

UNIVERSIDAD DON BOSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA



**TRABAJO DE GRADUACIÓN PARA OPTAR AL GRADO DE
INGENIERO EN ELECTRÓNICA**

**“SISTEMA DE LOCALIZACIÓN MÓVILES TERRESTRES UTILIZANDO LA
CONSTELACIÓN DE SATÉLITES NAVSTAR”**

PRESENTADO POR

**LANDOS VÁSQUEZ, MILTON GEOVANI
PINEDA BARAHONA, HERBER OMAR**

2003

EL SALVADOR, CENTROAMERICA

Introducción

Desde hace años ha existido la necesidad de métodos o mecanismos para la determinación de la posición de objetos o personas. El hombre a través de los recursos existentes, se las ha ingeniado para lograr este fin. Al principio se usaban las estrellas para lograr navegar de un punto origen a un punto destino; luego, las técnicas evolucionaron y se desarrollaron dispositivos capaces de lograr orientar al hombre, como por ejemplo la brújula. Posteriormente surgieron, los primeros radares que son las primeras aproximaciones de los dispositivos de posicionamiento y rastreo. Finalmente, se llega a las primeras técnicas como el GPS, desarrollado para el uso militar; luego, estos sistemas han sido transferidos para el uso civil, donde se han tenido muchas innovaciones y aplicaciones, inicialmente para la navegación y posicionamiento, y actualmente se les ha dado muchas aplicaciones nuevas, como los sistemas de guía vehicular, la telefonía móvil, y estas se siguen incrementando según el hombre encuentra una necesidad de resolver para hacer más cómoda la vida u optimizar un proceso.

Actualmente GPS es una de las técnicas de posicionamiento existente más confiable con buenos rangos de precisión. El principio de funcionamiento GPS se basa en la medida simultánea de la distancia entre un receptor y al menos tres satélites posicionados de forma tridimensional sobre el área de la tierra en el instante en que se toma una lectura de datos que en este caso corresponden a información de latitud, longitud y altitud.

El desarrollo del presente documento “Sistemas de Posicionamiento Global GPS-DGPS, con Orientación a Ingeniería” como tesis de graduación, proveerá información relacionada al funcionamiento general de los sistemas de posicionamiento global GPS y DGPS, en un enfoque comparativo de sus tecnologías, diferencias y tendencias futuras así como manejo de equipo para desarrollar aplicaciones específicas.

CAPITULO I

Conceptos básicos de navegación

1.1 Localización Geográfica de un Punto.

La localización geográfica de un punto se puede realizar detallando uno de los siguientes dos parámetros:

- Coordenadas geográficas en formato de Longitud-Latitud.
- Coordenadas (x,y) UTM - Universal Transversa Mercator.

Cada uno de estas dos formas de localizar un punto sobre la superficie terrestre debe de cumplir los siguientes requisitos:

- El punto a ubicar debe ser único.
- Identificación del sistema de proyección empleado para localizar el punto.
- Que permita referenciar la coordenada “z” del punto.

1.2 Coordenadas Geográficas.

Las coordenadas geográficas son una forma de designar un punto sobre la superficie terrestre con el siguiente formato:

Longitud = 89° 07' 1.2" W
Latitud = 13° 59' 8.3" N

Esta designación supone la creación de un sistema de referencia de tres dimensiones, como se muestra en la figura 1.1.

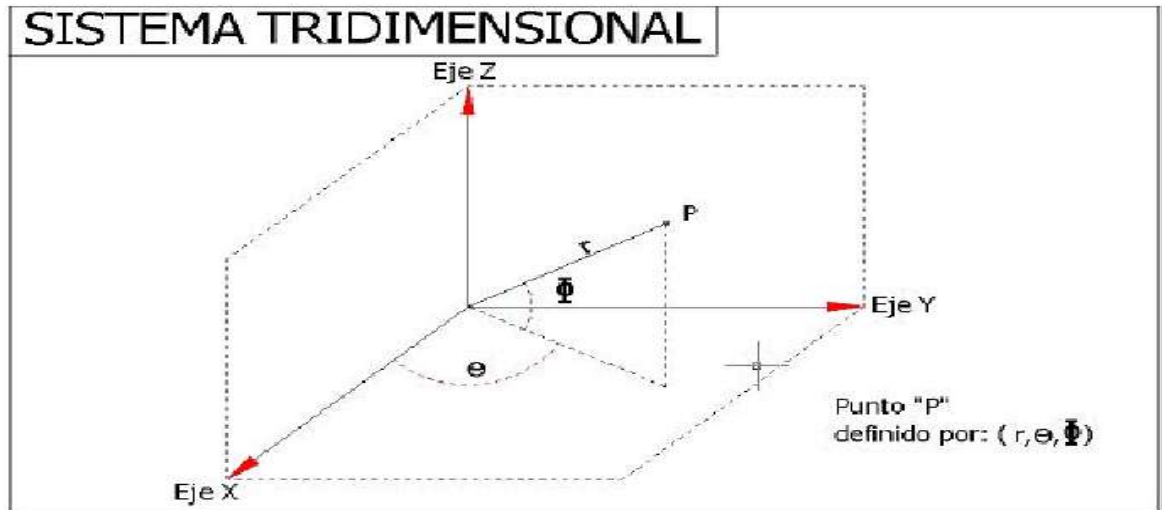
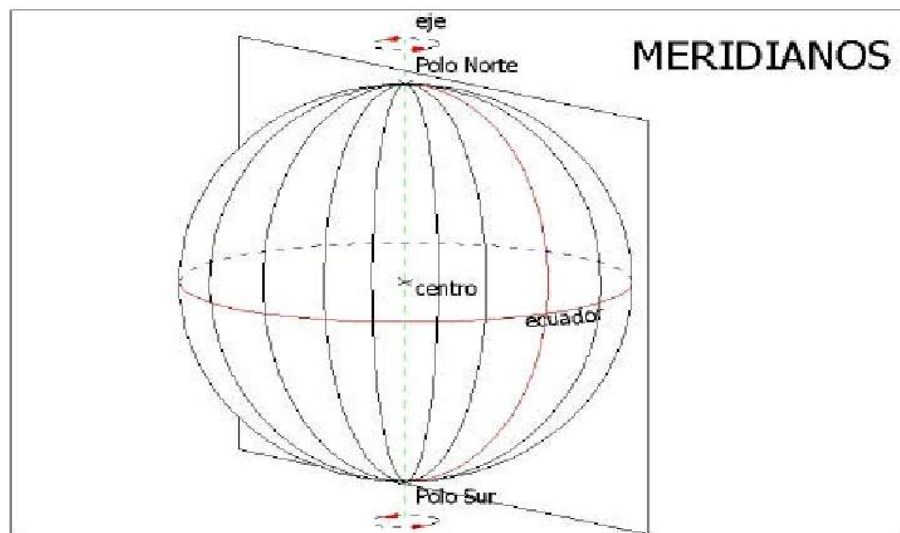


