

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACIÓN**

UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



Proyecto Fin de Carrera

**DESARROLLO DE UNA APLICACIÓN
SOFTWARE PARA EL ESTUDIO DE
SEÑALES GPS**
(Software application for the study of GPS
signals)

Para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Autor: Irene Costales Álvarez

Mayo - 2014



E.T.S. DE INGENIEROS INDUSTRIALES Y DE TELECOMUNICACION

INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

CALIFICACIÓN DEL PROYECTO FIN DE CARRERA

Realizado por: Irene Costales Álvarez

Director del PFC: Luis Valle López

Título: “Desarrollo de una aplicación software para el estudio de señales GPS”

Title: “Software application for the study of GPS signals“

Presentado a examen el día:

para acceder al Título de

INGENIERO DE TELECOMUNICACIÓN

Composición del Tribunal:

Presidente (Apellidos, Nombre):

Secretario (Apellidos, Nombre):

Vocal (Apellidos, Nombre):

Este Tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente

Fdo.: El Secretario

Fdo.: El Vocal

Fdo.: El Director del PFC
(sólo si es distinto del Secretario)

Vº Bº del Subdirector

Proyecto Fin de Carrera Nº
(a asignar por Secretaría)

Agradecimientos

A mi Familia, especialmente a mis padres por el gran esfuerzo que han hecho para que llegara hasta aquí.

A ti, Lola.

A Luis Valle, por su dedicación y su trato.

A mi amiga de toda la vida, Esther.

A las personas especiales que he conocido gracias al Balonmano, pero sobre todo a vosotras: H, Pri, Cachu y Bizco.

A los amigos que han hecho que mi paso por la universidad fuera más fácil: Mar, Charly, Pablito, Piluca, Ismail, Jhoe, y en especial a Vady.

A Álvaro, mi pareja y amigo, por su apoyo, su comprensión y su cariño.

A ti Abuelo, un tesoro, todo sonrisas y amor.

A todos, GRACIAS.

Índice

| | |
|--|----|
| Capítulo 1 | 3 |
| Introducción | 3 |
| Capítulo 2 | 5 |
| Introducción al sistema GPS..... | 5 |
| 1. Historia | 5 |
| 2. Sistemas de coordenadas | 6 |
| 2.1. Coordenadas ECEF | 6 |
| 2.2. World Geodetic System | 7 |
| 2.3. Conversión de coordenadas LLA a ECEF | 8 |
| 3. Aplicaciones | 9 |
| 4. Modo de funcionamiento | 9 |
| 4.1. Señales transmitidas | 10 |
| 4.2. Mensaje de Navegación GPS | 11 |
| 5. Cálculo de la Posición | 13 |
| 5.1. Ecuaciones básicas para determinar la posición | 14 |
| 6. Receptor GPS Básico | 17 |
| 7. Errores en GPS | 18 |
| 7.1. User Equivalenty Range Error (UERE) | 18 |
| 7.2. Dilution Of Precision (DOP) | 19 |
| 7.3. Fuentes de error | 21 |
| Capítulo 3 | 22 |
| Protocolo TSIP | 22 |
| 1. Descripción de Paquetes | 23 |
| 1.1. Command Packet 0x1E: Initiate Cold, Warm, or Factory Reset | 23 |
| 1.2. Command Packet 0x35: Set or Request I/O Options | 24 |
| 1.3. Report Packet 0x55: I/O Options | 25 |
| 1.4. Command Packet 0x3C: Request Satellite Tracking Status | 25 |
| 1.5. Report Packet 0x5C: Satellite Tracking Status | 25 |
| 1.6. Report Packet 0x42: Single-precision Position Fix | 26 |

| | | |
|-------------------------|---|----|
| 1.7. | Report Packet 0x4A: Single-precision LLA Position fix | 27 |
| 1.8. | Report Packet 0x6D: Satellite Selection List | 27 |
| 1.9. | Command Packet 0x24: Request GPS Satellite Selection..... | 28 |
| 1.10. | Report Packet 0xBB: Data Format..... | 28 |
| 1.11. | Report Packet 0x8F-AB: Primary Timing Packet | 29 |
| 1.12. | Report Packet 0x8F-AC: Supplemental Timing Packet | 29 |
| Capítulo 4 | | 31 |
| Descripción del Sistema | | 31 |
| 1. | Hardware | 32 |
| 1.1. | Antena | 32 |
| 1.2. | Receptor | 32 |
| 2. | Software | 33 |
| 2.1. | Configuración del puerto serie..... | 33 |
| 2.2. | Envío y recepción de paquetes..... | 34 |
| 2.3. | Conversión de datos | 35 |
| 2.4. | Llamadas a funciones | 36 |
| 2.5. | PlotSky: representación polar | 38 |
| 3. | Implementación de la Interfaz Gráfica de Usuario | 38 |
| 3.1. | Comenzar | 40 |
| 3.2. | Posición | 41 |
| 3.3. | Panel: GPS Status..... | 42 |
| 3.4. | Información de los Satélites | 44 |
| 3.5. | SkyPlot | 45 |
| 3.6. | Panel de usuario | 46 |
| 3.7. | Data Panel..... | 47 |
| 3.8. | Salir del programa | 49 |
| Capítulo 5 | | 50 |
| Resumen y conclusiones | | 50 |
| 1. | Resumen y conclusiones | 50 |
| 2. | Líneas futuras | 51 |
| Bibliografía | | 52 |
| Acrónimos | | 53 |

Capítulo 1

Introducción

El principal objetivo del desarrollo de este proyecto es su función didáctica. Está pensado para docencia, proporcionando los aspectos teóricos y prácticos básicos sobre el *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*.

Respecto a una posición dada en la superficie de la Tierra, se estudiará el número de satélites visibles, sus principales parámetros, su situación en el espacio, así como la posición de un receptor y otra serie de parámetros que se hayan considerado de interés. Todo lo citado anteriormente será obtenido mediante un sistema formado principalmente por un receptor de Trimble y su correspondiente antena, y todos los resultados se mostrarán en una *Interfaz Gráfica de Usuario* desarrollada con Matlab, que estará cuidadosamente diseñada y con la que el usuario será capaz de entender de una forma práctica y visual los conceptos principales sobre GPS.

En el capítulo 2 se presentará una introducción teórica al sistema GPS, centrándose en los conceptos teóricos esenciales para el desarrollo de la GUI, así como los que sean necesarios para que el usuario comprenda todo lo relacionado con un sistema de este tipo.

En el capítulo 3 se proporcionará una explicación detallada del Protocolo de Interfaz Estándar que usan los receptores de Trimble, que se usará para procesar toda la información considerada importante, que es enviada y recibida en el receptor. Para la realización de esta parte se presentaron pequeños inconvenientes a la hora de encontrar el protocolo completo correspondiente al modelo de receptor que se usa, ya que al ser un modelo antiguo casi toda la información encontrada correspondía a receptores más recientes.

En el capítulo 4 se mostrarán aspectos relacionados con el Hardware del sistema y el Software desarrollado: configuración del sistema, funciones utilizadas y por supuesto, una visión completa de la implementación de la GUI y una guía detallada para su uso.

Finalmente, en el capítulo 5 se resumirán las conclusiones del desarrollo de este proyecto y se darán una serie de propuestas orientadas a posibles líneas futuras.

Capítulo 2

Introducción al sistema GPS

Esta sección proporciona una visión global del sistema GPS y del Servicio de Posicionamiento Estándar (SPS, Standard Positioning Service), por un lado las características de las señales, y por otro la estructura y contenido del mensaje de navegación.

1. Historia

El sistema GPS es un sistema de posicionamiento que permite localizar cualquier equipo receptor a través de 24 satélites situados en órbitas alrededor de la tierra.

Desde 1967 USA disponía de un sistema de navegación vía satélite para su sistema de defensa basado en el efecto Doppler, pero la necesidad de trabajar en tiempo real dio lugar a un nuevo sistema que se llamó NAVSTAR (NAVigation Satellite Timing and Ranning, 1978). Su finalidad era meramente militar, y su objetivo era dotar a las tropas y dispositivos militares de una referencia temporal y espacial precisa. Finalmente, el elevado coste del sistema obligó a que se aprobara su uso civil.

Las principales ventajas del sistema NAVSTAR-GPS son su capacidad de cobertura mundial y continua las 24 horas. Además suministra información sea cual sea la situación meteorológica y debido al rápido movimiento de los satélites permite obtener una determinada posición sin necesidad de esperar mucho tiempo. Este sistema está formado por tres segmentos: espacial, de control y de usuarios.

El segmento espacial es el formado por los satélites, encargados de transmitir los mensajes de navegación. Se usan solo los satélites no geoestacionarios, es decir, que recorren todos los puntos de la superficie terrestre y sus orbitas se ajustan para

que en cualquier punto se vea un cierto número de satélites en un periodo lo suficientemente largo para que se calcule una medida.

El segmento de control es el más importante. Está constituido por las distintas estaciones terrenas de seguimiento fijas, que con solo saber su posición determinan de forma sencilla los parámetros orbitales a partir de las señales transmitidas por los satélites. Una vez obtenidos los datos, se envían de vuelta al satélite para que este lo retransmita al usuario.

El segmento de usuarios lo forman básicamente el conjunto de un receptor y un calculador. El receptor se encarga de obtener los desplazamientos doppler, los retardos temporales, los datos orbitales y las señales de sincronismo. El calculador simplemente usa los datos para calcular la posición corrigiendo los errores debidos a la propagación por la ionosfera y troposfera, entre otros.

2. Sistemas de coordenadas

El sistema de coordenadas usado para dar la posición en un receptor dado se puede elegir dependiendo de las necesidades del usuario. Sin embargo, todo GPS tiene definido un sistema de coordenadas y se asume su uso. Las posiciones de los satélites y las operaciones realizadas tienen que estar referidas al WGS-84 (World Geodetic Survey 1984) y ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed).

2.1. Coordenadas ECEF

Con el propósito de conocer la posición de un receptor GPS, es más conveniente usar un sistema de coordenadas que gire con la Tierra. Este sistema proporciona tres coordenadas (en metros) para determinar la posición tanto del usuario como de los satélites.

El término “*Earth-Centered*” viene del hecho de que el punto de origen de los ejes (0,0,0) está localizado en el centro de masa de la Tierra. El término “*Earth-Fixed*” implica que los ejes rotan con la Tierra. El plano que forman el eje-x y el eje-y define el plano ecuatorial, mientras que el eje-z está en la dirección del Polo Norte, estando en la normal al plano ecuatorial.

2.2. World Geodetic System

Para poder realizar transformaciones de coordenadas es necesario un modelo físico que describa la Tierra. El WGS-84 detalla un modelo elipsoidal de la forma de la Tierra, con el propósito de estimar la latitud, longitud y altura (coordenadas LLA) de un receptor GPS. El elipsoide que es descrito en el modelo WGS-84 coincide con el centro de origen del sistema de coordenadas ECEF. En este modelo, las secciones transversales de la Tierra paralelas al plano ecuatorial son circulares. La sección transversal ecuatorial de la Tierra tiene como radio el radio de la Tierra (6,378.137 km). Las secciones transversales de la Tierra normales al plano ecuatorial son elipsoidales y contienen al eje z, por lo que el semieje mayor, a , tiene un valor aproximado al del radio de la Tierra visto arriba. El eje menor del elipsoide mostrado en la figura 2.1 corresponde al diámetro polar de la Tierra, y el semieje menor, b , en el modelo WGS-84 viene dado por 6,356.75231424518 km. Así, se puede definir la excentricidad, e , y el aplanado, f , de la elipsoide de la Tierra de la siguiente manera:

$$e = \sqrt{1 - \frac{b^2}{a^2}} \quad (2.1)$$

$$f = 1 - \frac{b}{a} \quad (2.2)$$

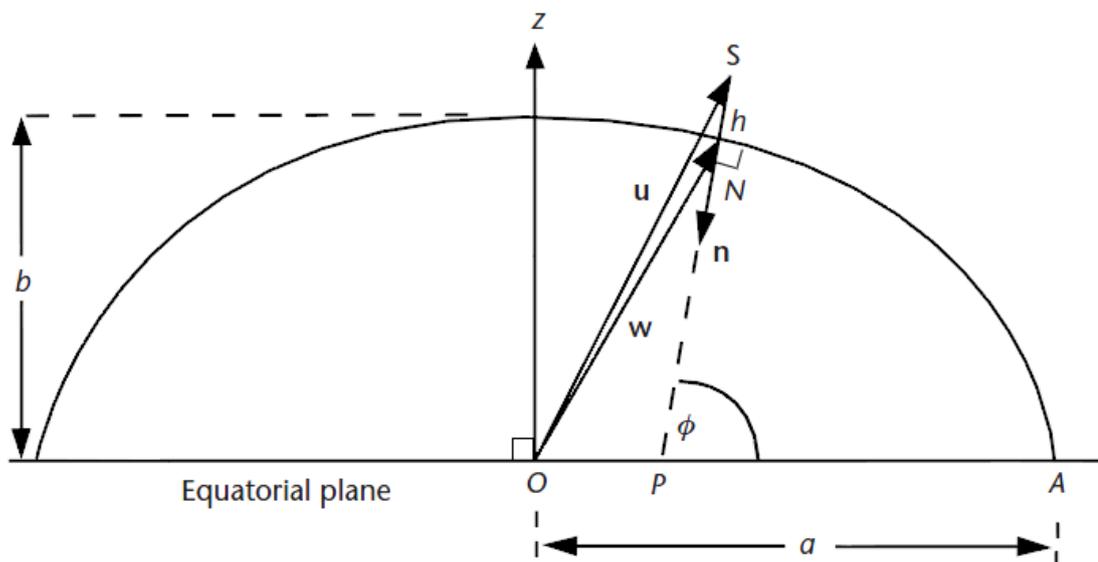


Figura 2.1: Elipsoide WGS-84

2.3. Conversión de coordenadas LLA a ECEF

Normalmente, para un usuario resulta más cercano obtener resultados de una posición determinada en coordenadas dadas por la Latitud, la Longitud y la Altura. Por ello es normal la conversión entre coordenadas ECEF y coordenadas LLA, y viceversa ya que muchos sistemas muestran los resultados con solo uno de los dos tipos. Para realizar esta conversión se necesita de un modelo elipsoidal de referencia, que como se explicó anteriormente, es el WGS-84. El conjunto de ecuaciones que realizan la conversión de coordenadas LLA a ECEF (x, y, z en metros), que será útil en el desarrollo de la interfaz, son las siguientes:

