_a(n)=a_p(n)+(k_din/T)*(v(n)-v_p(n));
```

La función del filtro completa puede consultarse en el Anexo A de este documento.

Con los datos calculados para las posiciones x e y se pueden obtener las coordenadas geodésicas y representar en Google Earth los resultados de las trayectorias filtradas. A continuación, se presentan ampliadas las zonas que se han detectado más importantes, de forma que pueda compararse bien el resultado:

8.3.1.1 Trayectoria '342581'

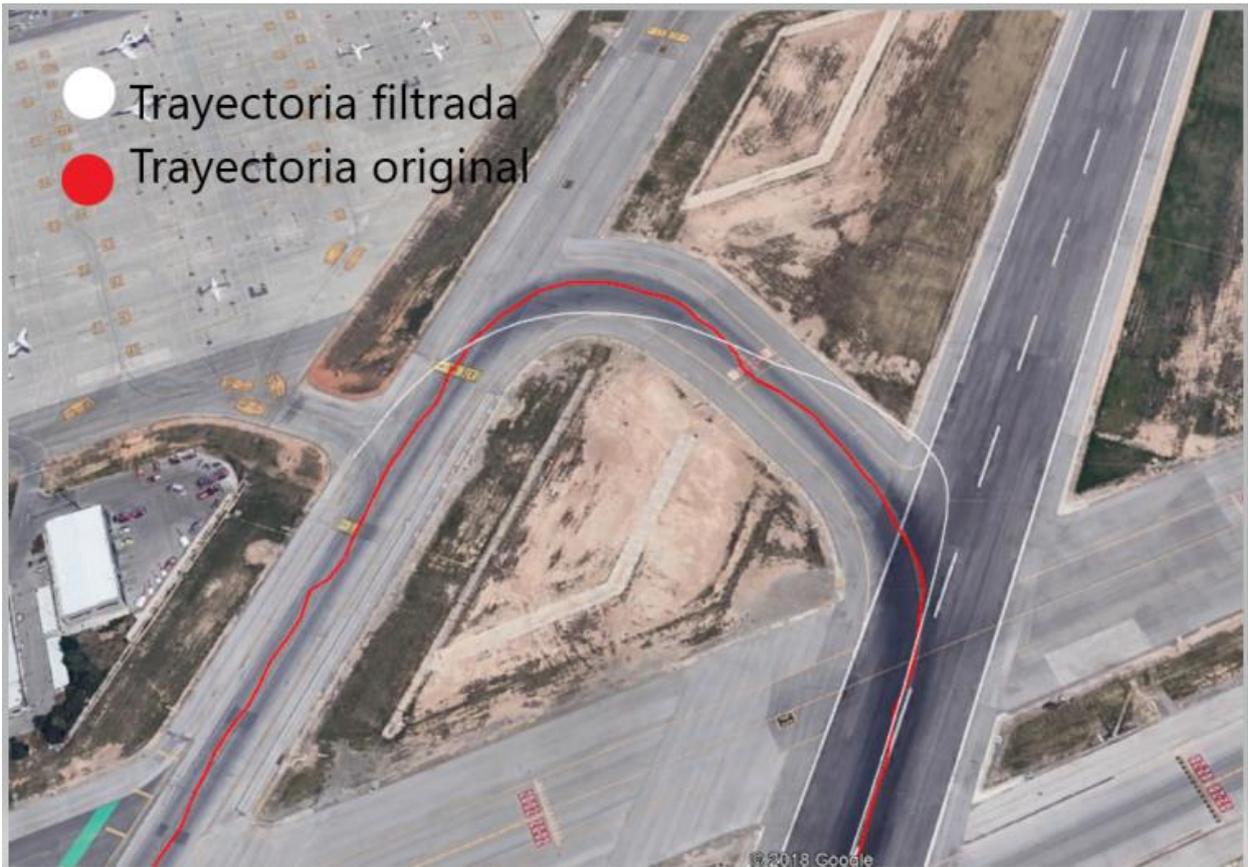


Figura 8-14 – Tramo 1 trayectoria '342581'



Figura 8-15 – Tramo 2 trayectoria '342581'



Figura 8-16 – Tramo 3 trayectoria '342581'

Como puede observarse el filtro ajusta de forma bastante pobre en las curvas y en tiene un comportamiento irregular en las rectas, en una de ellas ajusta muy bien, pero en otra muy mal, la particularidad de esta recta es la velocidad a la que va la aeronave, que es bastante más elevada que en las otras rectas.

8.3.1.2 Trayectoria '4249B6'



Figura 8-17 – Tramo 1 trayectoria '4249B6'



Figura 8-18 – Tramo 2 trayectoria '4249B6'

El comportamiento, como puede verse, es el mismo, ajuste bastante pobre en las curvas y dependiendo de la situación mejor o peor para las rectas, en la primera imagen se aprecia un ajuste bueno para la recta y en las otras dos nuevamente uno pobre.

8.3.1.3 Trayectoria '345410'



Figura 8-19 – Tramo 1 trayectoria '345410'

Ajuste bastante pobre en general para esta trayectoria, recta a alta velocidad con una curva bastante abierta y larga que ajusta de forma muy pobre.

8.3.2 Filtro Kalman

Este filtro toma como parámetros de entrada los mismos argumentos que el filtro g,h,k y se le añade un parámetro nuevo: el vector de desviación típica del error de medida. Este valor puede tomarse de los datos procedentes del ASTERIX CAT020, en concreto proviene del data ítem I500 y se corresponde con los parámetros conocidos como DOPX y DOPY, se usará uno u otro dependiendo de la coordenada que se esté calculando.

El primer paso es inicializar el filtro y definir las matrices de transición y observación:

$$T=t(2)-t(1);$$

$$Xa(1,1)=x(1);$$

$$Xa(1,2)=(x(2)-x(1))/T;$$