Figura 1.1 Sistema de Coordenada de tres dimensiones.

Se define el eje de la tierra como la recta ideal de giro del globo terráqueo en su giro del movimiento de rotación. Esta recta une los dos polos geográficos: *Polo Norte* y *Polo Sur*.

1.2.1 Meridianos.

Se definen los meridianos como las líneas de intersección con la superficie terrestre, de los infinitos planos que contiene el eje de la tierra.



El sistema toma como origen para designar la situación de una posición geográfica un determinado meridiano, denominado meridiano 0° , cuyo nombre toma el de una ciudad inglesa "Greenwich".

La existencia de este meridiano divide el globo terráqueo en dos zonas; las situadas al Oeste (W) del meridiano 0° , hasta el antemeridiano y las situadas al Este (E) del meridiano 0° hasta el antemeridiano:

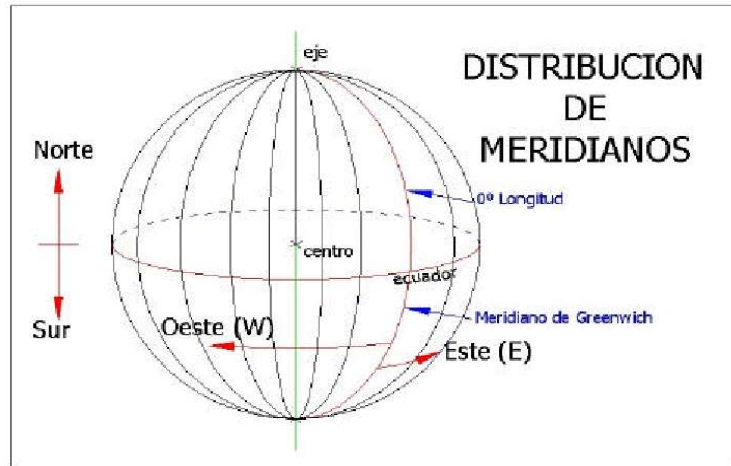


Figura 1.3 Distribución de los meridianos en el globo terrestre.

1.2.2 Paralelos.

Se definen los paralelos como las líneas de intersección de los infinitos planos perpendiculares al eje terrestre con la superficie de la tierra.

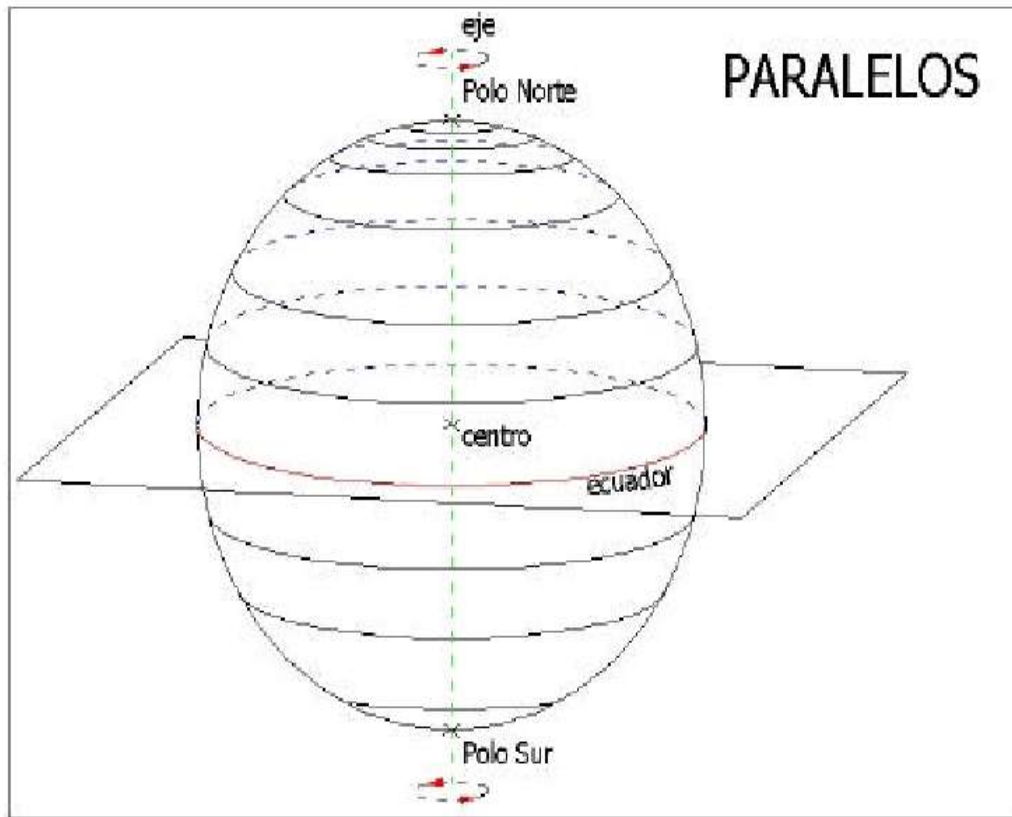


Figura 1.4 Distribución de los paralelos en globo terrestre.