$$v = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \cdot \sin^2(\phi)}} \quad (2.3)$$

$$x = (v + h) \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\lambda) \quad (2.4)$$

$$y = (v + h) \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\lambda) \quad (2.5)$$

$$z = (v \cdot (1 - e^2) + h) \cdot \sin(\phi) \quad (2.6)$$

Donde,

$$a = 6378137$$

$$e^2 = 1 - (1 - f)^2$$

$$f = \frac{1}{298.257223563}$$

$$\phi = \text{Latitud en radianes}$$

$$\lambda = \text{Longitud en radianes}$$

$$h = \text{Altura en metros}$$

3. Aplicaciones

Existen numerosas aplicaciones relacionadas con el uso de GPS. La navegación marítima integra el sistema GPS, incluso en barcos de pequeño tamaño. Así mismo, en navegación terrestre su uso se da tanto en automóviles con sistemas con gráficos avanzados, como en receptores personales o sistemas orientados a la gestión de flotas (control de flotas de vehículos, redes de autobuses, policía...) sin que conlleve un elevado coste.

El problema llega en la navegación aérea, ya que los costes derivados de equipar un sistema GPS en una aeronave son muy elevados. En la navegación espacial se usan principalmente para determinar las posiciones de las constelaciones o en las lanzaderas espaciales.

En relación a los estudios geográficos el GPS ha facilitado el trabajo de localización, comparando las fases de las señales transmitidas por los satélites para obtener posiciones con una precisión de centímetros con gran utilidad en áreas como la geodinámica (estudio de la deformación de la corteza terrestre), topografía y realización de obras civiles como carreteras, redes eléctricas, etc.

Dado que el GPS nació de la necesidad de un sistema de defensa, no se debe olvidar su gran uso en aplicaciones militares, tanto en navegación como en control de armas, posicionamiento de tropas o guiado de misiles.

En el ámbito de las telecomunicaciones, el sistema GPS ha permitido una sincronización de las infraestructuras con receptores tanto fijos como móviles en cualquier punto de la superficie terrestre.

4. Modo de funcionamiento

Las distancias entre los satélites y el receptor no es una medida directa, necesita ser computada. Típicamente las distancias son derivadas de dos medidas fundamentales del GPS:

Medida de la pseudodistancia: se utilizan códigos C/A o P modulados sobre las señales portadoras. En la medida se guarda el tiempo actual del código que viaja desde el satélite al receptor. Este tiempo es multiplicado por la velocidad de la luz, lo cual lo convierte en distancia. En un determinado instante de tiempo, los códigos (por

ejemplo C/A) se generan tanto en el satélite como en el receptor. A continuación se transmite el código del satélite que es recogido por el receptor. El receptor compara entonces el código recibido con su propio código, y la diferencia es el tiempo de viaje.

Medida de fase de la portadora: se puede considerar una medida similar a la de la pseudodistancia, en el sentido de que es una medida del tiempo que tarda una señal en viajar del satélite al receptor. En este caso se utilizan las señales portadoras L1 y L2. Como estas tienen longitudes de onda de 19 cm y 24 cm respectivamente la distancia es un múltiplo de 19 o 24 más la cantidad observada. El receptor proporciona al usuario una ayuda en el cálculo de las incertidumbres. Cuando el receptor recibe una señal de un satélite le asigna un valor arbitrario a la incertidumbre. A partir de entonces el receptor cuenta el número de ciclos completos desde que recibió la señal. Es decir, la incertidumbre debe ser calculada cuando el satélite está siendo rastreado por el receptor.

En resumen, la técnica de medida de fase de la portadora es la más exacta pero debido a que necesita tiempos de ejecución muy elevados es imposible usarla en sistemas de tiempo real. En cambio la técnica de medida de pseudodistancia sí lo permite. Por ello, aunque el resultado no sea tan preciso como con medidas de fase, es normalmente la técnica que se utiliza.

4.1. Señales transmitidas

El satélite GPS transmite una señal RCHP (Right Hand Circularly Polarized) en la banda L a la frecuencia de 1575.42 MHz, conocida como L1. Esta señal se transmite con la potencia suficiente para que en la superficie de la Tierra haya como mínimo un nivel de potencia de señal de -160 dBw.

El satélite GPS también transmite otra señal a la frecuencia L2 de 1227.6 MHz. Se transmite con una potencia que consigue -166 dBw de potencia mínima de señal en la superficie de la Tierra. Esta segunda señal no se considera dentro del SPS por el Departamento de Defensa.

La mayoría de los usuarios utilizan la frecuencia L1 con código C/A. El código C/A es un código PRN (Pseudo Random Noise) que se transmite a una tasa de bit de 1.023 MHz. La secuencia de código PRN es en realidad la suma en modulo-2 del mensaje de navegación de 50 Hz y el código C/A. El código C/A está modulado sobre BPSK (Biphase Shift Key) y su secuencia se transmite cada milisegundo. El receptor demodula el código recibido de la portadora L1 y calcula la diferencia entre el código

recibido y el generado por el receptor. Una vez detectadas las diferencias reconstruye los datos de navegación basándose en las diferencias entre estos códigos.

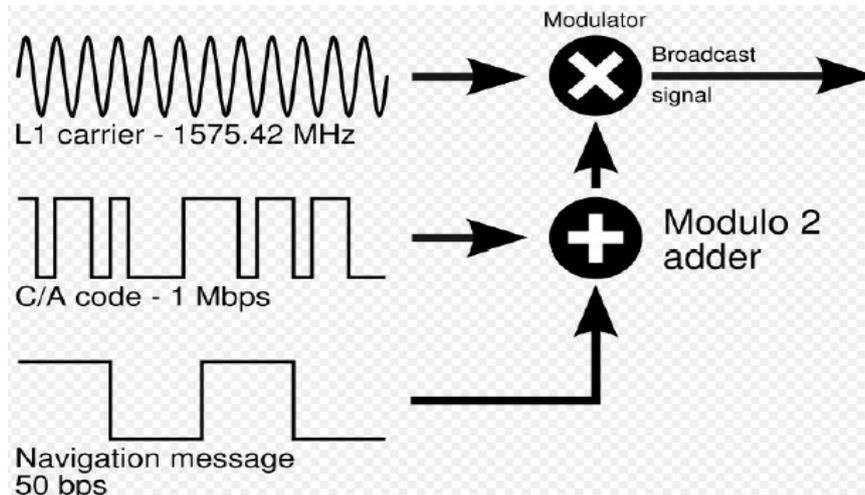


Figura 2.2: Tratamiento señal GPS

4.2. Mensaje de Navegación GPS

Cada satélite proporciona una serie de datos necesarios para determinar la posición del receptor. La figura 2.3 proporciona una visión general de la estructura y contenido de los datos que se envían en cada mensaje. Con estos datos se puede determinar lo siguiente:

- Tiempo de transmisión del satélite
- Posición del satélite
- Salud del satélite (especifica si la información enviada por el satélite es buena)
- Corrección de reloj del satélite
- Efectos de retraso de propagación
- Tiempo de transferencia a UTC (Universal Time Coordinated)
- Estado de la constelación

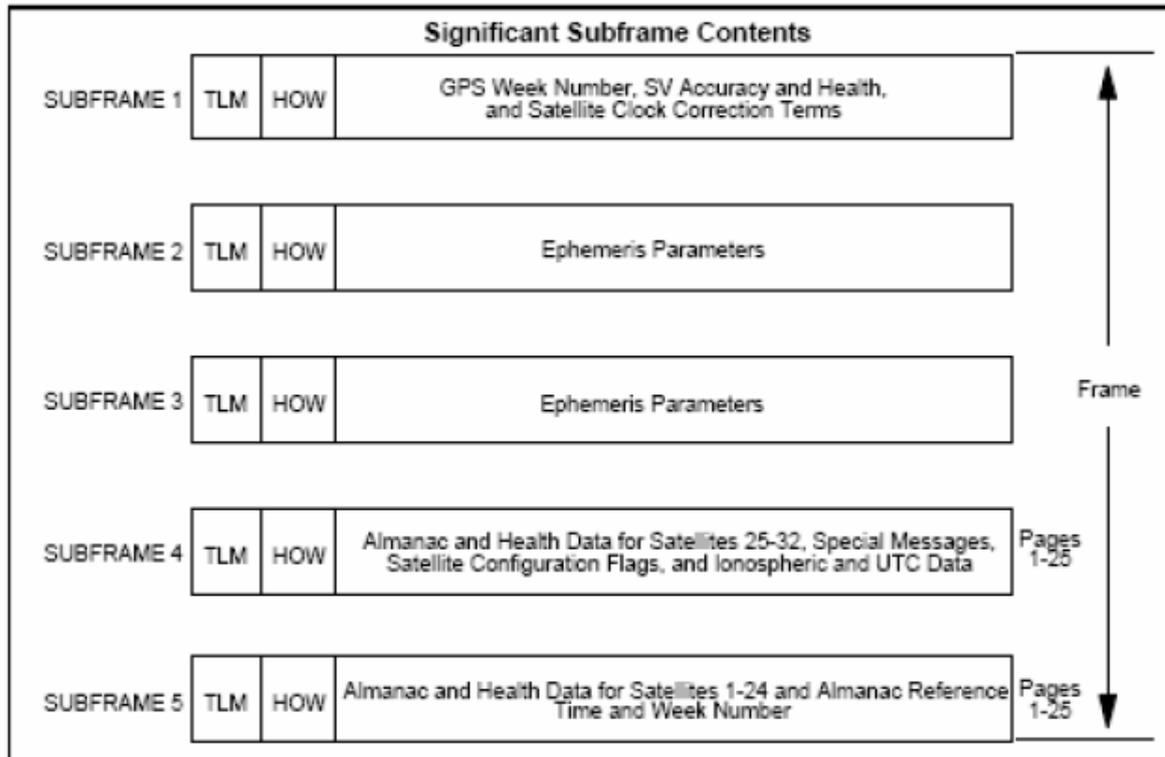


Figura 2.3: Estructura del mensaje de navegación

Cada satélite transmite sus mensajes de navegación sobre el enlace de datos L1 a una tasa de 50 bps. La estructura utilizada es un formato básico de 1500 bits de longitud, formados por 5 subtramas, por lo que cada subtrama son 300 bits. Las subtramas 4 y 5 son subconmutadas 25 veces cada una, lo que significa que un mensaje de datos este completo se requiere la transmisión de 25 tramas completas.

Como se muestra en la figura 2.3, las 25 versiones de las subtramas 4 y 5 son conocidas como páginas, numeradas de la 1 hasta la 25 para cada subtrama. Cada subtrama contiene 10 palabras, y cada palabra 30 bits de longitud y en todas las palabras el MSB (Most Significant Bit) es transmitido primero. Estas dos subtramas contienen, entre otras cosas, el almanaque, que recoge la información de todos los satélites del sistema GPS: correcciones de reloj, posiciones, retardos, etc.

5. Cálculo de la Posición

La posición de un determinado punto en el espacio se puede obtener con medidas desde ese punto a posiciones conocidas en el espacio, pseudodistancias. Para tener una pequeña visión de cómo se calcula la posición del receptor en base a los datos conocidos se muestran varios escenarios.

En el caso unidimensional de la figura 2.4 el usuario (U) está situado en el eje x . Si la posición del satélite s_1 y su distancia x_1 es conocida, la posición del usuario puede estar en dos sitios, a la derecha o a la izquierda de s_1 . Para determinar la posición real del usuario se debe conocer la distancia a otro satélite (s_2, x_2).

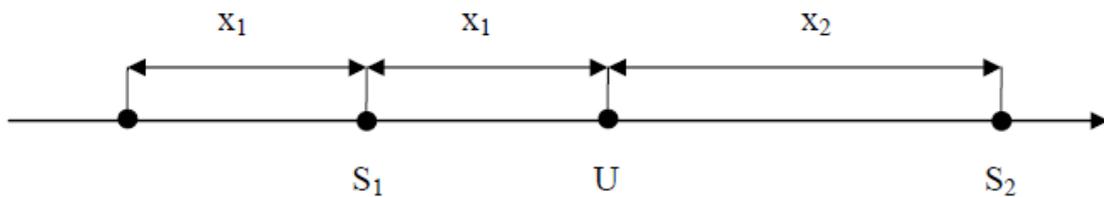


Figura 2.4: Escenario unidimensional

En el caso bidimensional será necesario conocer tres satélites y tres distancias. La traza de un punto con distancia constante a otro punto en el caso bidimensional forma un círculo. Si solo se tuvieran datos de dos satélites, la intersección de los dos círculos dará dos posibles soluciones, por ello con un tercer satélite se conocerá la posición de usuario como se ilustra en la figura 2.5.