```
Phi=[1 T;0 1]; %Matriz de transición
```

```
M=[1 0]; %Matriz de observación
```

El resto del filtro se corresponde con las ecuaciones presentadas en el capítulo 7, siendo lo más destacado el cálculo de la matriz de covarianzas del sistema

$$Q=[0 \ 0;0 \ (vx(i+1)-vx(i))^2];$$

Y la matriz H_n que contiene los parámetros para calcular las ecuaciones de actualización:

$$H=Sp*M'*inv(s_x(i)^2+M*Sp*M');$$

$$Xa(:,i+1)=Xp(:,i+1)+H*(x(i+1)-M*Xp(:,i+1));$$

El filtro completo puede consultarse en el Anexo A como el filtro anterior. Con los datos calculados para las posiciones x e y se pueden obtener las coordenadas geodésicas y representar en Google Earth los resultados de las trayectorias filtradas. A continuación, se presentan ampliadas las zonas que se han detectado más importantes, de forma que pueda compararse bien el resultado:

8.3.2.1 Trayectoria '342581'



Figura 8-20 – Tramo 1 trayectoria '342581'



Figura 8-21 – Tramo 2 trayectoria ‘342581’



Figura 8-22 – Tramo 3 trayectoria ‘342581’

8.3.2.2 Trayectoria '4249B6'



Figura 8-23 – Tramo 1 trayectoria '4249B6'



Figura 8-24 – Tramo 2 trayectoria '4249B6'

8.3.2.3 Trayectoria '345410'



Figura 8-25 – Tramo 1 trayectoria '345410'

Como puede observarse en todas las trayectorias, el filtro de Kalman se comporta mejor que el filtro g,h,k en todo tipo de circunstancias. Ajusta mejor las rectas, especialmente aquellas en las que la velocidad es alta y ajusta bastante mejor las curvas, aunque sigue teniendo un gran margen de mejora puesto que la diferencia con la trayectoria de referencia es muy grande.

8.3.3 Filtro Kalman Singer

Este filtro toma como parámetros de entrada los mismos datos que el filtro de Kalman presentado anteriormente y además nuevos parámetros que permiten parametrizar el filtro hasta un nivel de detalle muy profundo y de esta manera ajustar el filtrado para las características específicas de cada dinámica del blanco en según qué tramo de la trayectoria se encuentre. Esto es lo que se ha hecho se han empleado datos obtenidos de los datos ASTERIX para calcular estos parámetros. Son los siguientes:

- Tau → tiempo de maniobra del avión, especial para casos en los que está girando
- Amax → aceleración máxima del blanco
- Pmax → probabilidad de que el blanco acelere con aceleración máxima
- P0 → probabilidad de que el blanco no acelere

Para calcular tau se ha empleado el vector de tiempos, si se sabe cuántas mediciones corresponden al paso por curva, se puede saber cuánto tiempo ha empleado en realizarlo, ya que cada punto corresponde en este caso a 1 segundo (tiempo de actualización).

Para calcular el resto de parámetros se ha diseñado una sencilla función que reciba como parámetros de entrada los vectores de velocidad en el tramo que se ha decidido parametrizar y cuantas mediciones se han obtenido, en lenguaje de Matlab sería igual a la longitud del vector de velocidades.

Con los vectores de velocidad se van a calcular las aceleraciones en cada punto y para cada componente x e y, a partir de este vector de aceleraciones se puede averiguar la aceleración máxima y calcular la probabilidad de que se acelere con esa velocidad, es decir Pmax. Por último, se observa si se tiene algún punto de aceleración 0 y con ello se calcula la P0, probabilidad de que el blanco no acelere.

Con estos datos el tramo en cuestión seleccionado queda parametrizado y por tanto el filtro de Singer, todo a través del ASTERIX que se ha proporcionado.

En esencia el filtro es muy similar al Kalman presentado anteriormente, con la salvedad de los datos que se emplean para calcular la matriz de covarianzas del ruido del sistema y a partir de ella la matriz H_n y las ecuaciones de actualización:

```
s_a2=Amax^2*(1+4*Pmax-P0)/3;
Q=2*tau*s_a2*[(1/20)*T^5 (1/8)*T^4 (1/6)*T^3; (1/8)*T^4
(1/3)*T^3 (1/2)*T^2; (1/6)*T^3 (1/2)*T^2 T];

Sp=Phi*Sa*Phi'+Q;
H=Sp*M'*inv(s_x(i)^2+M*Sp*M');
```

%Ecuaciones de actualización