Se definen sobre el globo terráqueo los paralelos, creándose el paralelo principal aquel que se encuentre a la máxima distancia del centro de la tierra. A esta paralelo de mayor radio se le denomina “*Ecuador*”, que divide el globo en dos casquetes o hemisferios; el hemisferio norte y el hemisferio sur. Paralelos geoméricamente a él, se trazan el resto de los paralelos, de menor radio, tanto en direcciones al polo Norte como al Polo Sur:

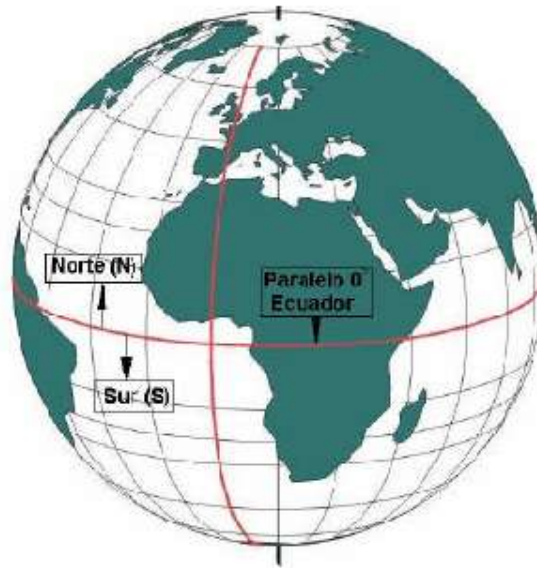


Figura 1.5 Ecuador o Paralelo Origen.

Este paralelo principal, o Ecuador, se toma como origen en el sistema de referencia creado, de modo que se designa la posición de un punto haciendo referencia a su ubicación respecto de estos dos hemisferios. Una vez que tenemos establecidos una red de meridianos y paralelos, la situación geográfica de un punto viene definido por su longitud y su latitud, con referencia a la red creada.

1.2.3 Longitud.

Se define la longitud (L) de un punto P como el valor del diedro formado por el plano meridiano que pasa por P y el meridiano origen, (0° Meridiano de Greenwich) ver figura 1.7. La Longitud es gráficamente el ángulo formado por OAB:

$$\lambda = \text{OAB}$$

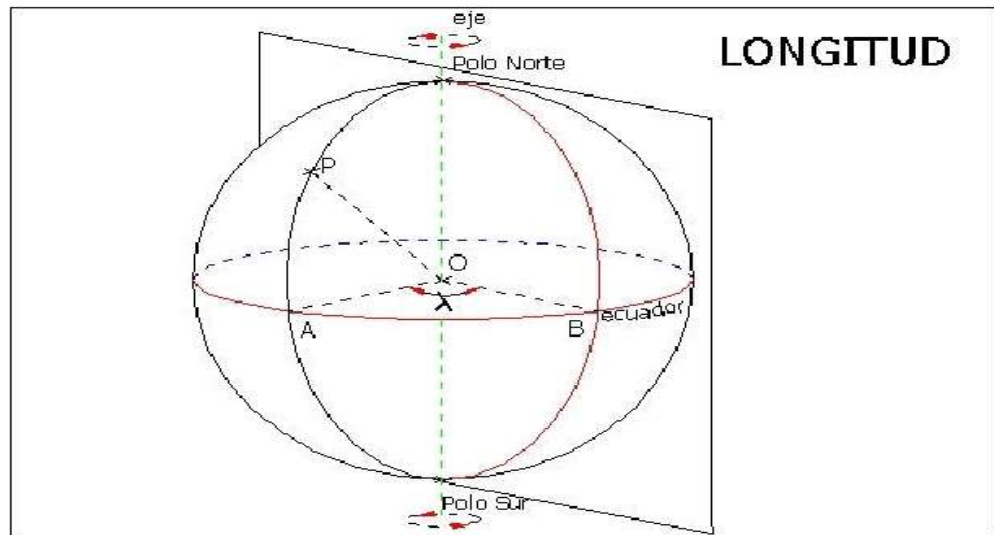


Figura 1.6 Esquema para la medición de la longitud de un punto.

La designación de la longitud lleva incluida la designación de la posición espacial del punto con respecto al meridiano origen o meridiano de Greenwich, así se designa posición Oeste (W) cuando está a la izquierda y este (E) cuando esta situada a la derecha. El valor de la longitud mínimo posible 0° hasta un máximo de 180° , 0° - 180° E, 0° - 180° W.

1.2.4 Latitud.

Se denomina Latitud geográfica (L) de un punto P al ángulo formado por la vertical a la tierra que pasa por dicho punto con el plano ecuador.

La vertical se considera la unión del punto con el origen o centro de la tierra, obteniendo la latitud midiendo al ángulo (w) sobre el meridiano que pasa por el punto P.

$$\omega = \text{OAP}$$

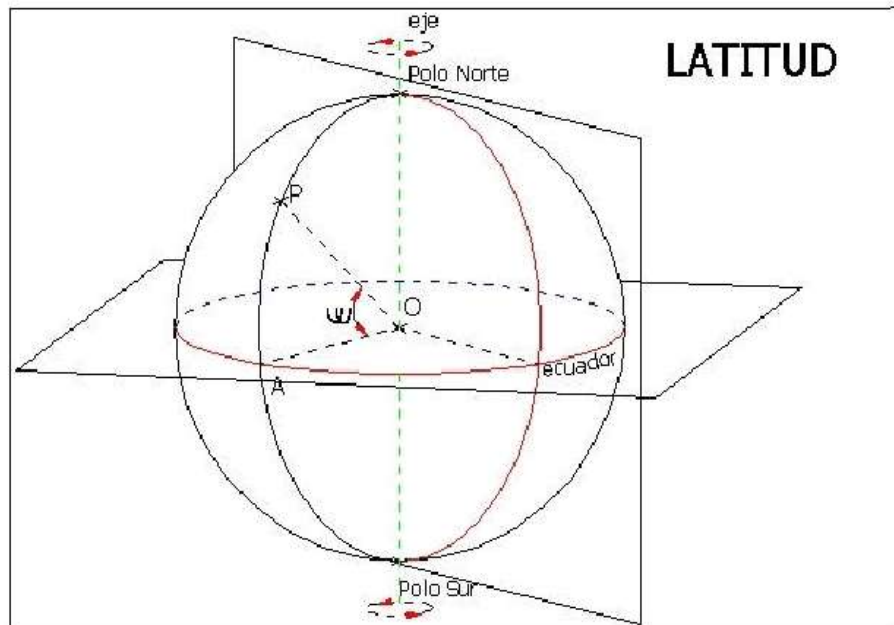


Figura 1.7 Medición de latitud de un punto.