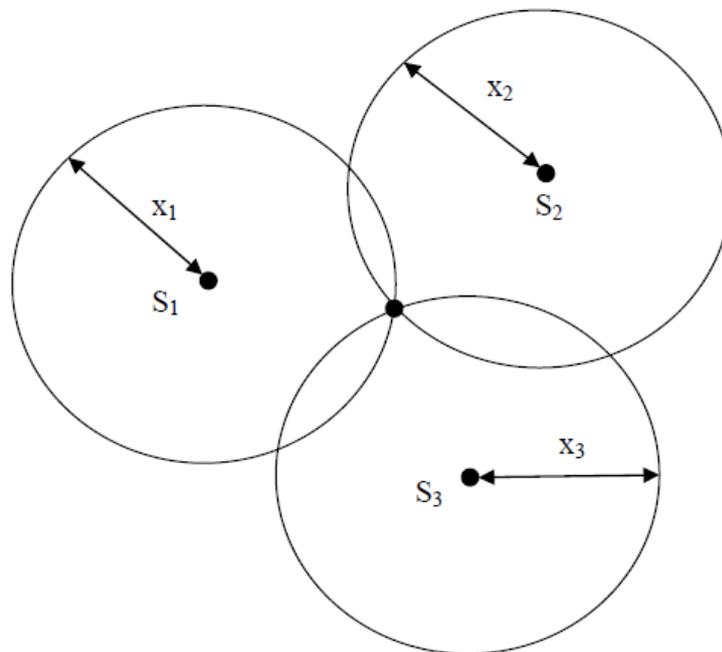


Figura 2.5: Escenario bidimensional

Al igual que en los casos anteriores, con tres dimensiones es necesario conocer las posiciones y distancias de cuatro satélites. En este caso se forman esferas. La intersección de dos esferas forma un círculo, y este con otra esfera nos da dos puntos posibles para la posición de usuario. Para conocer la posición final exacta es necesario un cuarto satélite.

En GPS, la posición del satélite se conoce con los datos de las efemérides transmitidos por el propio satélite. El receptor se encarga de medir la distancia que existe entre el satélite y el dispositivo. Una vez conocidos estos datos la posición del receptor puede ser determinada.

5.1. Ecuaciones básicas para determinar la posición

En la figura 2.6, queremos determinar el vector u , que representa la posición del receptor respecto al origen de coordenadas ECEF. La posición del receptor se considera desconocida y sus coordenadas las denominaremos x_u , y_u y z_u .

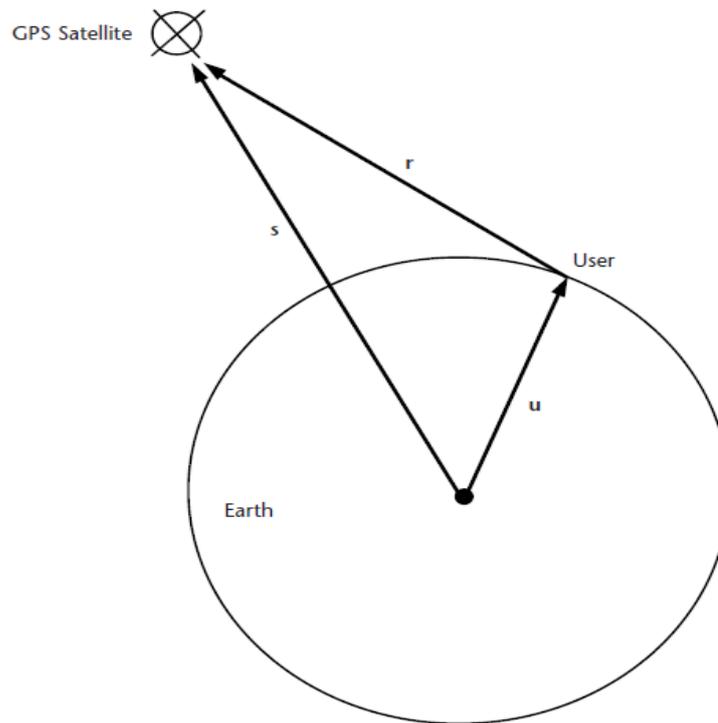


Figura 2.6: Cálculo de la posición respecto al origen

El vector r representa el offset existente entre usuario y satélite. El satélite está localizado en las coordenadas x_s , y_s y z_s del sistema de coordenadas ECEF. El vector s representa la posición del satélite relativa al origen de coordenadas y es calculado con los datos de las efemérides enviados por el satélite. Así se tiene que el vector r que determina la distancia entre el satélite y el usuario es

$$r = s - u \quad (2.7)$$

Su magnitud es

$$\|r\| = \|s - u\| = r \quad (2.8)$$

La distancia r se calcula midiendo el tiempo de propagación requerido para que el código generado por el satélite viaje desde este hasta la antena del receptor. El tiempo de propagación se representa como Δt . Multiplicando este tiempo de propagación por la velocidad de la luz la distancia puede ser calculada, solamente en el caso ideal de que el reloj del satélite y el del receptor estén sincronizados, pero normalmente no lo están.

Generalmente el reloj del receptor tiene un error de sesgo sobre el tiempo del sistema, y suele haber una diferencia con respecto a la frecuencia y el tiempo que

genera el satélite. Al rango que deriva del proceso de correlación se le denomina pseudodistancia, y está formado por el rango geométrico satélite-usuario, el offset atribuido a la diferencia entre el tiempo del sistema y el reloj de usuario y el offset entre el tiempo del sistema y el reloj del satélite.

El rango geométrico es

$$r = c(T_u - T_s) = c\Delta t \quad (2.9)$$

La pseudodistancia es

$$\rho = c[(T_u + t_u) - (T_s + \delta t)] = c(T_u - T_s) + c(t_u - \delta t) = r + c(t_u - \delta t) \quad (2.10)$$

Donde,

T_s = tiempo del sistema cuando la señal sale del satélite

T_u =tiempo del sistema cuando la señal llega al receptor

δt =offset entre el reloj del satélite y el tiempo del sistema (positivo es adelantado; negativo es retrasado)

t_u =offset entre el reloj del receptor y el tiempo del sistema

$T_s + \delta t$ =reloj del satélite leído en el instante de tiempo en el que la señal sale del satélite

$T_u + t_u$ =reloj del receptor leído en el instante de tiempo en el que la señal llega al receptor

c =velocidad de la luz

La ecuación puede reescribirse como

$$\rho - c(t_u - \delta t) = \|s - u\| \quad (2.11)$$

El offset del reloj del satélite δt está formado por varias desviaciones que son corregidas y reenviadas en el mensaje de navegación. Estas correcciones son aplicadas dentro del receptor para que así sea posible sincronizar los relojes. Por todo esto se asume que el offset del reloj, δt , es compensado por lo que podemos despreciarlo.

$$\rho - ct_u = \|s - u\| \quad (2.12)$$

Para determinar la posición del usuario en tres dimensiones y el offset, se realizan medidas de pseudodistancias a al menos cuatro satélites. Como resultado dará un sistema de ecuaciones.

$$\rho_j = \|s_j - u\| + ct_u \quad (2.13)$$

Así se forma el siguiente conjunto de ecuaciones no lineales, donde j va desde 1 a 4 y los términos desconocidos son x_u , y_u , z_u y t_u :

$$\rho_1 = \sqrt{(x_1 - x_u)^2 + (y_1 - y_u)^2 + (z_1 - z_u)^2} + ct_u \quad (2.14)$$

$$\rho_2 = \sqrt{(x_2 - x_u)^2 + (y_2 - y_u)^2 + (z_2 - z_u)^2} + ct_u \quad (2.15)$$

$$\rho_3 = \sqrt{(x_3 - x_u)^2 + (y_3 - y_u)^2 + (z_3 - z_u)^2} + ct_u \quad (2.16)$$

$$\rho_4 = \sqrt{(x_4 - x_u)^2 + (y_4 - y_u)^2 + (z_4 - z_u)^2} + ct_u \quad (2.17)$$

Estas ecuaciones pueden resolverse con técnicas iterativas de linealización. Como ya se ha mencionado, las posiciones de los satélites son conocidas. Las distancias del usuario a los satélites deben ser medidas en un instante de tiempo determinado. Cada satélite transmite una señal con un tiempo asociado a él. Midiendo el tiempo que tarda la señal en viajar desde el satélite al usuario se puede determinar la distancia entre el satélite y el usuario.

6. Receptor GPS Básico

Un receptor GPS básico es el mostrado en la figura 2.7. Las señales que transmiten los satélites son recibidas por la antena. En la cadena RF la señal de entrada se amplifica y la frecuencia se baja a una frecuencia intermedia (IF). En un receptor GPS típico, las señales IF se muestrean y digitalizan con un convertidor analógico-digital (ADC).

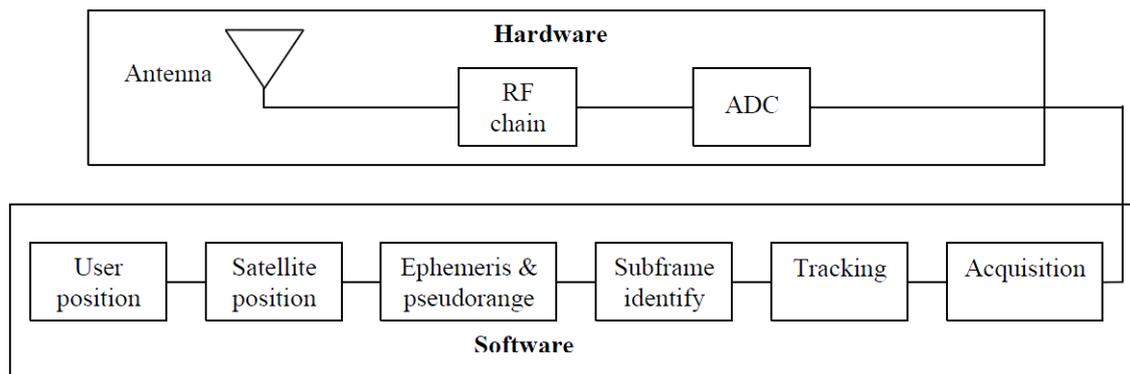


Figura 2.7: Receptor GPS básico

Una vez la señal es digitalizada se procede a procesarla. La adquisición se basa en encontrar la señal de un determinado satélite. Si el receptor no tiene información del almanaque almacenada en la memoria, debe ir probando uno a uno hasta encontrar un satélite que tenga la suficiente relación señal/ruido. Cuando finalmente le encuentra, obtiene la efemérides demodulando el mensaje de navegación, y con ello se obtienen las posiciones de los satélites, la salud y el tiempo GPS. Las pseudodistancias se estiman a través de un proceso de correlación. Finalmente con los datos de las posiciones de los satélites y los pseudodistancias se puede calcular la posición del receptor.

7. Errores en GPS

La precisión con la que se determina una posición depende de la exactitud de las pseudodistancias obtenidas y la geometría de los satélites en dicho instante. Por lo tanto, el error en la posición se puede definir como:

$$\text{Error de posición} = \text{UERE} \cdot \text{GDOP}$$

7.1. User Equivalenty Range Error (UERE)

El UERE es el error en las medidas de las pseudodistancias desde el satélite al usuario, siendo producto de varios factores, en los que se incluyen la estabilidad del reloj, la predictibilidad de las orbitas de satélite, los errores en el mensaje de navegación, la precisión de correlación en el receptor, los errores debidos a la

distorsión atmosférica y los cálculos para compensarla, y la calidad de la señal del satélite. Se considera un valor igual para todos los satélites.

En resumen, el UERE se puede definir como un vector sobre la línea vista entre el usuario y el satélite, resultado de proyectar sobre ella todos los errores del sistema que se consideran independientes y gaussianos entre sí, por lo que es un error cuadrático medio obtenido como raíz cuadrada de los errores individuales al cuadrado.

7.2. Dilution Of Precision (DOP)

Un factor importante para determinar la exactitud de la posición es la constelación o geometría del grupo de satélites cuyas señales son recibidas. El DOP solo depende de la posición de los satélites: cuantos satélites se pueden ver, a qué altura están en el cielo... y siempre en relación a la localización del receptor. Este grupo de cosas se conoce normalmente como la geometría.

Un indicador de la calidad de la geometría de un satélite es el DOP. La posición calculada por un receptor puede variar dependiendo de cuáles son los satélites que se usan para la medida. Las diferentes geometrías de los satélites pueden aumentar o disminuir el error en el cálculo de la posición del receptor. Cuanto mayor sea el ángulo entre los satélites usados menor será el DOP, y como consecuencia, más exacta será la medida. Al contrario, un valor alto del DOP conlleva una pobre geometría del satélite por lo que la medida resultante no se puede considerar como buena. Lo ideal sería tener un satélite directamente sobre el receptor y los otros tres espaciados 120° alrededor del receptor en el horizonte. A continuación se muestran dos figuras donde se enfoca de manera visual el concepto de DOP.