```
Sa=(eye(3)-H*M)*Sp;
Xa(:,i+1)=Xp(:,i+1)+H*(x(i+1)-M*Xp(:,i+1));
```

Una vez realizado el filtrado se pueden representar los resultados sobre Google Earth y comparar con la trayectoria obtenida a partir de los datos que se han proporcionado.

8.3.3.1 Trayectoria '342581'



Figura 8-26 – Tramo 1 trayectoria '342581'



Figura 8-27 – Tramo 2 trayectoria '342581'



Figura 8-28 – Tramo 3 trayectoria '342581'

8.3.3.2 Trayectoria '4249B6'



Figura 8-29 – Tramo 1 trayectoria '4249B6'



Figura 8-30 – Tramo 2 trayectoria '4249B6'

8.3.3.3 Trayectoria '345410'



Figura 8-31 – Tramo 1 trayectoria '345410'



Puede observarse como los resultados para este filtro son sustancialmente mejores en las curvas si se compara con los dos anteriores. Por otro lado, aunque parece que empeora en las rectas, ya que algunos tramos se ven con una cierta forma de sierra, no parece que sea algo que pueda decidirse solo mirando los resultados en Google Earth y habrá que esperar a realizar los cálculos numéricos en el siguiente capítulo para ver que filtro tiene mejor respuesta global.

Es importante destacar que aunque en las imágenes se presenta la primera trayectoria dividida en tres tramos y el segundo en dos, para el caso del último filtro se han calculado muchos más tramos, hasta 9 en el segundo filtro, para poder parametrizar todas las curvas y rectas por separado. Pero para poder presentar de forma más uniforme las imágenes se sigue dividiendo en tres y dos respectivamente.

Capítulo 9. Resultados y conclusiones

En este capítulo se van a presentar los resultados obtenidos conjuntamente, es decir, se mostrará una visualización de todos ellos superpuestos para cada una de las tres trayectorias.

Por otro lado, se va medir de forma numérica lo que se mostrará visualmente. Se calculará un requerimiento estipulado en las normas como parámetro para medir el error o diferencia respecto a los datos de la medición de multilateración. De esta manera se obtendrá cual es la referencia de mayor calidad. Este requerimiento se conoce como: *RMS horizontal position accuracy* [7].

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Pos Error_i^2} \quad 9-1$$

9.1 Trayectoria '342581'

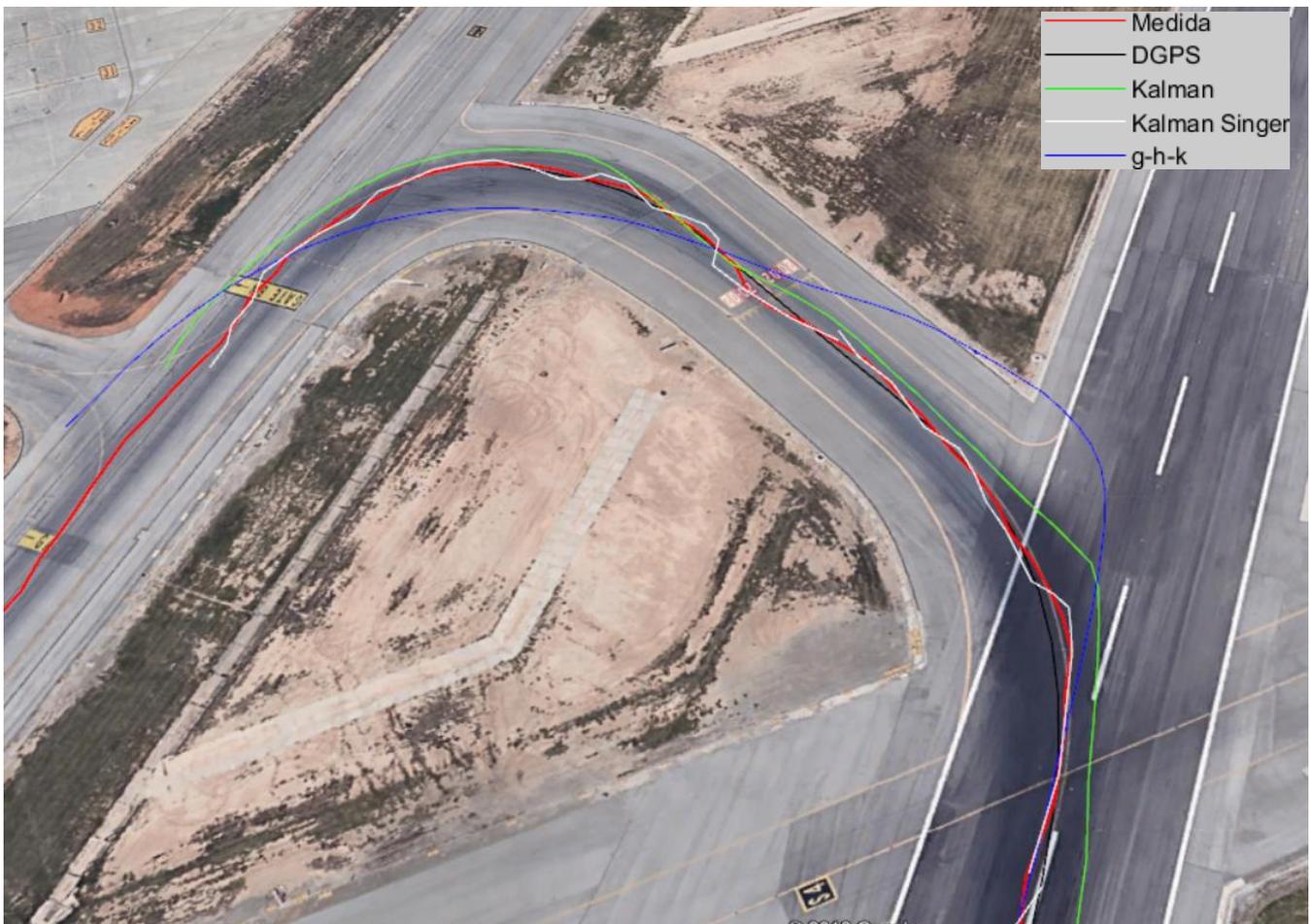


Figura 9-1 – Tramo 1 trayectoria '342581'

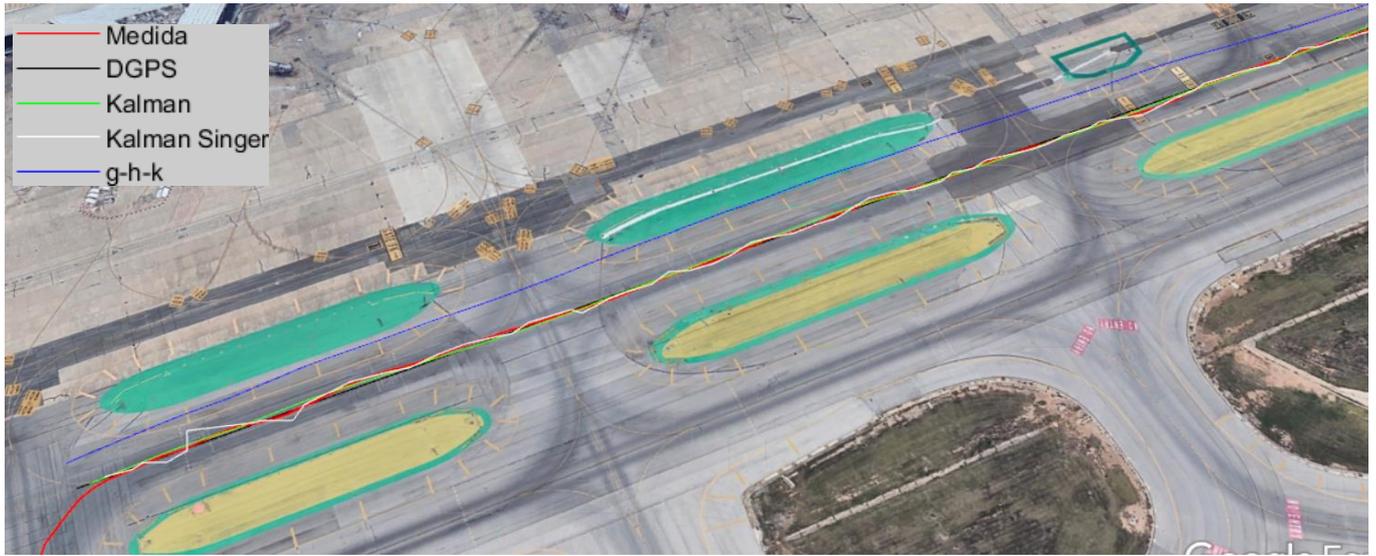


Figura 9-2 – Tramo 2 trayectoria '342581'

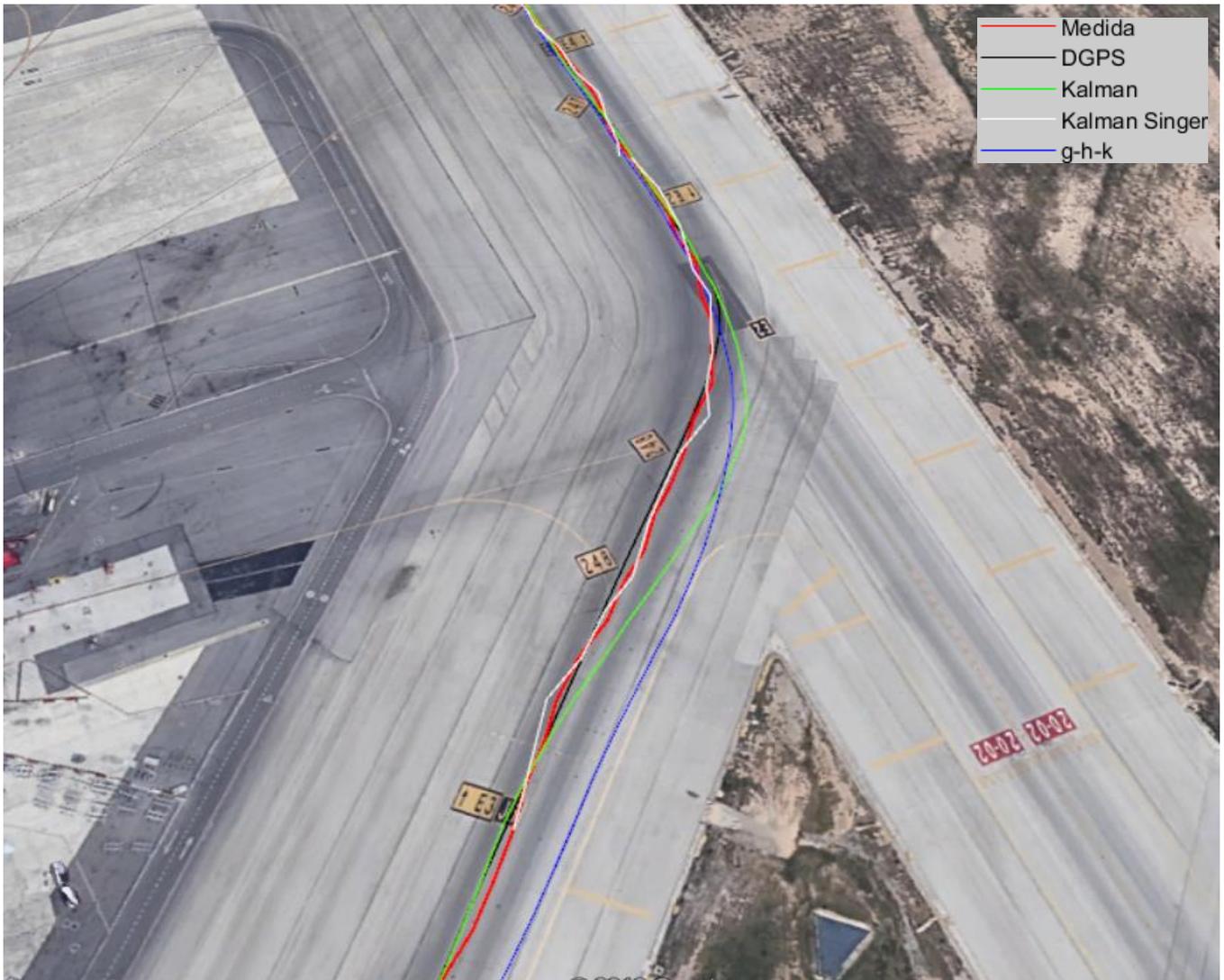


Figura 9-3 – Tramo 3 trayectoria '342581'

9.2 Trayectoria '4249B6'



Figura 9-4 – Tramo 1 trayectoria '4249B6'



Figura 9-5 – Tramo 2 trayectoria '4249B6'

9.3 Trayectoria '345410'

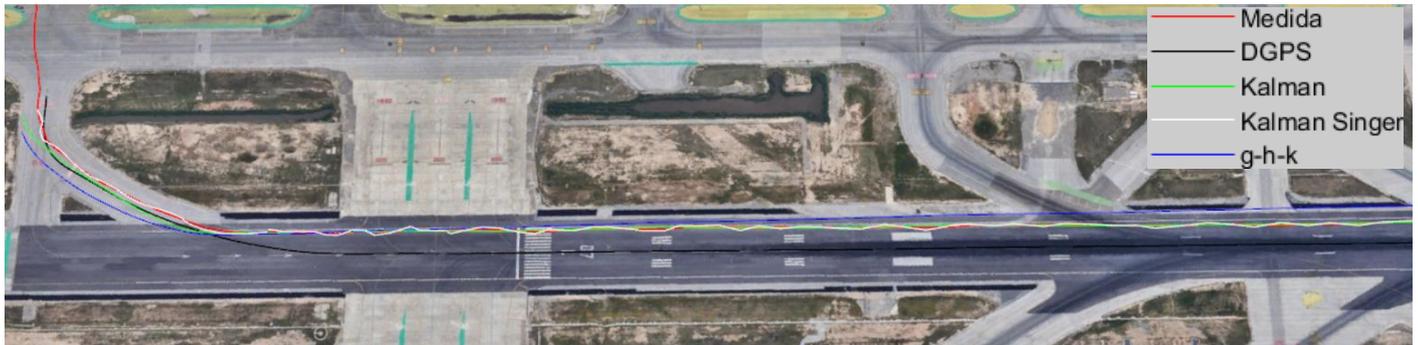


Figura 9-6 – Tramo 1 trayectoria '345410'