El valor de la latitud máxima y mínima va desde los 0° hasta los 90° , $0^\circ - 90^\circ\text{N}$, $0^\circ - 90^\circ\text{S}$. Los 90° de latitud coinciden con los polos, polo Norte y polo Sur. Este sistema de designación tiene los siguientes orígenes para la Longitud y Latitud.

1.2.5.Designación De Coordenadas Geográficas Sobre La Cartografía 1:50,000

Como ejemplo de designación de coordenadas geográficas se designa un punto "R".

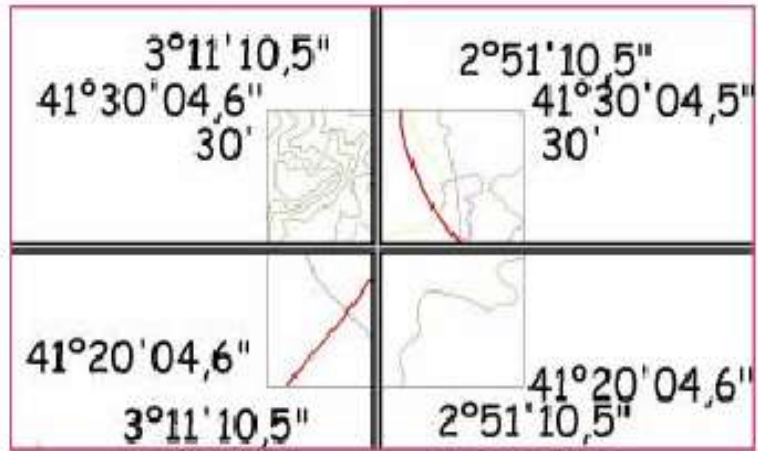


Figura 1.11 Coordenadas de referencia en mapas.

Las dos líneas exteriores en posición vertical marcan la dirección de los meridianos, así como las horizontales marcan la dirección de dos paralelos. Adicionalmente estas coordenadas exteriores existe una serie de subdivisiones interiores graduadas cada 5'.

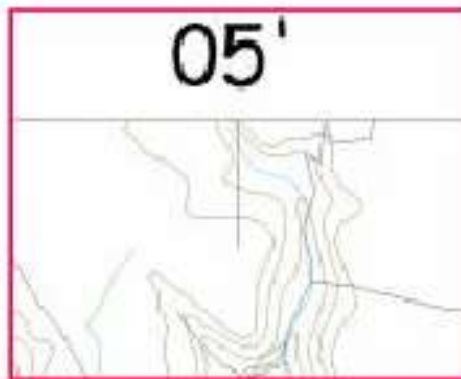


Figura 1.12 Subdivisiones de la graduación de los mapas.

Para designar la coordenada geográfica del punto “R”, unimos las graduaciones de igual longitud/latitud.

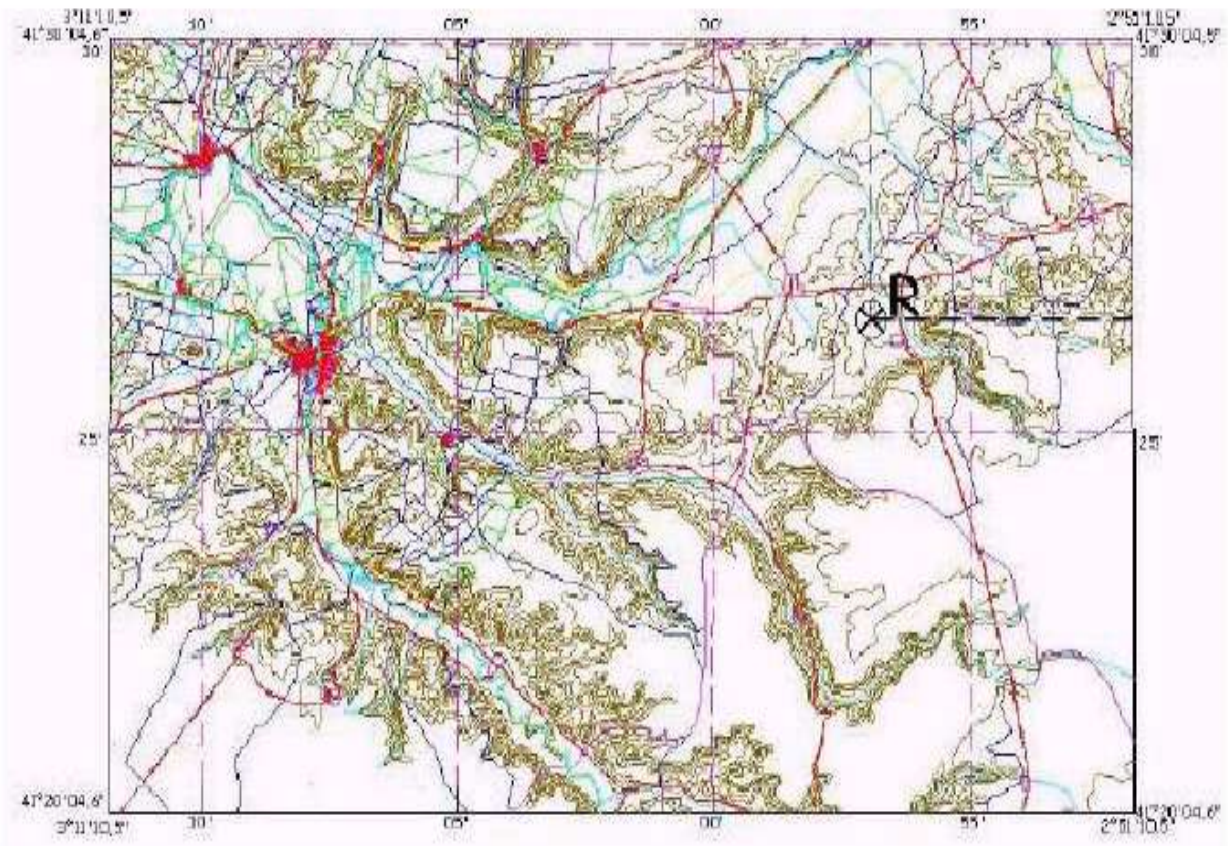


Figura 1.13 Terminación de las coordenadas sobre el mapa.