Good Dilution of Precision

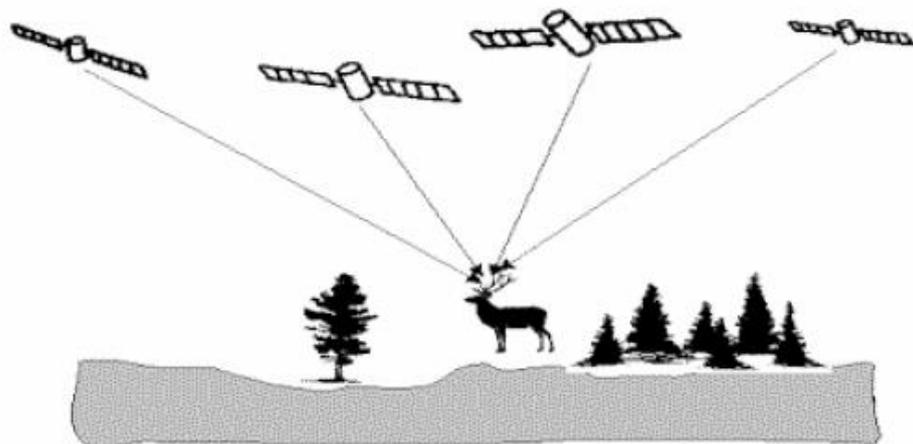


Figura 2.8: Buena dilución de la precisión

Poor Dilution of Precision

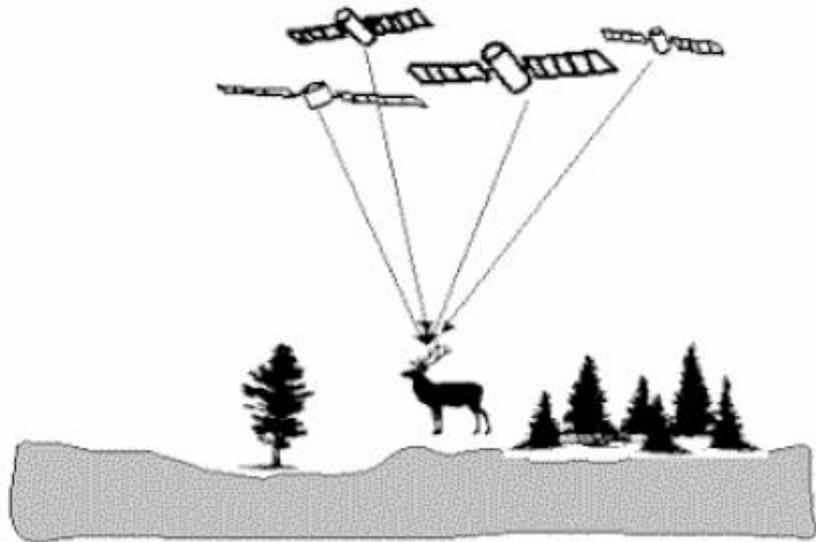


Figura 2.9: Mala dilución de la precisión

El DOP está dividido en varias componentes. Los satélites están en continuo movimiento, por lo que la geometría varía con el tiempo, aunque de manera predecible. A continuación se muestran las definiciones:

- DOP de posición (PDOP), medida de incertidumbre de la precisión debido a la posición geométrica de los satélites:

$$PDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2} \quad (2.18)$$

- DOP horizontal (HDOP), medida de incertidumbre en la posición horizontal (posicionamiento en 2D):

$$HDOP = \frac{1}{\sigma} \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (2.19)$$

- DOP vertical (VDOP), medida de la incertidumbre en la posición vertical:

$$VDOP = \frac{\sigma_z}{\sigma} \quad (2.20)$$

Donde,

- σ : desviación típica derivada del procedimiento de mínimos cuadrados
- $\sigma_x \sigma_y \sigma_z$: errores RMS medidos de la posición del usuario en las direcciones xyz

7.3. Fuentes de error

Normalmente los errores están relacionados con las inestabilidades de los relojes atómicos, los errores en el cálculo de las posiciones de los satélites y la propagación anormal de las señales. Todos estos son compensados en su mayoría de manera más o menos sencilla.

Por otro lado, se sabe que existe una variación entre las orbitas de los satélites calculadas mediante las efemérides y la trayectoria real. Esto es debido a las variaciones del campo gravitatorio que afectan a la medida, por lo que la precisión de la posición de un satélite tendrá un error aproximado de 20 metros.

Como ya vimos, una fuente importante de error es la desincronización de los relojes atómicos. Estos se van desviando lentamente por lo que resulta necesario que las estaciones terrestres se ocupen continuamente de controlar y sincronizar los relojes.

La propagación de las señales por la ionosfera y troposfera afecta a las ondas que los atraviesan de manera importante ya que son medios dispersivos que modifican las velocidades de grupo y la fase. Como resultado la portadora sufre unos retardos que hacen que no coincida con la señal calculada. Aunque los errores producidos por la ionosfera son muy importantes, son más fáciles de corregir que los de la troposfera por ser errores sistemáticos. Se puede corregir más del 75% del error.

Capítulo 3

Protocolo TSIP

El “*Trimble Standard Interface Protocol (TSIP)*” especifica el protocolo de comunicación formado por un conjunto de paquetes usados para transmitir y recibir información del receptor GPS de Trimble, es decir, es un protocolo que permite una comunicación bidireccional con el receptor. El protocolo fue creado por “*Trimble Advanced Navigation System*” (TANS) y se aplica a muchos equipos. Cada paquete contiene un identificador de paquete y empiezan y acaban con caracteres de control.

Cuando se aplica una tensión de +24 VDC al receptor GPS Thunderbolt E, este comienza a rastrear satélites con un periodo de calentamiento aproximado de unos minutos. El GPS Thunderbolt E está configurado para que automáticamente de cómo salida los paquetes 0x8F-AB y 0x8F-AC, mientras que para recibir otros es necesaria una comunicación anterior usuario-receptor mediante los paquetes de petición.

Los paquetes 0x8F-AB y 0x8F-AC son recibidos una vez por segundo y dan casi toda la información requerida: tiempo, posición, estado del GPS y salud. El siguiente conjunto de paquetes son los que necesitan de una previa petición por parte del usuario para su posterior recepción. Se muestran solo los paquetes que se utilizan en el desarrollo del sistema.

0x42: Position XYZ (ECEF), single precision

0x4A: Position LLA, single precision

0x6D: Satellite list, DOPS, mode

0x5C: Satellite Tracking Status

La estructura del paquete del TSIP es la misma tanto para paquetes de petición como para paquetes de respuesta. El formato es el siguiente:

<DLE> <id> <bytes de datos> <DLE> <ETX>

Dónde:

- <DLE> es el byte 0x10
- <id> es el byte identificador del paquete, que puede contener cualquier valor excepto <EXT> y <DLE>
- <ETX> es el byte 0x03

Los bytes del string de datos pueden contener cualquier valor y en diferente formato. Cuando el formato es “integer”, “single” y “double” en números con múltiples bytes el byte más significativo es enviado primero.

Los tipos de datos usados en TSIP se muestran a continuación:

| | |
|---------|---|
| UINT8: | 8-bit unsigned integer (0 to 255) |
| SINT8: | 8-bit signed integer (-128 to 127) |
| INT16: | 16-bit unsigned integer (0 to 65.535) |
| SINT16: | 16-bit signed integer (-32.768 to 32.767) |
| UINT32: | 32-bit unsigned integer (0 to 4.294.967.295) |
| SINT32: | 32-bit signed integer (-2.147.483.648 to 2.147.483.647) |
| Single: | Single-precision float (4 bytes) (1,2x10 ⁻³⁸ to 3,4x10 ³⁸) |
| Double: | Double-precision float (8 bytes) (2,2x10 ⁻³⁰⁸ to 1,8x10 ³⁰⁸) |

1. Descripción de Paquetes

En esta sección se explican en detalle los paquetes del TSIP utilizados para la realización de la interfaz.

1.1. Command Packet 0x1E: Initiate Cold, Warm, or Factory Reset

Este paquete se envía al receptor cuando se quiere realizar un reset. Un reset en frío limpia los datos del GPS (almanaque, efemérides, etc) guardados en la RAM. Un reset de fábrica restaura todos los parámetros de configuración que venían de fábrica a su valor por defecto que está guardado en la memoria flash. El reset caliente guarda la última posición, el tiempo y el almanaque pero borra la efemérides. Este paquete solo contiene un byte que determina de que tipo de reset se trata.

| Byte | Item | Type | Value | Meaning |
|------|-------|-------|-------|---------------|
| 0 | Reset | UNIT8 | 0x4B | Cold Reset |
| | | | 0x0E | Warm Reset |
| | | | 0x46 | Factory Reset |

1.2. Command Packet 0x35: Set or Request I/O Options

Con este paquete se pide información relativa a la configuración actual del receptor. Así mismo, es posible establecer los valores de configuración Entrada/Salida que deseemos. Para ello, se debe añadir bytes con las nuevas opciones de configuración. El receptor GPS envía como respuesta el paquete 0x55. Las opciones más relevantes que se tienen en cuenta a la hora de realizar la interfaz son las siguientes:

- Coordenadas cartesianas (ECEF): activado / desactivado
- Coordenadas LLA: activado / desactivado
- Precisión de la posición: simple / doble
- Referencia temporal: tiempo GPS / tiempo UTC
- Formato de salida: AMU / dBHz

| Byte | Data type | Bit | Value | Meaning | Associated Packet |
|------|-----------|-----|-------|------------------|-------------------|
| 0 | Position | 0 | 0 | ECEF off | 0x42 o |
| | | | 1 | ECEF on | 0x83 |
| | | 1 | 0 | LLA off | 0x4A o |
| | | | 1 | LLA on | 0x84 |
| | | 2 | 0 | HAE (datum) | 0x4A o |
| | | | 1 | MSL geiod | 0x84 |
| | | 3 | 0 | Reserved | |
| | | | 4 | 0 | Single-precision |
| | | 1 | | Double-precision | 0x83/84 |
| | | 5 | 0 | 0x8F-20 off | |
| | | | 1 | 0x8F-20 on | |
| | | 6:7 | 0 | Reserved | |
| 2 | Timing | | 0 | GPS | |
| | | 1 | UTC | | |

| | | | | |
|----------|-----------|---|---|--------|
| | | 1 | 0 | |
| | | | 1 | |
| 3 | Auxiliary | 0 | 0 | 5A off |
| | | | 1 | 5A on |
| | | 1 | 0 | |
| | | | 1 | |

1.3. Report Packet 0x55: I/O Options

Este paquete proporciona las opciones Entrada/Salida actuales. Se manda como respuesta al paquete de petición 0x35 y contiene el mismo que este.

1.4. Command Packet 0x3C: Request Satellite Tracking Status

Con este paquete se manda una petición del número de satélites que están siendo rastreados en ese instante. La respuesta del receptor GPS viene dada en el paquete 0x5C. Normalmente se manda el paquete sin especificar ningún satélite en concreto, es decir, se manda el *id del paquete (0x3C)* seguido del valor "0" más los caracteres de control. Con ello se obtiene la información del conjunto total de satélites rastreados en el paquete 0x5C.

| Byte | Item | Type | Value | Meaning |
|------|---------------|-------|-------|--|
| 0 | Satellite PRN | UNIT8 | 0 | All satellites in current tracking set |
| | | | 1-32 | Specific desired satellite |

1.5. Report Packet 0x5C: Satellite Tracking Status

El receptor manda este paquete como respuesta al paquete de petición 0x3C, y nos proporciona información del estado de un satélite. Se reciben tantos paquetes de este tipo como satélites rastreados, todos con el mismo formato. La información es la siguiente:

- De que satélite se trata.

- Canal
- Estado y uso de la efemérides
- Nivel de la señal
- Tiempo de la última medida hecha con el satélite
- Elevación del satélite sobre el horizonte
- Azimut del satélite

| Byte | Bit | Ítem | Type | Value | Meaning |
|-------|-----|--------------------------|-----------|-------------|--|
| 0 | | SV PRN Number | UNIT8 | 1-32 | PRN |
| 1 | 0:2 | Slot number | Bit field | 0 0 0 | Not used |
| 1 | 3:7 | Channel number | Bit field | 0 0 0 0 | |
| 2 | | Acquisition flag | UNIT8 | 0 1 2 | Never acquired Acquired Re-opened Search |
| 3 | | Ephemeris flag | UNIT8 | 0 >0 | Flag not set Good ephemeris |
| 4-7 | | Signal level | Single | | AMU or dBHz |
| 8-11 | | Time of last measurement | Single | Secs | GPS time of week |
| 12-15 | | Elevation angle | Single | | Radians |
| 16-19 | | Azimuth angle | Single | | Radians |
| 20 | | Old measurements flag | UNIT8 | 0 >0 | Flag not set Measurement old |

1.6. Report Packet 0x42: Single-precision Position Fix

Este paquete proporciona la posición fija actual del GPS en coordenadas XYZ ECEF. Para ello en el paquete de establecimiento de las opciones Entrada/Salida (paquete 0x5C) tienen que estar seleccionadas las opciones de “ECEF on” y precisión simple. El receptor manda este paquete cada vez que obtenga una posición fija o en respuesta al paquete de petición 0x37.

| Byte | Item | Type | Units |
|------|------|------|-------|
|------|------|------|-------|

| | | | |
|-------------|---|--------|--------|
| 0-3 | X | Single | Meters |
| 4-7 | Y | Single | Meters |
| 8-11 | Z | Single | Meters |

1.7. Report Packet 0x4A: Single-precision LLA Position fix

Este paquete proporciona la posición fija actual del GPS en coordenadas LLA (Latitud, Longitud y Altura). Para ello en el paquete de establecimiento de las opciones Entrada/Salida tienen que estar seleccionadas las opciones de “LLA on” y precisión simple.