Visualmente podría establecerse que la referencia de mayor calidad la proporciona el DGPS y la siguiente de mayor calidad sería el filtro de Kalman Singer, excepto en la última trayectoria donde se aprecia claramente una diferencia entre las posiciones medidas por multilateración y la trayectoria que ofrece el DGPS.

Para apoyar este resultado visual, como se ha comentado se va a proceder a calcular el *RMS horizontal position accuracy* de cada filtro en cada trayectoria respecto a los datos de multilateración.

Como se ha mencionado con anterioridad la mejor alternativa especialmente en tramos curvos es el filtro de Kalman Singer.

| <i>RMS</i> | Trayectoria '342581' | Trayectoria '4249B6' | Trayectoria '345410' |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| <i>g-h-k</i> | 15.814400019668506 | 23.925141611546426 | 31.728413543872170 |
| <i>Kalman</i> | 9.593018843391821 | 6.206450143717071 | 5.706898115615516 |
| <i>Kalman Singer</i> | 6.724220954710349 | 4.520116051183145 | 4.258729891579312 |
| <i>DGPS</i> | 3.321741886719333 | 3.390981533183994 | 150.8281674981049 |

Tabla 9-1 – Resultados RMS

Si se calcula el RMS por tramos, es decir, para tramos separados de rectas y curvas, se corrobora también que el filtro de Kalman Singer es mucho más preciso en las curvas que el resto. En las rectas está muy parejo con el filtro de Kalman.

Como puede comprobarse en la tabla superior, los resultados numéricos corroboran lo que se puede ver en el conjunto de imágenes anteriores, la referencia de mayor calidad la da el DGPS y la siguiente referencia de mayor calidad, es el filtro de Singer Kalman. En el caso de la última trayectoria ya se puede ver como los datos de DGPS y multilateración son muy dispares el uno del otro, esto es debido a un sesgo o errores continuos.

9.4 Conclusiones y líneas futuras

9.4.1 Conclusiones

Las conclusiones que se pueden extraer tras la realización del presente trabajo son las siguientes:

- Se ha realizado un análisis sistemático de distintos tipos de filtros para suavizar el error que contienen las trayectorias obtenidas por un sensor de multilateración y para generar trayectorias de referencia para la evaluación de los sistemas de vigilancia aérea.
- Se ha detectado como las zonas más críticas son las zonas curvas, especialmente si las curvas son cerradas. En estas zonas se ha comprobado que el funcionamiento de los filtros de Kalman Singer proporciona una mejor referencia que cualquier otro tipo de filtrado.
- Se ha detectado como en rectas donde el blanco se desplaza a baja velocidad todos los filtros funcionan más o menos con una calidad muy similar, pero si la velocidad de grande, los filtros g-h-k tienen un funcionamiento claramente peor que cualquiera de los dos filtros de Kalman empleados.