Se realiza la medición sobre el exterior de las distancias existentes entre cada dos subdivisiones y la existen desde una marca auxiliar hasta las líneas horizontales o verticales del punto a medir.

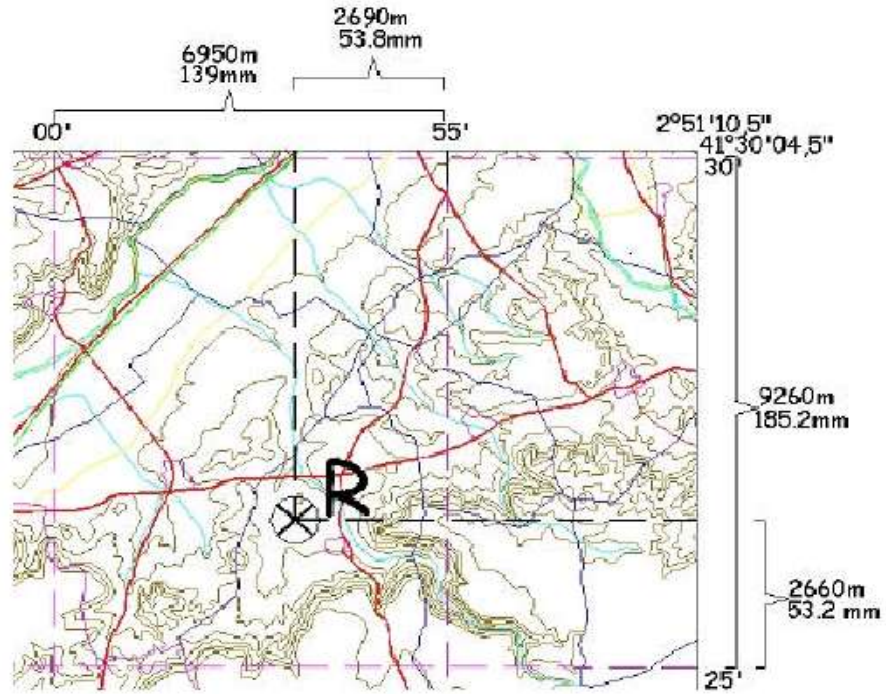


Figura 1.14 Determinación de latitud y longitud.

Calculando, en primer lugar, la diferencia de longitudes con una marca auxiliar.

$$5' \Rightarrow 5' \cdot 60'' / 1' \Rightarrow 300''$$

$$300'' \Rightarrow 6950 \text{ m}$$

$$x \Rightarrow 2690 \text{ m}$$

$$x = 2690 \cdot 300'' / 6950 \text{ m} = 116''$$

$$116'' \Rightarrow 0^\circ 1' 56''$$

Por lo que la longitud calculada es:

| | |
|---|-------------------|
| Longitud de la marca en el mapa | 02°55'00'' |
| <i>Diferencia hasta la marca en el mapa</i> | 00°01'56'' |
| <i>Longitud total calculada</i> | 02°56'56'' |

Calculamos ahora la diferencia de latitud:

$$5' \Rightarrow 5 \cdot 60 / 1' \Rightarrow 300''$$

$$\begin{array}{l} 300'' \Rightarrow 9260 \text{ m} \\ x \quad \Rightarrow 2660 \text{ m} \end{array}$$

$$x = 2660 \cdot 300'' / 9260 \text{ m} = 86''$$

$$86'' \Rightarrow 0^\circ 1' 26''$$

| | |
|--|-------------------|
| Longitud de la marca en el mapa | 41°25'00'' |
| <i>Diferencia hasta la marca en el mapa</i> | 00°01'26'' |
| <i>Longitud total calculada</i> | 41°26'26'' |

Las Coordenadas del Punto R son:



Figura 1.15 Terminación de la orientación de un punto.

41°26'26" Hemisferio Norte => 41°26'26"N

02°56'56" Oeste de 0° Greenwich => 02°56'56"W

1.3 EL DATUM

La tierra no es una esfera perfecta sino que está achatada por los polos y además en su superficie presenta varias irregularidades. El Datum es un modelo matemático que intenta representar la forma de la tierra, normalmente un elipsoide, en cada país o incluso región, y que permite calcular posiciones y áreas de una manera consistente y precisa.

Una vez definido un Datum ya podemos empezar a elaborar mapas de esa zona ya que disponemos de unos puntos de referencia. Las líneas de Longitud y Latitud en un mapa o carta de navegación están referenciadas siempre a un específico Datum, es decir, que cada mapa tiene un Datum de referencia, que debe estar descrito en él de manera visible (normalmente en algún margen). Para concluir podemos decir que para definir un determinado punto de un mapa utilizaremos siempre unas determinadas coordenadas (UTM, geográficas, etc.) referidas a un determinado Datum.

Si estamos comparando coordenadas de nuestro GPS con las de un mapa, deberemos seleccionar el datum interno de nuestro GPS con el mismo que sirvió para generar ese mapa. A igualdad de coordenadas, si tenemos datum distintos los puntos que nos marque nuestro GPS estarán desplazados con respecto a su verdadera posición en el mapa.

Si los mapas con los que estamos trabajando son Americanos, lógicamente el datum será Americano, normalmente el American 27. En El Salvador, por tanto, se utilizan normalmente North American 27 Central.

El sistema GPS utiliza o trabaja con el datum WGS84, aunque nuestros receptores convierten automáticamente en tiempo real estas coordenadas a las que nosotros tengamos definidas en nuestro receptor. Para poder definir el Datum, se define antes el geoide y el elipsoide.