La conversión por defecto se realiza de acuerdo al elipsoide WGS-84.

| Byte | Item | Type | Units |
|--------------|-------------|--------|----------------------------------|
| 0-3 | Latitude | Single | Radians: + for north,- for south |
| 4-7 | Longitude | Single | Radianes: + for east, - for west |
| 8-11 | Altitude | Single | Meters |
| 12-15 | Clock bias | Single | Meters |
| 16-19 | Time-of-fix | Single | Seconds |

Nota: se toma $\pi=3,1415926535898$ para la conversión de radianes a grados.

1.8. Report Packet 0x6D: Satellite Selection List

Este paquete proporciona la lista de los satélites que están siendo usados para determinar la posición por el receptor GPS. Además, da los valores de PDOP, HDOP, VDOP y TDOP de la medida y el modo que se está utilizando en el receptor, automático o manual, 2D o 3D, etc. Tiene una longitud variable igual a 17 + nsvs donde “nsvs” es el número de satélites usados en la medida. El receptor manda este paquete en respuesta al paquete de petición 0x24.

| Byte | Bit | Item | Type | Value | Meaning |
|----------|-----|---------------|-----------|-------|--------------|
| 0 | 0:2 | Fix dimensión | Bit field | 1 | 1D clock fix |
| | | | | 3 | 2D fix |
| | | | | 4 | 3D fix |
| | | | | 5 | 0D clock fix |
| | 3 | Fix mode | Bit field | 0 | Auto |

| | | | | | |
|--------------|-----|----------------------|-----------|---------|--------|
| | | | | 1 | Manual |
| | 4:7 | Number of SVs in fix | Bit field | 0-12 | Count |
| 1-4 | | PDOP | Single | | PDOP |
| 4-8 | | HDOP | Single | | HDOP |
| 9-12 | | VDOP | Single | | VDOP |
| 13-16 | | TDOP | Single | | TDOP |
| 17-n | | SV PRN | SINT8 | ±(1-32) | PRN |

1.9. Command Packet 0x24: Request GPS Satellite Selection

Con este paquete se envía una petición para la recepción de una lista de los satélites utilizados en la última medida. Su respuesta es transmitida en el paquete 0x6D mostrado anteriormente. Solo se envía los caracteres de control con el identificador de paquete (0x24). No contiene bytes de datos.

1.10. Report Packet 0xBB: Data Format

Este paquete se usa para seleccionar las opciones de configuración del receptor GPS. En el modo automático el receptor selecciona el tipo de medida, 2D o 3D, dependiendo del número de satélites que estén disponibles. Como ya se mencionó, para poder dar una solución en 3 coordenadas se necesitan al menos 4 satélites, por lo que cuando se dispongan de 3 satélites solamente, se recibe una solución en dos coordenadas (2D). Así mismo, en el modo “Full Position (3D)” solo se recibe un resultado si el número de satélites con una buena relación señal a ruido es mayor o igual a 4. En el modo “Over-Determined Clock” el receptor usa todos los satélites para buscar la medida más exacta.

| Byte | Item | Type | Value | Meaning |
|------|---------------|-------|-------|-----------------------|
| 1 | Receiver mode | UINT8 | 0 | Automatic(2D/3D) |
| | | | 4 | Full Position(3D) |
| | | | 7 | Over-Determined Clock |

1.11. Report Packet 0x8F-AB: Primary Timing Packet

Este paquete proporciona información del tiempo una vez por segundo: GPS week number, GPS time-of-week, UTC integer offset, time flags, data y time-of-day (TOD).

| Byte | Bit | Item | Type | Value | Meaning |
|-------|-----|--------------|--------|-------|---------------------|
| 0 | | Subcode | UINT8 | | 0xAB |
| 1-4 | | Time of week | UINT32 | | GPS seconds of week |
| 5-6 | | Week number | UINT16 | | GPS week number |
| 10 | | Seconds | UINT8 | 0-59 | Seconds |
| 11 | | Minutes | UINT8 | 0-59 | Minutes |
| 12 | | Hours | UINT8 | 0-23 | Hours |
| 13 | | Day of month | UINT8 | 1-31 | Day of month |
| 14 | | Month | UINT8 | 1-12 | Month of year |
| 15-16 | | Year | UINT16 | | Four digits of Year |

1.12. Report Packet 0x8F-AC: Supplemental Timing Packet

Este paquete proporciona información de tiempo complementaria a la del paquete 0x8F-AB, y al igual que este, una vez por segundo. También da información acerca de la posición, estado, salud y estado operacional del receptor. Lo posición enviada en este paquete depende del modo del receptor y progreso. Cuando está en progreso, la posición es una media de todas las posiciones fijas encontradas. Cuando el progreso ha llegado a su fin la posición es la exacta.

| Byte | Item | Type | Value | Description |
|-------|----------------------|-------|-------|------------------------|
| 0 | Subcode | UINT8 | 0xAC | |
| 1 | Receiver Mode | UINT8 | 0 | Automatic(2D/3D) |
| | | | 1 | Single Satellite(Time) |
| | | | 3 | Horizontal(2D) |
| | | | 4 | Full Position(3D) |
| | | | 7 | Over-Determined Clock |
| 2 | | | | |
| 3 | Self-Survey Progress | UINT8 | | 0-100% |
| 10-11 | | | | |
| 12 | GPS Decoding Status | UINT8 | 0x00 | Doing fixes |
| | | | 0x01 | Don't have GPS time |

| | | | |
|--------------|-----------|--------|----------------------------|
| | | 0x03 | PDOP too high |
| | | 0x08 | No usable sats |
| | | 0x09 | Only 1 usable sat |
| | | 0x0A | Only 2 usable sats |
| | | 0x0B | Only 3 usable sats |
| | | 0x0C | The chosen sat is unusable |
| | | 0x10 | TRAIM rejected the fix |
| | | | |
| 36-43 | Latitude | Double | Radians |
| 44-51 | Longitude | Double | Radians |
| 52-59 | Altitude | Double | Meters |

Capítulo 4

Descripción del Sistema

En este capítulo se da una descripción detallada de las distintas partes que forman el sistema desarrollado. Para su correcto funcionamiento y comunicación se necesitan: el receptor GPS Trimble Thunderbolt E, su correspondiente antena Trimble, un ordenador con un puerto serie y el programa Matlab.

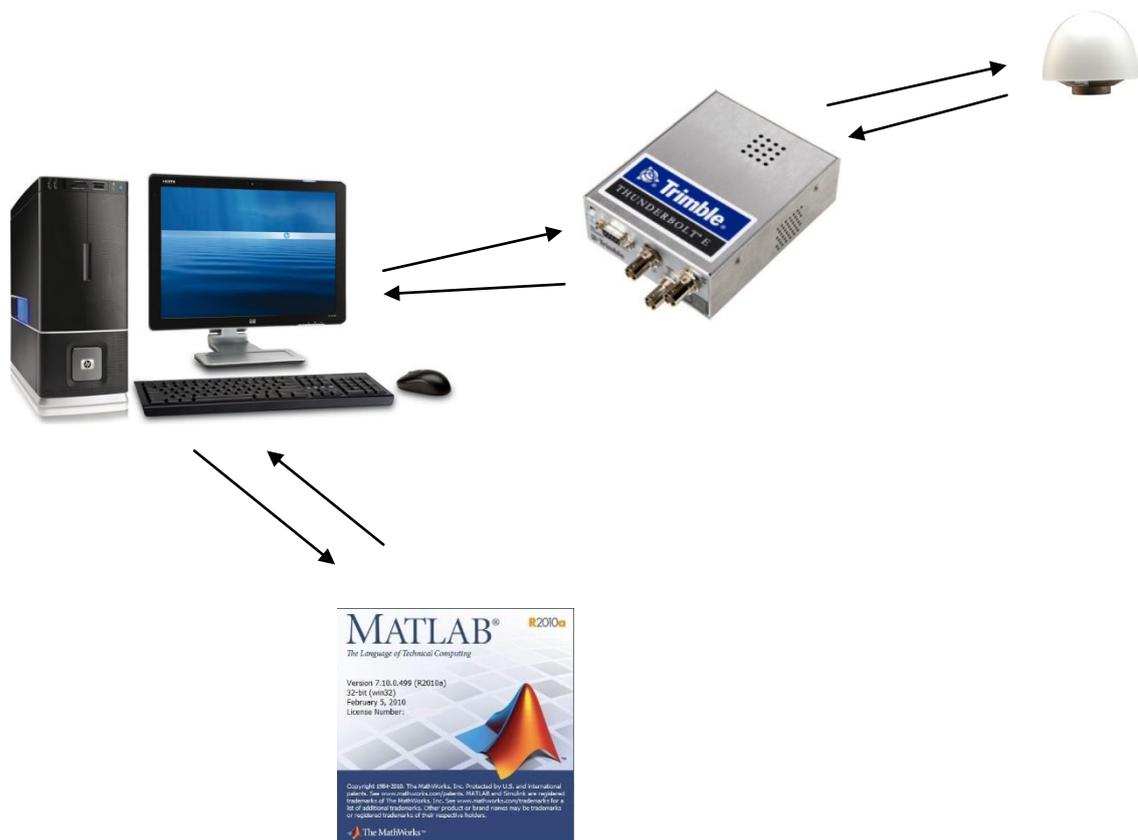


Figura 4.1: Descripción del Sistema implementado

Como se muestra en la figura 4.1, el usuario envía y recibe toda la información del receptor GPS mediante el entorno de Matlab, es decir, solo se interactúa con el receptor. El receptor GPS tiene una conexión RS232 que se conecta mediante USB al puerto serie del ordenador.

1. Hardware

A continuación se muestran las características básicas del hardware utilizado en el sistema. Tanto la antena como el receptor son productos de Trimble y ambos forman parte del mismo kit. La conexión entre ambos se realiza mediante un cable RG-6 con conectores TNC en sus extremos, que está también incluido en el kit de Trimble.

1.1. Antena

La antena Trimble tiene unas dimensiones de 77.5 mm de diámetro y 66.2 mm de altura (3.05 " x 2.61"), y un peso de 170 gramos. Trabaja a una frecuencia de 1575.42 MHz \pm 1.023 MHz y el tipo de polarización es circular (RHCP). Es necesario que a la antena le llegue un voltaje de 5 voltios, y su ganancia será de 35 dB \pm 3dB.



La antena es capaz de cubrir el azimut con una cobertura de 360° (omnidireccional), y en cuanto a la elevación desde 0° a 90° (hemisférico). En cuanto al conector, es de tipo TNC al igual que el cable RG-6.

1.2. Receptor

El receptor corresponde al modelo *Thunderbolt E* de Trimble. Consta de las siguientes dimensiones: 127 mm (longitud) x 102 mm (ancho) x 40 mm (alto) (5" x 4" x 2"). Su peso es de 0.285 kg. Trabaja a la frecuencia L1 de 1575.42 MHz.

Trabaja con códigos C/A (SPS), y tiene 12 canales disponibles para su continuo rastreo de señales que provienen de los satélites. El conector al que va conectado el cable RG-6 que lo une a la antena es de tipo BNC, por lo que necesita de un conector BNC-TNC para su correcto acoplamiento. Por otro lado, la interfaz serie utiliza un conector RS232 con DB-9.



2. Software

La GUI implementada está formada por un programa principal y varias funciones que son llamadas desde este. El programa principal es un bucle continuo en el que tanto se envía información al receptor como se recibe de este. Después de recibir esta información, esta se procesa en distintos vectores (en la subfunción *vector.m*) y con ayuda de cada subfunción se seleccionan los datos que interesan.