- Los métodos empleados no permiten detectar errores de tipo sesgo, es decir, errores continuos. Para ello sería necesario realizar un tratamiento multisensor de manera que se pudieran detectar y corregir estos errores de tipo sesgo o errores de valor medio constante.

Con todo esto, este trabajo aporta su pequeño grano de arena al objetivo de mejorar y avanzar en los objetivos a nivel europeo para alcanzar un sistema de ATM moderno y de alto rendimiento.

9.4.2 Líneas futuras

Principalmente se podrían desarrollar dos líneas futuras de trabajo a partir de lo visto en este trabajo:

- Desarrollar un procedimiento o algoritmo que sea capaz de detectar si el tramo de trayectoria que se está siguiendo es curvo o recto y donde termina el mismo. De esta manera se podrá elegir el tipo de filtro más conveniente según las características del tramo sin tener que realizar un trabajo manual para delimitar cada tipo de tramos como se ha hecho en este trabajo.
Para esto podría usarse algún tipo de algoritmo de aprendizaje automático que al ser entrenado con diversos ejemplos sea capaz de separar en tramos una trayectoria dada a raíz de características como variación en las coordenadas o en la velocidad. Para poder desarrollar este trabajo, sería necesario disponer de miles de datos de distintas trayectorias,



con las 60 que se han proporcionado para este trabajo no sería suficiente. Esto sería posible realizarlo gracias a que el procesamiento y uso de los filtros es a posteriori.

- Realizar un tratamiento multisensor en base a estos filtros, optimizando para cada tipo de trayectoria, la cual podría detectarse con el procedimiento propuesto anterior. De esta manera se podría no solo obtener el valor RMS sino que también permitiría detectar el valor de error medio o error de tipo sesgo. Esto corregiría los problemas que se han detectado por ejemplo en la trayectoria '345410' donde se aprecia una gran diferencia entre los datos que proporciona el sensor de multilateración y los datos procedentes del DGPS. Los filtros no son capaces de corregir estos datos ya que solo disponen de los datos procedentes de la multilateración. Se podrían añadir datos procedentes del ADS-B o radar primario.

Desarrollando estas dos líneas de trabajo y junto al trabajo expuesto en este documento, se podría llegar a diseñar un sistema muy complejo a la par que certero, que permita generar trayectorias de referencia con un error muy bajo. De esta forma se ayudará a evolucionar los sistemas tradicionales y cumplir con los requisitos que se van a demandar en un entorno tan complejo como la vigilancia aérea.



Anexo A: Funciones Matlab por orden de aparición en la memoria