1.3.1 El Geoide

Se define como al “Geoide” la superficie teórica de la tierra que une todos los puntos que tiene igual gravedad. La forma así creada supone la continuación por debajo de la superficie de los continentes, de la superficie de los océanos y mares suponiendo la ausencia de mareas, con la superficie de los océanos en calma y sin ninguna perturbación exterior. Como perturbaciones exteriores se encuentra la atracción de la luna, mareas y las interacciones de todo el sistema solar.

Lejos de lo que se podría imaginar, esta superficie no es uniforme, sino que presenta una serie de irregularidades, causadas por la distinta composición mineral del interior de la tierra y sus distintas densidades, lo que implica que para cada punto de la superficie terrestre exista una distancia distinta desde el centro de la tierra al punto del geoide.

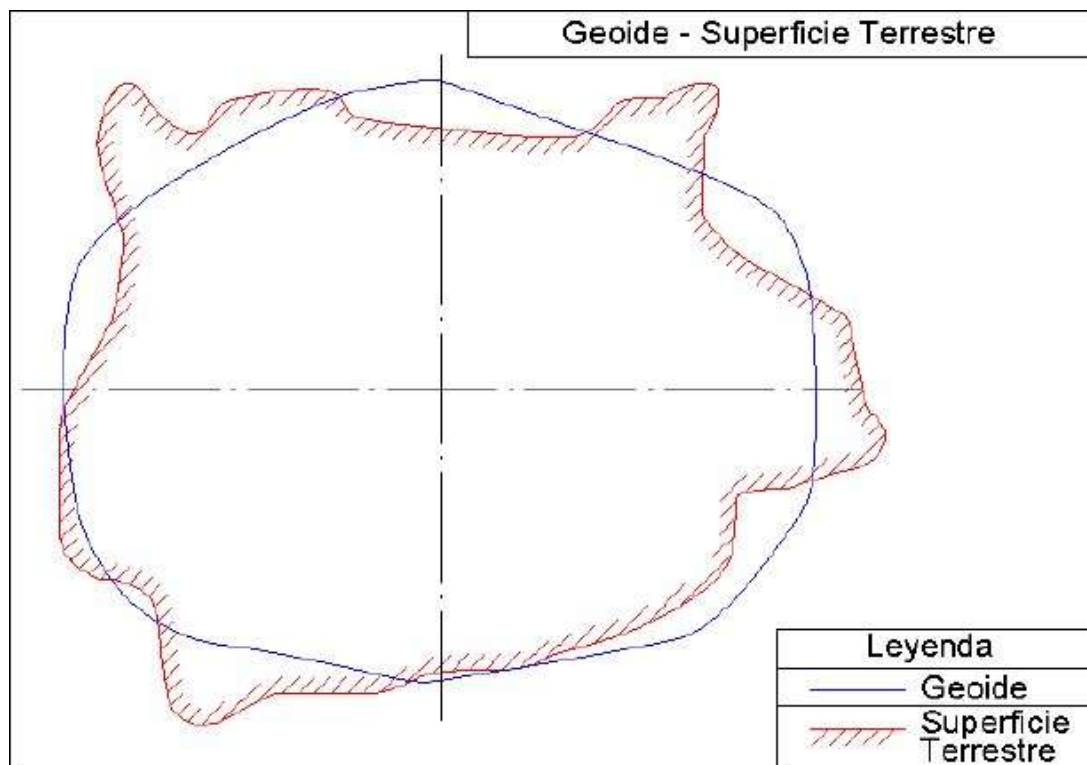


Figura 1.16 Geoide de la superficie terrestre.

1.3.2 El Elipsoide.

Como sabemos la tierra no es redonda, y su figura se asemeja a una naranja o una estera achatada por los polos”, y no existe figura geométrica alguna que la represente, debido fundamental mente a las irregularidades existentes.

Estas irregularidades de la tierra son detectadas y no extrapolables a todos los puntos, simétricos, de la tierra, ya que no existe un único modelo matemático que representa la superficie terrestre, para lo que cada continente, nación, etc. y de hecho emplean un modelo matemático de distinto, de forma que adapte mejor a la forma de la tierra se le denomina “*Elipsoide*”, Este Elipsoide es e resultado de revolucionar una elipse sobre su eje.

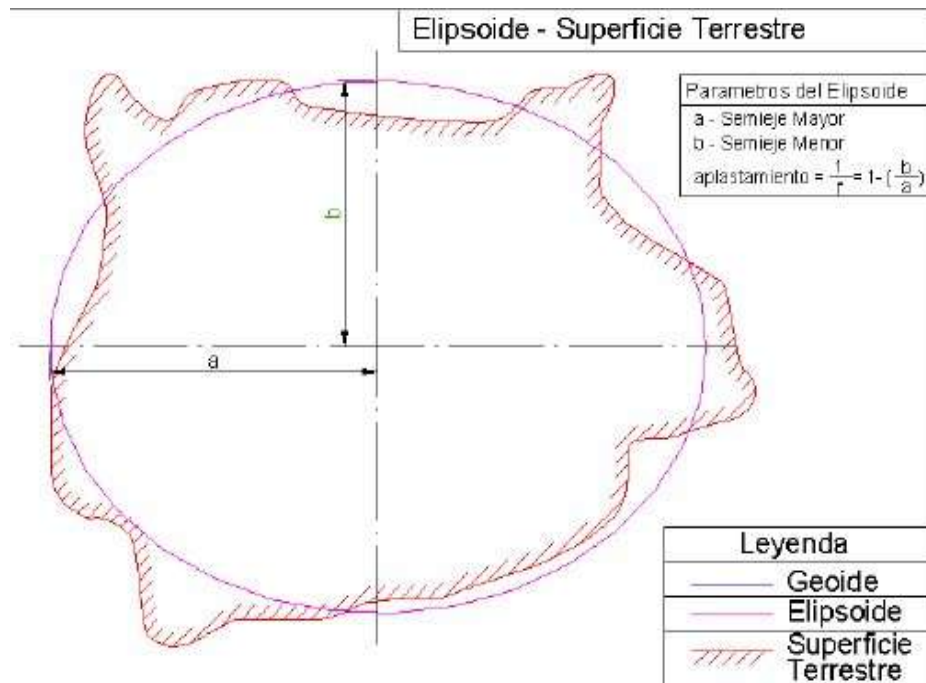


Figura 1.17 Elipsoide de la superficie terrestre.