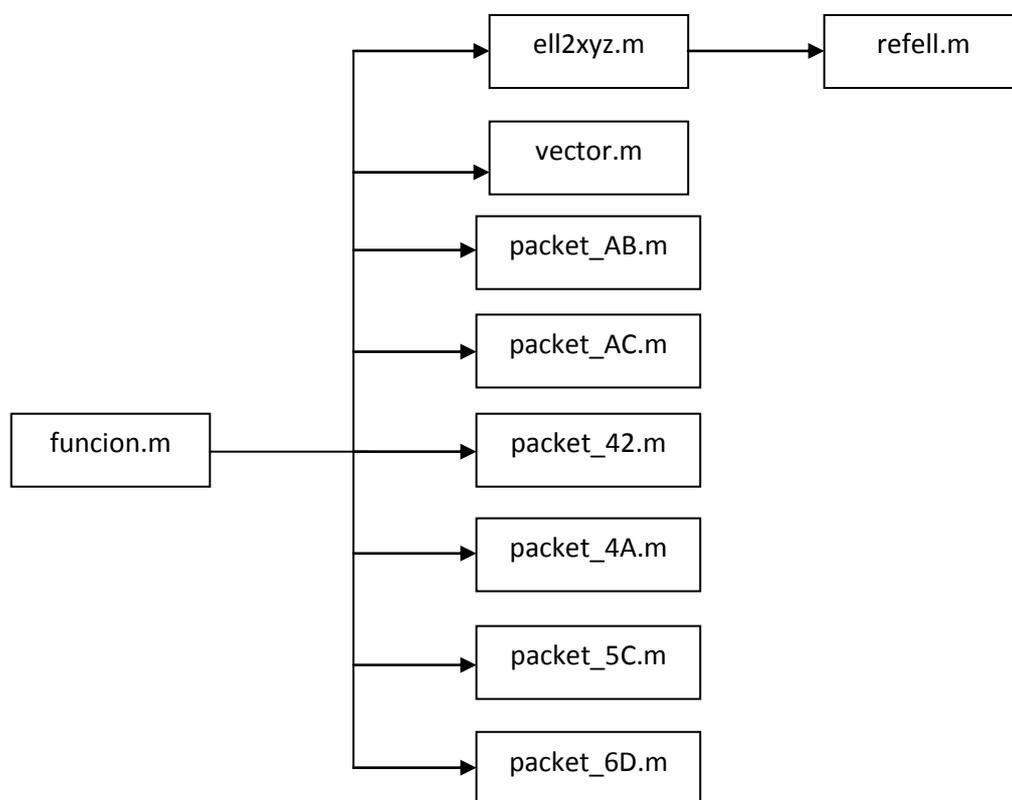


Figura 4.2: Conexión de los archivos .m del sistema

2.1. Configuración del puerto serie

Lo primero que se debe hacer es configurar el puerto serie. De él recibiremos todos los datos necesarios para crear nuestra interfaz, y también enviaremos datos al receptor para conseguir la mayor información posible. Se puede crear un puerto serie con la función “*serial*” de Matlab. Solo se requiere el nombre del puerto serie conectado al equipo como argumento de entrada.

Además de saber en qué puerto serie se está conectado, se debe especificar los parámetros de comunicación con el dispositivo GPS: la velocidad de transmisión (Baud Rate), la paridad, los bits de datos y los bits de parada. Los valores están especificados en el receptor y se asignarán con el comando de Matlab “set”. Deben coincidir en ambos sino sería imposible la correcta comunicación entre el puerto serie y el receptor.

```
> a=serial('COM4');  
> set(a, 'BaudRate',9600);  
> set(a, 'Parity','none');  
> set(a, 'DataBits',8);  
> set(a, 'StopBit',1);
```

2.2. Envío y recepción de paquetes

Una vez abierto el puerto serie con el comando “fopen”, el usuario ya estará listo para enviar y recibir datos al receptor. Los comandos de Matlab son, respectivamente, “fread” y “fwrite”. Antes de que se ejecute el bucle se enviarán al receptor datos para recibir la información que es necesaria. Los datos se enviarán en decimal con el siguiente formato que especifica el protocolo estándar de Trimble:

<DLE> <id> <datos> <DLE> <ETX>

Dónde:

- <DLE> en decimal es 16 (0x10)
- <id> es el identificador del paquete
- <ETX> en decimal es 3 (0x03)

Los paquetes que se enviarán continuamente en el bucle antes de recibir los datos del receptor serán:

- ✓ 0x24: Request GPS Satellite Selection
- ✓ 0x3C: Request Satellite Tracking Status

Como vimos en el Capítulo 3, al transmitir estos paquetes obtendremos más información. Una vez el receptor recibe el paquete de petición 0x24, recibiremos automáticamente el paquete de respuesta 0x6D “Satellite Selection List”, que contiene

datos de los errores en medidas y el número de satélites usados en la medida, datos que resultan de interés para la realización de la interfaz de usuario. Así mismo, con el envío del paquete 0x3C “Request Satellite Tracking Status” recibiremos tantos paquetes con identificador 0x5C como satélites rastreados haya en ese instante.

La parte de código correspondiente a las peticiones sería la siguiente:

```
> v1=[16;60;0;16;3]   Vector en decimal que hace referencia al envío del paquete 0x3C
> v2=[16;36;16;3]    Vector en decimal que hace referencia al envío del paquete 0x24
> fwrite(a,v1)        Envío datos en el receptor
> fwrite(a,v2)
```

2.3. Conversión de datos

Los datos recibidos están en formato decimal y se guardan en un vector. Se convierten en hexadecimal para que sea más fácil procesarlos. Una vez se cambien de formato, el vector se divide en subvectores con la estructura de paquete que especifica el protocolo de Trimble comentada anteriormente. Así mismo estos subvectores se procesarán en su función correspondiente que se determinará mediante su *<id>* (*identificador del paquete*).

Así es como se reciben los datos y se cambian de formato:

```
> b=[fread(a)]        Lectura de datos (decimal)
> n=[n dec2hex(b(j),2)];  Conversión de los datos a hexadecimal
```

La siguiente instrucción separa el vector principal que se recibe del receptor en subvectores con el formato de paquete *<DLE> <id> <datos> <DLE> <ETX>* .

```
> eval(['y_' num2str(c) '=vector(n,flag1,flag2)'])
```

Donde,

- n: vector principal
- flag1: índice inicial
- flag2: índice final
- c: contador

- `vector(n,flag1,flag2)`: función que separa el vector en subvectores

2.4. Llamadas a funciones

A continuación se muestra un ejemplo de llamada a una función:

```
> packet_AC(eval(['y_' num2str(h)]));
```

En el ejemplo mostrado todos los paquetes que contengan el formato <DLE> 0x8FAC <data> <DLE> <EXT>, con el identificador de paquete 0x8FAC, serán procesados en esta función (*packet_AC.m*) que tendrá como argumento de entrada cada subvector creado anteriormente (*y_1*, *y_2*, *y_3*...). Las funciones son similares. Lo primero que se hace es comprobar el <id>, y si este es correcto hacen las operaciones que le correspondan dependiendo del paquete.

Para poder entenderlo se muestra una parte del código correspondiente a la llamada a la función `packet_AC`, numerado para que pueda ser explicado en detalle:

```

1. function []=packet_AC(v)
2. global lat;
3. global long;
4. global alt;

p=3.1415926535898;
5. if length(v)==138
6. flag='8FAC';
7. v1=v(1:4);
8. t=strcmp(flag,v1);
9. if t==1
10. prog=hex2dec(v(9:10)); %Self-Survey Progress 0-100%
11. lat=((hex2num(v(75:90)))*360)/(2*p);
12. long=((hex2num(v(91:106)))*360)/(2*p);
13. alt=hex2num(v(107:122));
end
14. handles.lat=lat;
15. handles.long=long;
16. handles.alt=alt;
17. handles.prog=prog;

end
end

```

1. Cabecera de la función. No tiene salida [] y su entrada son los subvectores uno a uno.
2. 3. 4. Se crean variables globales para que puedan ser utilizadas en el programa principal.
5. Se comprueba la longitud del vector para desechar vectores que puedan contener errores.
6. Se crea una variable que contiene el identificador del paquete <id>
7. En otra variable se guarda el <id> del vector recibido.
8. Mediante el comando de Matlab *strcmp* se comparan los strings guardados en las variables *flag* y *v1*.
9. Si el resultado al ejecutar el comando *strcmp* es positivo (t=1) es que el vector debe ser procesado en esta función, por lo que continua.
10. 11. 12. 13. Se realizan las operaciones correspondientes a lo marcado por el protocolo de Trimble que determina los bytes y el tipo de información que contiene cada paquete. En este caso se consigue la siguiente información: progreso, latitud, longitud y altura.
14. 15. 16. 17 Finalmente, los datos deben ser guardados en las variables globales con el comando *handles* para que puedan estar disponibles en el programa principal.

El formato de todas las funciones es similar: primero se comprueba si la longitud del vector coincide con la teórica. Si esta coincide se comprueba el <id> y si es el correcto se procesan los datos y se guardan en variables globales. A la hora de seleccionar los bytes de información se tiene en cuenta el tipo de dato, ya que como se especifica en el protocolo de Trimble TSIP existen varios.

Por ejemplo, para leer un dato de tipo “Single”, que como vimos en la capítulo 3, es Single-precision float (4 bytes), es necesario hacer lo siguiente:

```
> x=typecast(uint32(hex2dec(v(3:10))), 'single');
```

Para leer un dato de tipo “Double” basta con:

```
> lat=(hex2num(v(75:90))*360)/(2*p);
```

2.5. PlotSky: representación polar

Como se muestra en el Capítulo 3, los paquetes 0x5C y 0x6D dan información acerca de los satélites rastreados y los que son utilizados en las medidas. Para poder ver de manera más visual la localización de los satélites se realiza un plot del cielo con la situación de los satélites rastreados en este. Para ello se utiliza una función interna de Matlab denominada “*plotsky*”, que básicamente realiza una representación polar.

La función “*plotsky(az,el,sv)*” tiene como argumentos de entrada el azimut, la elevación y el número del satélite. Estos valores los recibimos en el paquete 5C, y se guardan en un archivo de texto temporal en la función *packet_5C* para utilizarlo desde la función principal.

```
% Dibujo del Sky Plot
con los satélites
utilizados para la
medida
>load plot.txt
>az=plot(:,1);
>el=plot(:,2);
>sv=plot(:,3);
>plotsky(az,el,sv);

>delete plot.txt
```

3. Implementación de la Interfaz Gráfica de Usuario

Este capítulo muestra detalladamente las distintas partes que contiene la Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) creada y las consideraciones que se han tomado a la hora de diseñarla.

La mayor ventaja del uso de una GUI es que muestra los resultados de una forma visual y resulta más amena e intuitiva para el usuario que la simple impresión de resultados en la ventana de Matlab. Además, permite al usuario interactuar con el programa como veremos a continuación.

En la figura 4.3, se observa cómo la pantalla de la interfaz gráfica de usuario de Matlab creada.

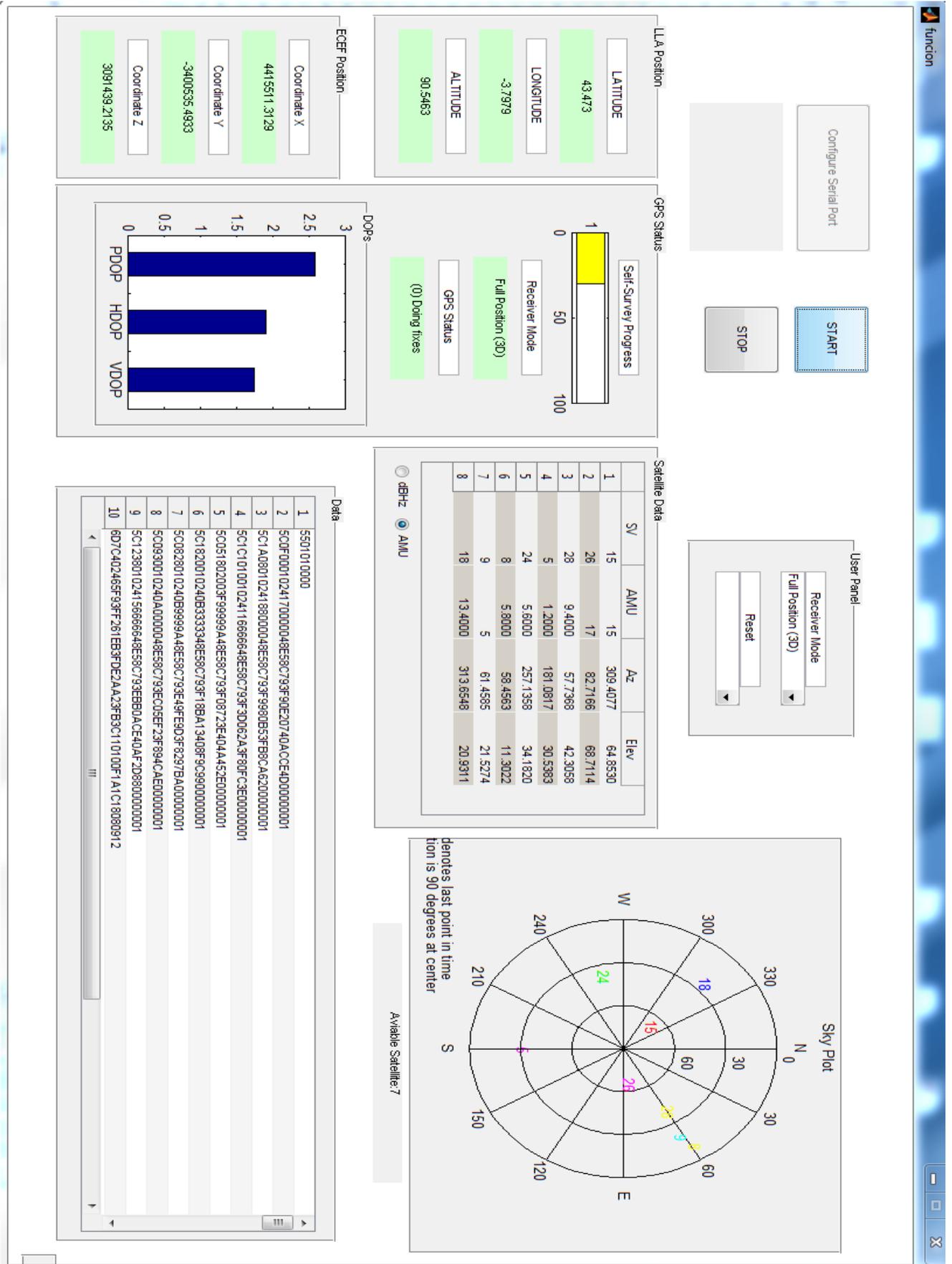


Figura 4.3: Pantalla principal GUI

3.1. Comenzar

Al abrir el archivo .m correspondiente a la GUI creada se observa en pantalla la figura de la interfaz completa. Para poder comenzar deberemos fijarnos en el único botón disponible para poder ser pulsado.