```
function [MLAT_I220] = elimina_NO_I220 (MLAT)

posiciones = zeros(1);
tamstruct = size(MLAT);
MLAT = rmfield(MLAT, 'id');
MLAT = rmfield(MLAT, 'length');
MLAT = rmfield(MLAT, 'crc');
MLAT = rmfield(MLAT, 'timestamp');

for i=1:1:tamstruct(1);

    tiene_codigo = isfield(MLAT(i).CAT010, 'I220');

    if tiene_codigo == 0;
        posiciones = [posiciones; i];
    end

end

tam = size(posiciones);
MLAT(posiciones(2)) = [];
k=1;
for j=3:1:tam(1);

    MLAT(posiciones(j)-k) = [];
    k=k+1;
end

MLAT_I220 = MLAT;

end
```



```
function [ MLAT_RAB0 ] = elimina_RAB_1( MLAT )

posiciones = zeros(1);
tamstruct = size(MLAT);

for i=1:1:tamstruct(1);

    RAB = MLAT(i).CAT010.I020.RAB;

    if RAB == 1;
        posiciones = [posiciones;i];
    end

end

tam = size(posiciones);
MLAT(posiciones(2)) = [];
k=1;
for j=3:1:tam(1);
    MLAT(posiciones(j)-k)=[];
    k=k+1;
end

MLAT_RAB0=MLAT;

end
```



```
function [ MLAT_GBS1, MLAT_GBS0 ] = clasificacion_GBS_cat20(
MLAT )

posiciones = zeros(1);
tamstruct = size(MLAT);

a=1;
t=1;

for i=1:1:tamstruct(1);

    aire_tierra = MLAT(i).CAT020.I020.GBS;

    if aire_tierra == 0;
        MLAT_AIRE(a) = MLAT(i);
        a = a+1;
    end

    if aire_tierra == 1;
        MLAT_TIERRA(t) = MLAT(i);
        t = t+1;
    end

end

MLAT_GBS1=MLAT_TIERRA';
MLAT_GBS0=MLAT_AIRE';

end
```



```
function [CAT020AA] = getAircraftsfromCA020_v2(DATOS)

n=length(DATOS);

CAT020AA{1,1}=[DATOS(1).CAT020.I220.TAddr];
CAT020AA{1,2}=[DATOS(1).CAT020.I140.ToD];
CAT020AA{1,3}=[DATOS(1).CAT020.I042.X];
CAT020AA{1,4}=[DATOS(1).CAT020.I042.Y];
CAT020AA{1,5}=[DATOS(1).CAT020.I090.FL];
CAT020AA{1,6}=[DATOS(1).CAT020.I202.Vx];
CAT020AA{1,7}=[DATOS(1).CAT020.I202.Vy];
CAT020AA{1,8}=[DATOS(1).CAT020.I500.DOP.DOPx];
CAT020AA{1,9}=[DATOS(1).CAT020.I500.DOP.DOPy];
CAT020AA{1,10}=[DATOS(1).CAT020.I500.DOP.DOPxy];
NAA=1;
for i=2:n
    p=0;
    for j=1:NAA
        if DATOS(i).CAT020.I220.TAddr==CAT020AA{j,1}

            CAT020AA{j,2}=[CAT020AA{j,2},DATOS(i).CAT020.I140.ToD];
            CAT020AA{j,3}=[CAT020AA{j,3},DATOS(i).CAT020.I042.X];
            CAT020AA{j,4}=[CAT020AA{j,4},DATOS(i).CAT020.I042.Y];
            CAT020AA{j,5}=[CAT020AA{j,5},DATOS(i).CAT020.I090.FL];
            CAT020AA{j,6}=[CAT020AA{j,6},DATOS(i).CAT020.I202.Vx];
            CAT020AA{j,7}=[CAT020AA{j,7},DATOS(i).CAT020.I202.Vy];
            CAT020AA{j,8}=[CAT020AA{j,8},DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPx];
            CAT020AA{j,9}=[CAT020AA{j,9},DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPy];
            CAT020AA{j,10}=[CAT020AA{j,10},DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPxy];
            p=1;
        end
    end
    if p==0
        NAA=NAA+1;
        CAT020AA{NAA,1}=[DATOS(i).CAT020.I220.TAddr];
        CAT020AA{NAA,2}=[DATOS(i).CAT020.I140.ToD];
        CAT020AA{NAA,3}=[DATOS(i).CAT020.I042.X];
        CAT020AA{NAA,4}=[DATOS(i).CAT020.I042.Y];
        CAT020AA{NAA,5}=[DATOS(i).CAT020.I090.FL];
        CAT020AA{NAA,6}=[DATOS(i).CAT020.I202.Vx];
        CAT020AA{NAA,7}=[DATOS(i).CAT020.I202.Vy];
        CAT020AA{NAA,8}=[DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPx];
        CAT020AA{NAA,9}=[DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPy];
        CAT020AA{NAA,10}=[DATOS(i).CAT020.I500.DOP.DOPxy];
    end
end
end
```



```
function [x,x_fil,v_fil,a_fil,t] = g_h_k_evras_vf(x,v,t)

%Se supone que el sensor proporciona datos de posición y
velocidad.

%Parámetros de entrada:
    %x: posiciones medidas (obtenidas del fichero Asterix).
    %v: velocidades medidas (obtenidas del fichero Asterix).
    %t: tiempo de medida (TOD obtenidos del fichero Asterix).

%Parámetros de salida:
    %x: posición real del móvil (en metros).
    %y: vector de medidas.
    %x_fil: posiciones estimadas (en metros).
    %v_fil: velocidad estimada (en metros por segundo).
    %a_fil: aceleración estimada (en metros por segundo
cuadrado).
    %t: vector de tiempos de actualización.