Este elipsoide se define matemáticamente en función de los siguientes parámetros:

Radio mayor “a” y radio menor “b”.
Aplastamiento del elipsoide $1/f=1 - (b/a)$.

1.3.3. Esfericidad Terrestre.

La forma habitual en la que se ha descrito el planeta tierra es el de una “esfera achatada en los polos”. Y ciertamente esta forma se asemeja a la descripción si se toma una visión de conjunto.

El planeta tierra tiene un radio Ecuatorial (máximo) de aproximadamente 6378 Km, frente a un radio polar (mínimo) de 6357 Km, con una diferencia 21 Km, lo que supone un 0.329% del radio ecuatorial.

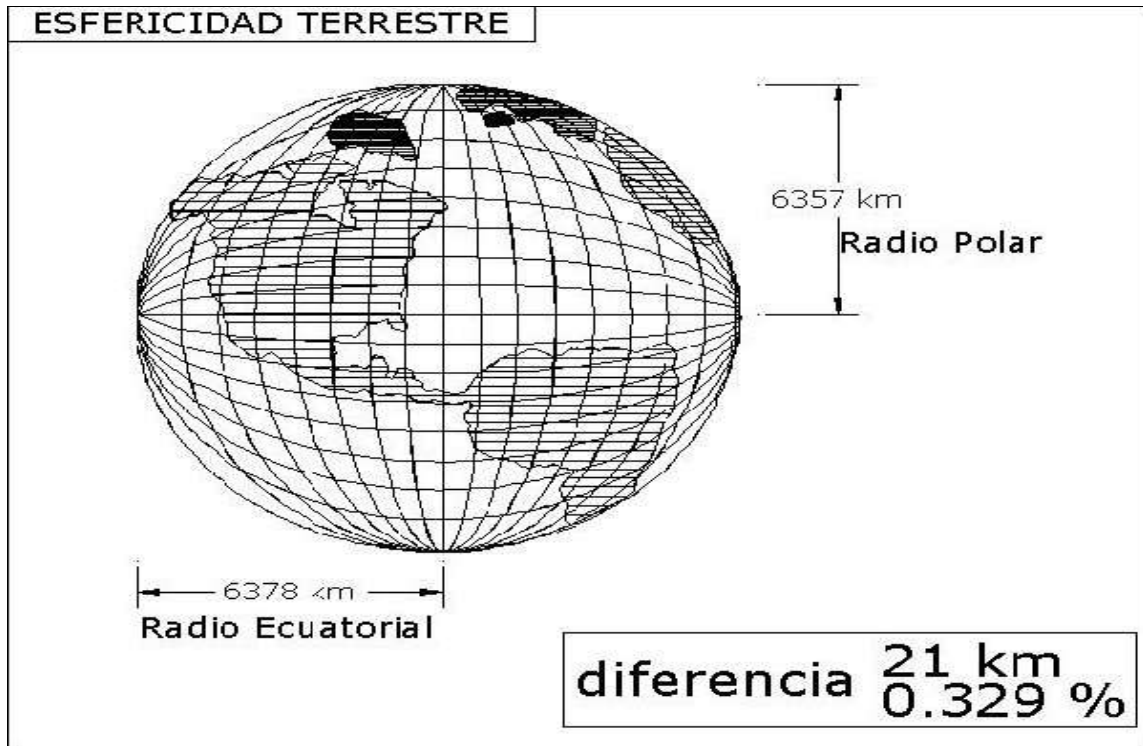


Figura 1.18 Esfericidad de la tierra.

En el cálculo del diámetro esta diferencia es de 42 Km, para la esfera terrestre, con una relación

de aplastamiento próxima a 1/300.

Si lo comparamos con una esfera de 10cm de diámetro, la esfera tendría un achatamiento de 0.32 mm, cantidad inapreciable y que no es detectado a simple vista.

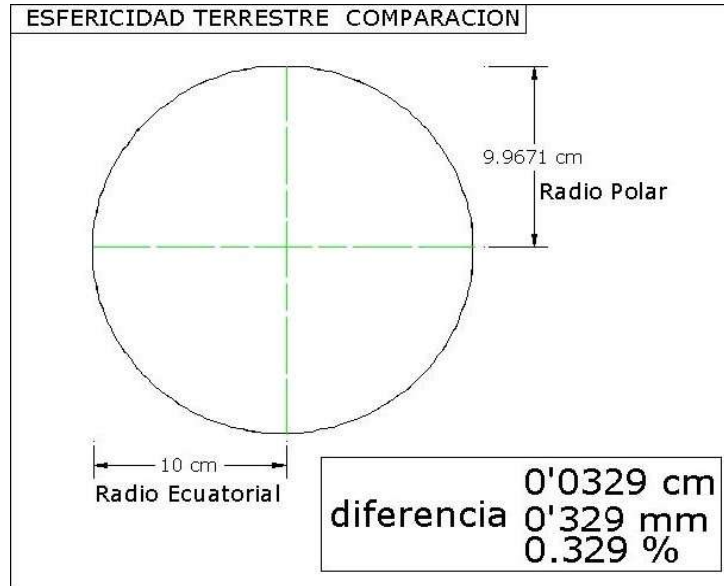


Figura 1.19 Comparación de la esfericidad terrestre.

1.3.4.Comparación de Elipsoide con Geoide.

La desigualdad de la gravedad superficial, causa que exista zonas de la tierra por encima de geoide y por debajo de este, como se muestra en la figura siguiente.