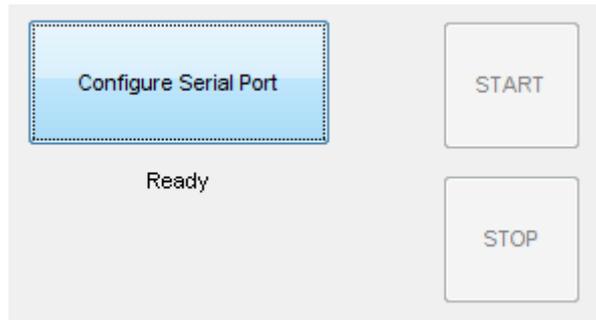


Figura 4.4: Panel de comienzo GUI

Como se observa en la figura 4.4, el usuario solo podrá seleccionar el botón "Configure Serial Port" ya que los botones de "START" y "STOP" están inactivos al inicio. Cuando el botón sea pulsado aparece un mensaje: "Ready".

Al pulsar el botón se crea el puerto serie como vimos en el Capítulo 4 y se espera unos minutos antes de enviar y recibir paquetes para que el receptor se caliente y no haya errores. Aparece el siguiente mensaje para que el usuario este informado: "Warming up... Wait please". Una vez pasen unos minutos el botón de "START" se volverá activo y podrá ser pulsado.



Figura 4.5: Panel una vez configurado el puerto serie

Al pulsar el botón "START" se empiezan a recibir y enviar datos por el puerto serie configurado y empezará a mostrarse información por pantalla. Si el usuario lo

desea puede pulsar el botón “STOP” en cualquier instante. Cuando sea pulsado, el programa terminará de procesar los datos que ya tenga almacenados. Una vez que acabe, el botón “STOP” se volverá inactivo, y el de “START” activo, y se podrá continuar pulsando de nuevo este último.

3.2. Posición

La información más importante para el usuario es conocer la posición en la que se encuentra. Normalmente el usuario está más familiarizado con las coordenadas Latitud, Longitud y Altitud. La altitud mostrada está en metros y los parámetros de latitud y longitud en radianes.

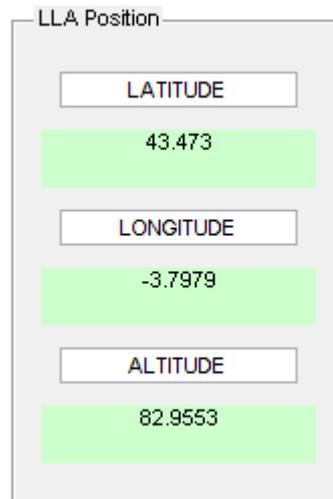


Figura 4.6: Panel de posición LLA

También se muestra la posición en coordenadas ECEF. La conversión se realiza mediante una función llamada “*ell2xyz.m*” y la función “*refell.m*” que le pasa los parámetros del elipsoide WGS-84 (Capítulo 2, Sección 2), por lo que cada vez que se recibe información de la posición, esta inmediatamente se convierte a coordenadas X, Y, Z.



Figura 4.7: Panel de posición ECEF

3.3. Panel: GPS Status

Este panel contiene varia información. Por una parte muestra el progreso. Cuando esta barra esta amarilla las medidas que se muestran de la posición pueden no ser correctas. Cuando llega a 100 y se muestra verde ya se puede considerar correcta la información.

La parte *"Receiver Mode"* muestra el tipo de configuración del receptor GPS, que como se verá más tarde puede ser modificada por el usuario. En *"GPS Status"* se irán mostrando los distintos estados por los que pasa el receptor GPS. Al comenzar el programa es muy posible que muestre *"Only 1 SV"* o *"Only 2 SV"* (solo un satélite, o solo dos satélites) ya que está calentando y aun no recibe todas las señales de los satélites. Son necesarios cuatro satélites para computar una medida de la posición. Cuando la medida no es exacta debido a errores en los datos de la efemérides se verá en pantalla *"PDOP too High"* y los valores en el panel de DOPs serán altos (mayores que cinco).

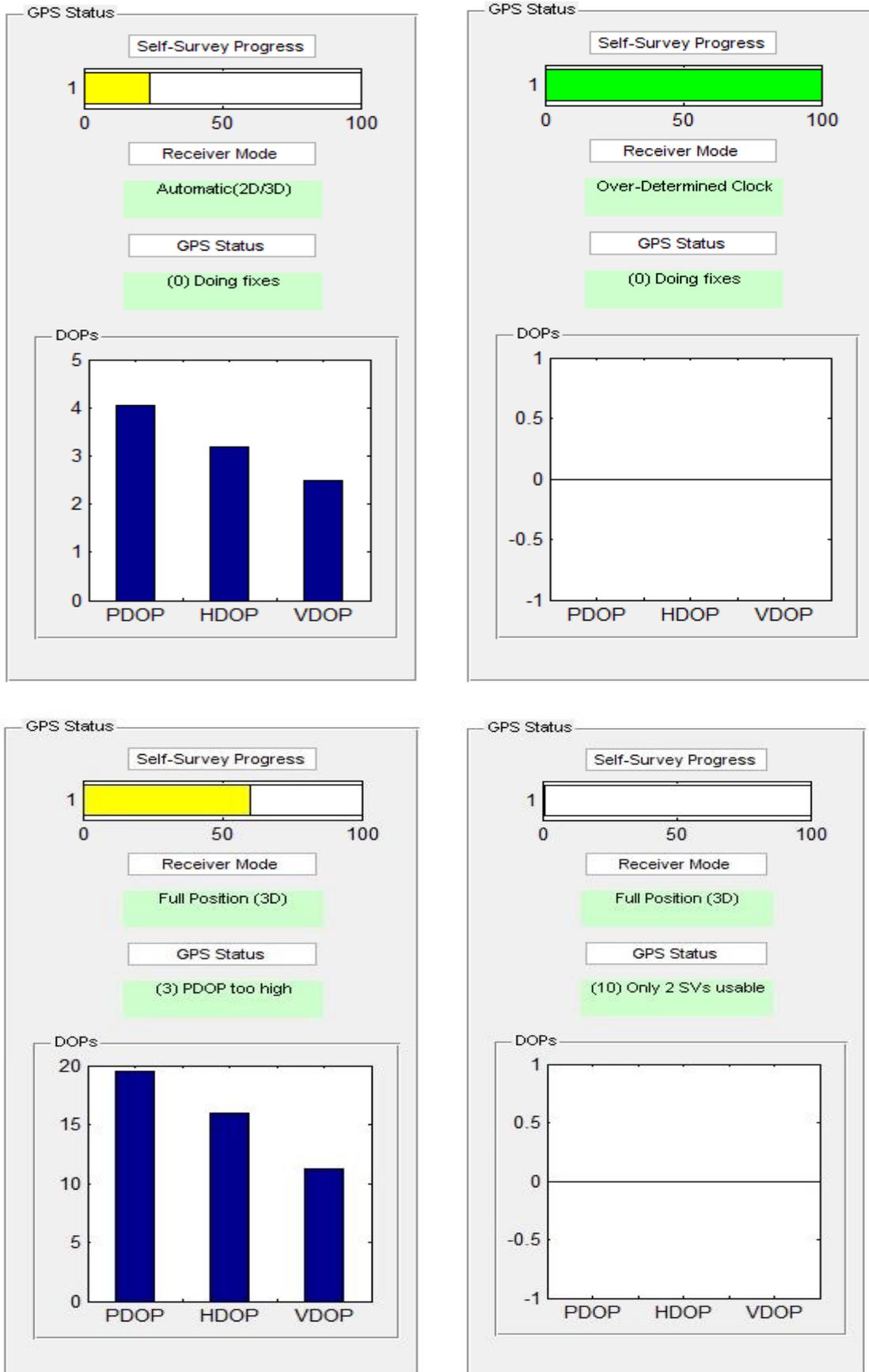


Figura 4.8: Panel de estado, modo y dops del receptor

3.4. Información de los Satélites

La siguiente tabla se observa toda la información referente a los satélites de los que la antena recibe señal.

| | SV | AMU | Az | Elev |
|---|----|---------|----------|---------|
| 1 | 26 | 12.6000 | 1.7564 | 75.0780 |
| 2 | 8 | 7.6000 | 50.1818 | 31.7927 |
| 3 | 9 | 14.8000 | 51.9957 | 41.0822 |
| 4 | 15 | 11.2000 | 299.5040 | 44.5378 |
| 5 | 21 | 17.2000 | 304.1094 | 11.9039 |
| 6 | 24 | 1.6000 | 242.2799 | 17.1988 |

dBHz AMU

Figura 4.9: Información de los satélites rastreados

La primera columna muestra el número de satélite (SV, Space Vehicles). De cada satélite vemos su relación señal a ruido, su azimut y su elevación. El usuario puede elegir en que unidades quiere ver la relación señal a ruido, que por defecto se mostrará en AMU (Amplitude Measurements Unit), específico de Trimble.

La relación entre los dos es la siguiente:

$$C/N_o(dBHz) = 20 \log(AMU) + 27 \tag{4.1}$$

Para que cierto satélite se utilice en la medida debe llegar su señal con una relación señal a ruido buena, sino puede que el satélite sea rastreado pero su señal sea tan débil que no se use para la medida.

Satellite Data

| | SV | dBHz | Az | Elev |
|---|----|---------|----------|---------|
| 1 | 5 | 34.1000 | 186.3623 | 52.1510 |
| 2 | 26 | 47.5000 | 9.4955 | 75.5545 |
| 3 | 8 | 43.9000 | 50.6595 | 30.1513 |
| 4 | 9 | 39.7000 | 52.6271 | 39.3304 |
| 5 | 28 | 44.1000 | 83.8408 | 48.7204 |
| 6 | 15 | 45.4000 | 300.4586 | 46.1537 |
| 7 | 21 | 42.2000 | 302.5317 | 11.8014 |
| 8 | 24 | 25.3000 | 243.3654 | 18.6522 |

dBHz AMU

Figura 4.10: Relación señal a ruido en dBHz

3.5. SkyPlot

Para que el usuario entienda mejor estos datos se realiza el skyplot. Básicamente es una representación polar de la situación de los satélites en el espacio. Matlab tiene una función que lo realiza, simplemente hay que pasarle como argumentos de entrada el número de satélite, el azimut y la elevación.

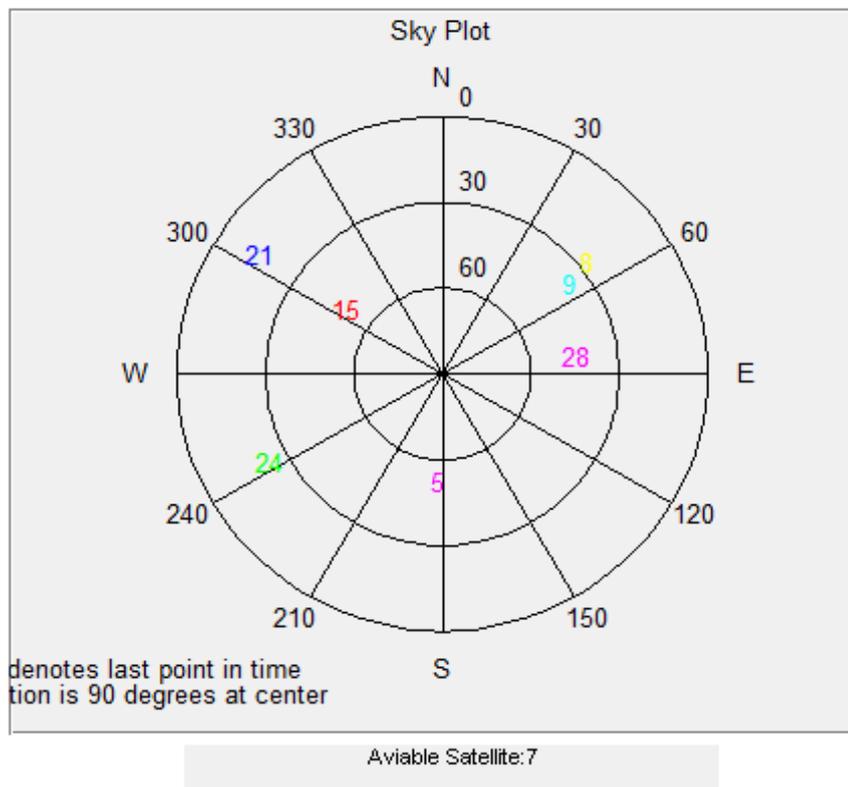


Figura 4.11: Sky Plot

Debajo del SkyPlot se observa “*Available Satellite:* “. Este dato se obtiene del paquete 0x6D. En la tabla superior se muestran todos los satélites rastreados, pero este valor determina la cantidad de satélites que realmente son utilizados para medir la posición.