N=length(x);

%g,h,k: coeficientes del filtro en régimen permanente
%g=0.875;
%h=0.5625;
%k=0.0904;

%g=0.578;
%h=0.164;
%k=0.008;

g=0.271;
h=0.029;
k=0.001;

%Valores actualizados (x_n,n; v_n,n, a_n,n).
x_a=zeros(N+1,1);
v_a=zeros(N+1,1);
a_a=zeros(N+1,1);

%Valores predichos (x_n+1,n; v_n+1,n)
x_p=zeros(N+1,1);
v_p=zeros(N+1,1);
a_p=zeros(N+1,1);

%Inicialización n=1

x_a(1)=x(1);
v_a(1)=v(1);
a_a(1)=(v(2)-v(1))/(t(2)-t(1));

for n=2:N
```



```
%Actualización del parámetro g
if 3*(3*n^2+3*n+2)/((n+1)*(n+2)*(n+3))>g
    g_din=3*(3*n^2+3*n+2)/((n+1)*(n+2)*(n+3));
else
    g_din=g;
end

%Actualización del parámetro h
if 18*(2*n+1)/((n+1)*(n+2)*(n+3))>h
    h_din=18*(2*n+1)/((n+1)*(n+2)*(n+3));
else
    h_din=h;
end

%Actualización del parámetro k
if 60/((n+1)*(n+2)*(n+3))>h
    k_din=60/((n+1)*(n+2)*(n+3));
else
    k_din=k;
end

T=t(n)-t(n-1);

%Ecuaciones de predicción
x_p(n)=x_a(n-1)+T*v_a(n-1)+(T^2/2)*a_a(n-1);
v_p(n)=v_a(n-1)+T*a_a(n-1);
a_p(n)=a_a(n-1);

%Ecuaciones de actualización
x_a(n)=x_p(n)+g_din*(x(n)-x_p(n));
v_a(n)=v_p(n)+h_din*(v(n)-v_p(n));
a_a(n)=a_p(n)+(k_din/T)*(v(n)-v_p(n));

end

x_fil=x_a;
v_fil=v_a;
a_fil=a_a;

end
```



```
function [x_fil,vx_fil,s_p] = kalman3_chn(x,t,s_x,vx)
%Aplica un filtro de Kalman obteniendo el ruido de proceso a
partir de la velocidad medida por el sensor

%Parámetros de entrada:
    %x: vector de posiciones detectadas (con huecos=null) (en
metros).
    %T: update time (incluyendo losts)
    %s_x: vector desviación típica del error de medida (se toma
del asterix).

%Parámetros de salida:
    %x_fil: posiciones estimadas (en metros).
    %v_fil: velocidad estimada (en metros por segundo).
    %s_p: vector de desviación típica del error es estimación

N=length(x)-1;

%Valores actualizados (x_n,n; v_n,n).

Xa=zeros(2,N+1);

%Valores predichos (x_n+1,n; v_n+1,n)

Xp=zeros(2,N+1);

%Inicialización

%x_1,1(1)=y(t=T)
%va(1)=(y(2)-y(1))/T;

T=t(2)-t(1);

Xa(1,1)=x(1);
Xa(1,2)=(x(2)-x(1))/T;

Phi=[1 T;0 1]; %Matriz de transición

M=[1 0]; %Matriz de observación

Sa=s_x(1)^2*[1 1;1 1]; %Inicialización de Sp%
%H=Sp*M'*inv(s_x(1)^2+M*Sp*M'); %Inicialización de H

s_p=zeros(1,N+1);

s_p(1)=s_x(1);

for i=1:N

%Ecuaciones de predicción
%    vp(i+1)=va(i);
%    xp(i+1)=xa(i)+T*vp(i+1);

    Xp(:,i+1)=Phi*Xa(:,i);
```



```
Q=[0 0;0 (vx(i+1)-vx(i))^2]; %Matriz de covarianzas del
ruido del sistema

%Q=[0 0;0 (Xp(2,i+1)-Xp(2,i))^2];
Sp=Phi*Sa*Phi'+Q;
H=Sp*M'*inv(s_x(i)^2+M*Sp*M');

%Ecuaciones de actualización

% va(i+1)=vp(i+1)+(h/T)*(y(i+1)-xp(i+1))/T;
% xa(i+1)=xp(i+1)+g*(y(i+1)-xp(i+1))/T;

Sa=(eye(2)-H*M)*Sp;

Xa(:,i+1)=Xp(:,i+1)+H*(x(i+1)-M*Xp(:,i+1));
s_p(i+1)=sqrt(Sp(1,1));

end

x_fil=Xp(1,:);
vx_fil=Xp(2,:);

end
```



```
function [accx_des, accy_des, Amax_x, Amax_y, P0_x, P0_y,  
Pmax_x, Pmax_y] = datos_singer(vx, vy, p, f)  
j=1;  
for i=(p+1):f  
    accx_des(j) = vx(i)-vx(i-1);  
    accy_des(j) = vy(i)-vy(i-1);  
    j=j+1;  
end  
  
%accx_des = movmean(accx_des,3);  
%accy_des = movmean(accy_des,3);  
  
Amax_x = max(abs(accx_des));  
Amax_y = max(abs(accy_des));  
  
[posx_max1 ,posx_max2] =  
find(abs(accx_des)==max(abs(accx_des)));  
[posy_max1 ,posy_max2] =  
find(abs(accy_des)==max(abs(accy_des)));  
  
Pmax_x = size(posx_max2,2)/(f-p);  
Pmax_y = size(posy_max2,2)/(f-p);  
  
P0_x = sum(accx_des(:)==0)/(f-p);  
P0_y = sum(accy_des(:)==0)/(f-p);  
  
end
```



```
function [x_fil,vx_fil,ax_fil,s_px,s_pv,s_pa] =  
kalman4_singer(x,t,s_x,tau,Amax,P0,Pmax)  
  
%Parámetros de entrada:  
  %x: vector de posiciones detectadas (con huecos=null) (en  
metros).  
  %T: update time (incluyendo losts)  
  %s_x: vector desviación típica del error de medida (o se  
toma del asterix o se toma de la norma).  
  %tau: tiempo de correlación  
  %Amax: Aceleración máxima del blanco  
  %P0: Probabilidad de que el blanco no acelere  
  %Pmax: probabilidad de que el blanco acelere con su  
aceleración máxima  
  
%Parámetros de salida:  
  %x_fil: posiciones estimadas (en metros).  
  %v_fil: velocidad estimada (en metros por segundo).  
  %a_fil: aceleración estimada (en metros por segundo^2)  
  %s_px: vector de desviación típica del error de estimación  
de la  
           %posición  
  %s_pv: vector de desviación típica del error de estimación  
de la  
           %velocidad  
  %s_pa: vector de desviación típica del error de estimación  
de la  
           %aceleración  
  
N=length(x)-1;  
  
%Valores actualizados (x_n,n; v_n,n; a_n,n).  
  
Xa=zeros(3,N+1);  
  
%Valores predichos (x_n+1,n; v_n+1,n; a_n,n)  
  
Xp=zeros(3,N+1);  
  
%Inicialización  
  
T=t(2)-t(1);  
  
Xa(1,1)=x(1);  
Xa(1,2)=(x(2)-x(1))/T;  
Xa(1,3)=0;  
  
Phi=[1 1/T .5/T;0 1 1/T; 0 0 1]; %Matriz de transición  
  
M=[1 0 0]; %Matriz de observación  
  
Sa=s_x(1)^2*[1 1/T 0;1/T 2/T^2 0; 0 0 0]; %Inicialización de Sp
```



```
%H=Sp*M'*inv(s_x(1)^2+M*Sp*M'); %Inicialización de H

s_p=zeros(1,N+1);

s_p(1)=sqrt(s_x(1));

%Cálculo del ruido de proceso

for i=1:N

%Ecuaciones de predicción
%   vp(i+1)=va(i);
%   xp(i+1)=xa(i)+T*vp(i+1);
   Xp(:,i+1)=Phi*Xa(:,i);

   s_a2=Amax^2*(1+4*Pmax-P0)/3;
   Q=2*tau*s_a2*[(1/20)*T^5 (1/8)*T^4 (1/6)*T^3;(1/8)*T^4
(1/3)*T^3 (1/2)*T^2;(1/6)*T^3 (1/2)*T^2 T];

   Sp=Phi*Sa*Phi'+Q;
   H=Sp*M'*inv(s_x(i)^2+M*Sp*M');

%Ecuaciones de actualización

%   va(i+1)=vp(i+1)+(h/T)*(y(i+1)-xp(i+1))/T;
%   xa(i+1)=xp(i+1)+g*(y(i+1)-xp(i+1))/T;

   Sa=(eye(3)-H*M)*Sp;
   Xa(:,i+1)=Xp(:,i+1)+H*(x(i+1)-M*Xp(:,i+1));

   s_px(i+1)=sqrt(Sp(1,1));
   s_pv(i+1)=sqrt(Sp(2,2));
   s_pa(i+1)=sqrt(Sp(2,2));

end

   x_fil=Xp(1,:);
   vx_fil=Xp(2,:);
   ax_fil=Xp(3,:);

end
```



Bibliografía

[1] OACI “*Doc 9869 Performance-based Communication and Surveillance (PBCS) Manual*”
Second edition, 2017

[2] SESAR “*The roadmap for delivering high performing aviation for Europe, European ATM
Master Plan*” Edition 2015.

[3] OACI “*Doc 10063 Manual on Monitoring the Application of Performance-based Horizontal
Separation Minima*” First Edition, 2017

[4] <https://www.icao.int/airnavigation/pbcS/Pages/default.aspx>

[5] [https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Communication_and_Surveillance_\(PBCS\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Performance_Based_Communication_and_Surveillance_(PBCS))

[6] <https://www.nss.govt.nz/dmsdocument/40-new-zealand-pbcS-implementation-plan>

[7] EUROCONTROL “*EUROCONTROL specification for ATM surveillance system
performance* (Volume 1), Marzo 2012

[8] Documentación interna facilitada por el tutor

[9] <https://slideplayer.com/slide/4641435/> “*PBCS Workshop*” Bangkok, Thailand, May, 2013

[10] Skolnik, M., *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, New York 3rd Ed., 2001.

[11] <http://radioclubbergantinos.es/sistema-adsb/>

[12] Eduardo Hernández Pérez, *Nuevos Algoritmos de Localización, seguimiento e identificación
de fuentes en escenarios con agrupaciones de sensores concentradas y distribuidas*, Las Palmas
de Gran Canaria 2010

[13] https://es.wikipedia.org/wiki/GPS#DGPS_o_GPS_diferencial

[14] Eurocontrol “*Eurocontrol Specification for Surveillance Data Exchange - Part 1: All
Purpose Structured EUROCONTROL Surveillance Information Exchange (ASTERIX)*”
Noviembre 2015



[15] Eurocontrol “Eurocontrol Standard Document For Surveillance Data Exchange Part 14: Category 020. Multilateration Target Reports” Abril 2008.

[16] Navegación Aérea España (ENAIRES) <http://www.enaire.es>

[17] KML toolbox, Rafael Oliveira <https://es.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/34694-kml-toolbox>

[18] Eli Brookner, “Tracking and Kalman filtering made easy” section 1 and 2 1998

[19] <https://aeropuertobcn.wordpress.com/2012/03/12/el-aeropuerto-de-barcelona-estrena-un-sistema-de-control-por-multilateracion/>

[20] Indra “Sistema MLAT/WAM Indra” https://www.icao.int/SAM/Documents/2015-SEMAUTOM/Ses3%20Pres02b%20SISTEMA%20MLAT_WAM%20INDRA.pdf

[21] ENAIRES “AIP España” Enero 2018

[22] Indra “Gestión del tráfico aéreo, Sistema de Multilateración” Noviembre 2009

[23] <https://www.alamy.com/stock-photo-air-traffic-control-radar-screen-of-aircraft-above-luton-airport-uk-41731686.html>

[24] https://es.wikipedia.org/wiki/Radiofaro_omnidireccional_VHF

[25] Marco Perez, Jordi “Prueba de concepto de un radar pasivo multiestático para aplicaciones aeronáuticas” Valencia, Noviembre 2015

[26] <http://www.radartutorial.eu/01.basics/Radar%20Principle.en.html>

[27] cad.gov.hk/english/cnsatmsys.html

[28] <https://pagerpower.co.uk/news/wide-area-multilateration-wam/>