3.6. Panel de usuario

Modo del receptor

Con este panel el usuario interactúa con la aplicación y el receptor GPS. Es posible seleccionar la configuración deseada del receptor. Como se muestra en la figura 4.12, hay tres opciones. Por defecto el sistema arranca con la opción “*Full Position 3D*”. Si el usuario selecciona otra de las opciones, el programa manda al receptor los bytes de datos necesarios para que se produzca el cambio. Esto tarda unos segundos. En el cuadro de “*GPS Status*” el usuario observa cuando el cambio ha sido efectivo.

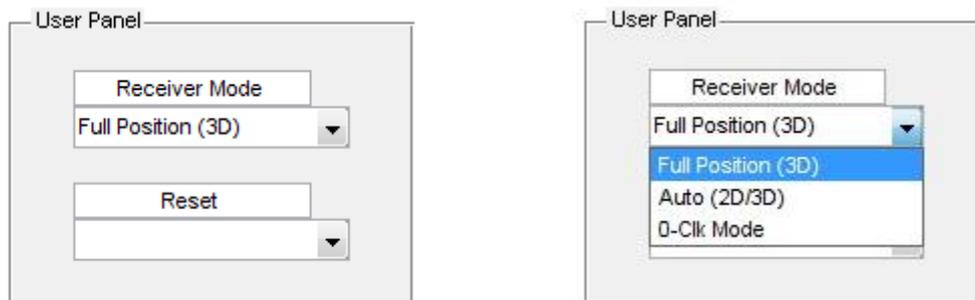


Figura 4.12: Panel de Usuario-Modo del receptor

Reset

El usuario también puede decidir realizar un reset del sistema en cualquier instante. Para ello hay dos opciones, que como se explicaron en la Sección son diferentes. Al igual que el cambio de modo del receptor GPS, el reset tarda unos minutos. Primero el programa envía al receptor GPS el correspondiente paquete que efectúa el reset, “*Command packet 0x1E*”, con la opción deseada: *Cold Reset* o *Warm Reset*.

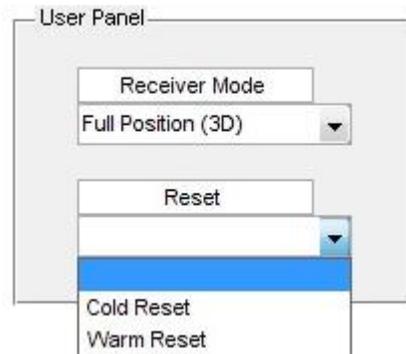


Figura 4.13: Panel de usuario-Reset

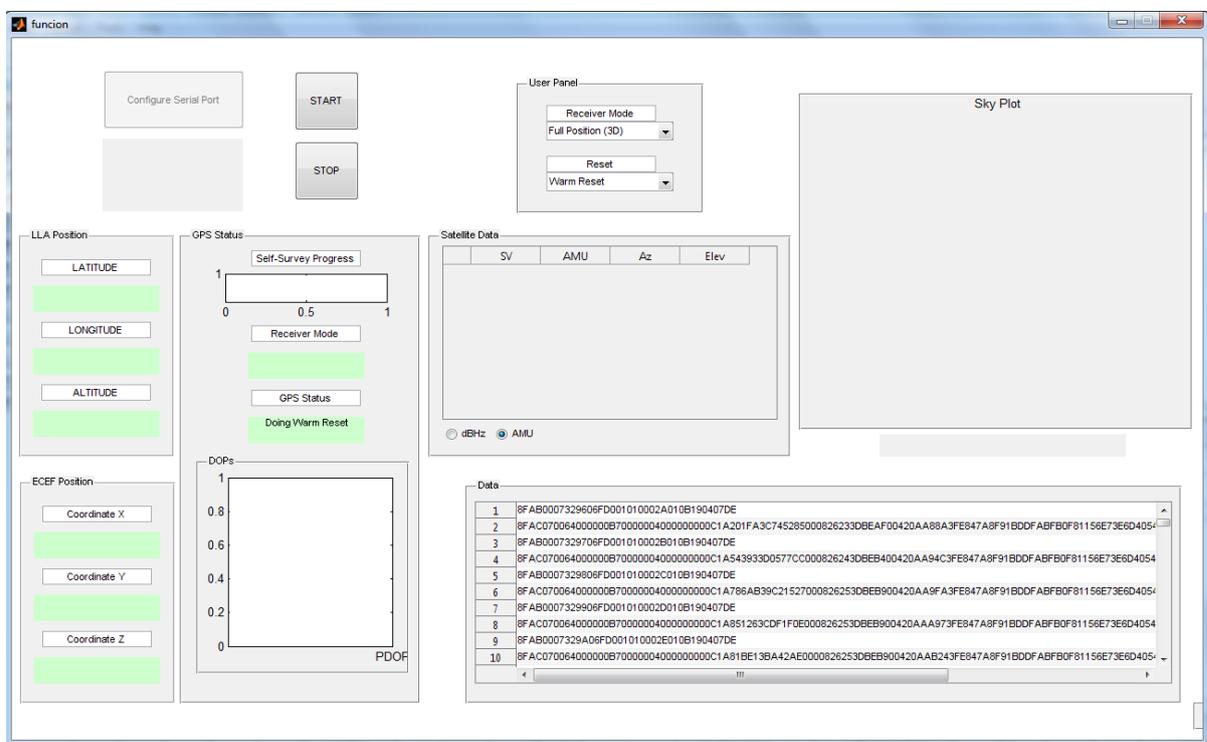


Figura 4.14: Estado de la interfaz al realizar un reset

3.7. Data Panel

En la parte inferior derecha de la GUI podemos observar un panel que se titula “Data”. En este panel el usuario es capaz de visualizar toda la información que recibe el receptor sin procesar, es decir, los bytes de información divididos en vectores.

Si nos fijamos en el capítulo 3 sobre el protocolo TSIP, vemos que el primer vector de la figura 4.15 corresponde a las opciones de configuración. Los 8 vectores siguientes son todos sobre información de los parámetros de los satélites rastreados (0x5C), y el último da información sobre los satélites usados en la medida, así como los errores (DOPs).

| Data | |
|------|--|
| 1 | 5501010000 |
| 2 | 5C0F0001024170000048E58C793F90E20740ACCE4D00000001 |
| 3 | 5C1A0801024188000048E58C793F9980B53FB8CA6200000001 |
| 4 | 5C1C101001024116666648E58C793F3D062A3F80FC3E00000001 |
| 5 | 5C051802003F99999A48E58C793F08723E404A452E00000001 |
| 6 | 5C1820010240B3333348E58C793F18BA13408F9C9900000001 |
| 7 | 5C0828010240B9999A48E58C793E49FE9D3F8297BA00000001 |
| 8 | 5C0930010240A0000048E58C793EC05EF23F894CAE00000001 |
| 9 | 5C123801024156666648E58C793EBB0ACE40AF2D8800000001 |
| 10 | 6D7C402465F93FF261EB3FDE2AA23FB3C110100F1A1C18080912 |

Figura 4.15: Panel de datos con los vectores recibidos

En la figura 4.16 en cambio vemos otro tipo de paquetes. Por un lado están los paquetes que se envían automáticamente cada segundo, “0x8FAB” y “0x8FAC”, y por otro lado los paquetes de posición “0x42” que se reciben cada vez que una nueva medida es computada.

| Data | |
|------|--|
| 37 | 8FAB000732780700001010000C010B10100507DE |
| 38 | 8FAC04003C00000000000004000000000C25A34D5BD46ABAA00082373DB13A004202BC1D3FE847A6D7CEA799BFB0F816FF8099DD4053C |
| 39 | 424A8D2B58C895F0814A853C2048E64F00 |
| 40 | 430000000000000000000000000000BC6E3D6048E64F00 |
| 41 | 8FAB000732790700001010000D010B10100507DE |
| 42 | 8FAC04003C00000000000004000000000C25B6674BD5C7B6B00082373DB13F004202BE833FE847A6E2117CCABFB0F8171AED4B374053C7 |
| 43 | 424A8D2B58C895F0814A853C2048E64F20 |
| 44 | 430000000000000000000000000000BC84329F48E64F20 |
| 45 | 8FAB0007327A0700001010000E010B10100507DE |
| 46 | 8FAC04003C00000000000004000000000C25DB193BD105C0F0001024156666648E652AE3FAC030D40ADE7BA00000001 |

Figura 4.16: Panel de datos con los vectores recibidos

En la última figura vemos los paquetes que se reciben cuando se realiza un cambio en el modo del receptor. En este caso se selecciona el modo “Automatic (2D/3D)” que como se vio en el Capítulo 3, se configura mandando en el primer byte posterior al byte del identificador (BB) el valor 0. Una vez que el receptor recibe el paquete con la nueva configuración envía el paquete que vemos en la figura 4.17.

Capítulo 5

Resumen y conclusiones

1. Resumen y conclusiones

El objetivo de este proyecto es mostrar la máxima información posible sobre GPS de una forma que resulte intuitiva, sencilla y orientada a fines académicos. Para ello, se ha programado una Interfaz Gráfica de Usuario con la herramienta Matlab con la que el usuario tiene la posibilidad de observar en una sola pantalla todos los parámetros de interés.

Con el fin expuesto anteriormente, se ha comenzado con una pequeña introducción donde se han descrito los principales aspectos teóricos necesarios para comprender como funciona un sistema GPS, citando los sistemas de coordenadas y modos de funcionamiento empleados, así como el modelo matemático cuyo principal objetivo es determinar la posición de un receptor sin olvidar los errores introducidos al sistema.

A continuación, se ha expuesto toda la información relativa al protocolo que utiliza el receptor Thunderbolt E de Trimble. Ha habido ciertos problemas para encontrar el protocolo al completo de este modelo en cuestión. Esto es debido a la utilización de un receptor antiguo, ya que los protocolos disponibles corresponden a sistemas más recientes.

Finalmente, se ha proporcionado una descripción detallada del sistema implementado, desde aspectos relacionados con la programación y estructura de la GUI, a información asociada al correcto uso de la aplicación y los diferentes campos que se pueden observar en esta.

2. Líneas futuras

Debido al objetivo claro que tiene el presente trabajo, sería de gran utilidad la realización de un guion de prácticas asociado al uso del software implementado.

Como la Universidad dispone de dos equipos completos, resultaría interesante el montaje de ambos en ubicaciones relativamente alejadas para la medición de las posiciones y distancia.

Otra posible línea de actuación sería implementar la interfaz con un lenguaje de programación de alto nivel con el fin de aplicar mejoras sustanciales tanto al diseño como a los cálculos. Así mismo, se podría realizar una aplicación independiente para que no sea imprescindible la instalación de Matlab en un ordenador.

Bibliografía

- [1] “Understanding GPS: Principles and Applications”, Elliot D. Kaplan
- [2] NAVSTAR: “Global Positioning System, Standard Positioning Service, Signal Specification”
<http://www.navcen.uscg.gov/pubs/gps/sigspec/gpsps1.pdf>
- [3] Trimble: <http://www.trimble.com/timing/thunderbolt-e.aspx>
http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-601842/ThunderboltE_UG_1D.pdf
- [4] Mathworks, Serial Port Device:
<http://www.mathworks.es/es/help/matlab/serial-port-devices.html>
- [5] Mathworks, Creating Graphical User Interfaces:
http://www.mathworks.com/help/pdf_doc/matlab/buildgui.pdf
- [6] Datum Transformations of GPS Positions:
[http://www.nalresearch.com/files/Standard%20Modems/A3LA-XG/A3LA-XG%20SW%20Version%201.0.0/GPS%20Technical%20Documents/GPS.G1-X-00006%20\(Datum%20Transformations\).pdf](http://www.nalresearch.com/files/Standard%20Modems/A3LA-XG/A3LA-XG%20SW%20Version%201.0.0/GPS%20Technical%20Documents/GPS.G1-X-00006%20(Datum%20Transformations).pdf)
- [7] Official U.S. Government information about the Global Positioning System (GPS) and related topics: <http://www.gps.gov/>
- [8] “Introduction to GPS: the Global Positioning System”, Ahmed El-Rabbany
- [9] Apuntes Universidad Politécnica de Madrid, “Sistemas de Navegación por Satélite”, Félix Pérez Martínez

Acrónimos

AMU: Amplitude Measurements Unit

BPSK: Biphase Shift Key

C/A code: Coarse / Acquisition code

P code: Precision Code

DOP: Dilution of Position

ECEF: Earth-Centered, Earth-Fixed

GDOP: Geometric Dilution of Precision

GPS: Global Positioning System

GUI: Graphic User Interface

HDOP: Horizontal Dilution of Precision

MSB: Most Significant Bit

NAVSTAR: NAVigation Satellite Timing and Ranning

LLA: Latitude, longitude y altitude

PDOP: Positional Dilution of Precision

PRN: Pseudo Random Noise

SRCHP: Right Hand Circularly Polarized

SPS: Standard Positioning Service

SV: Space Vehicles

TANS: Trimble Advanced Navigation

TSIP: Trimble Standard Interface Protocol

UERE: User Equivalenty Range Error

UTC: Universal Time Coordinated

VDOP: Vertical Dilution of Precision

WGS84: World Geodetic Survey