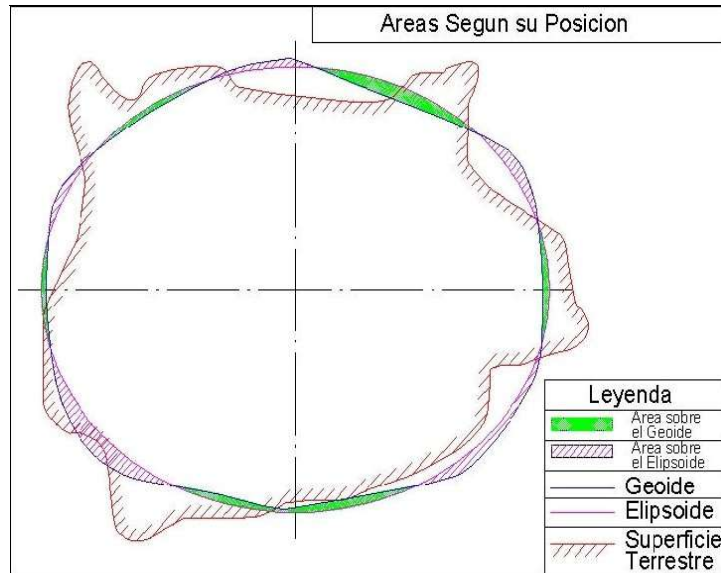


Figura 1.20 Comparación entre el geoide y elipsoide.

Esta diferencia gravitacional son causadas por la composición terrestre y la presencia de una gran masa de agua en os océanos, que causan una menor atracción, y hace que, por lo genera, el geoide quede por encima del elipsoide en a zona continental y por debajo de la zona oceánica.

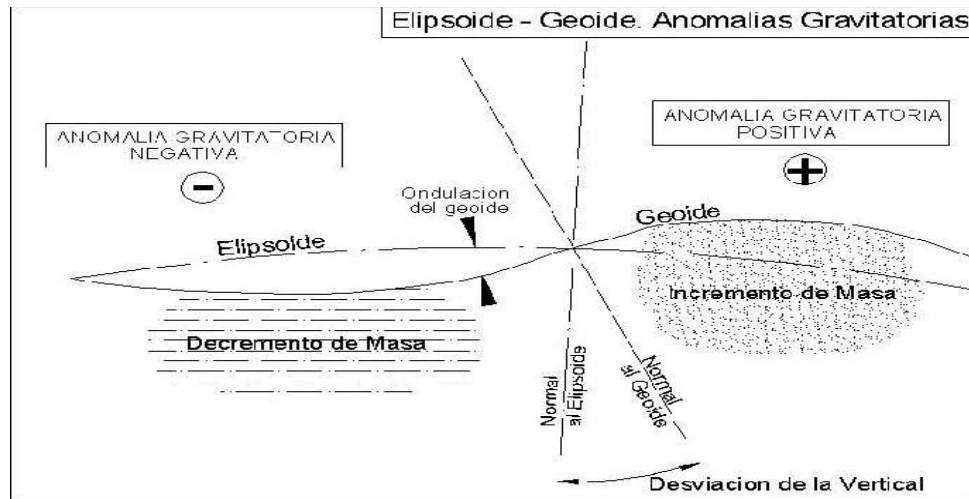


Figura 1.21 Diferencias entre geoide y elipsoide.

Esta discrepancia se encuentra evaluada para los distintos elipsoides en función de su localización geográfica. Esta diferencia entre el geoide y el elipsoide en raras ocasiones llega a superar los 100 metros. A continuación se da la comparación entre el geoide y el elipsoide WGS-84.

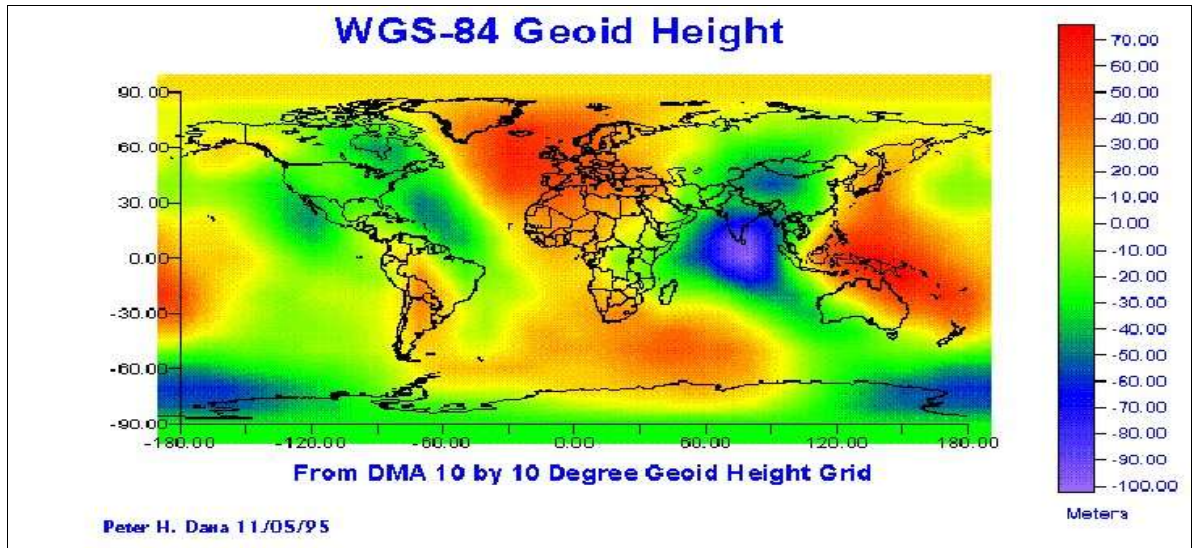


Figura 1.22 Diferencia entre el elipsoide WGS84 y el geoid.

1.4 Deficini3n del DATUM

Se define el datum como el punto tangencial al elipsoide y al geoid, donde ambos coinciden, llamado Fundamental, en el que las coordenadas astron3micas (las del elipsoide) y las geogr3ficas (las de la Tierra) coinciden. El Datum est3 representado f3sicamente por grupo de puntos fundamentales de referencia en la tierra cuyas posiciones han sido detalladamente medidas y calculadas para esa determinada zona. Los Datum est3n compuestos por:

1. Un elipsoide. Los diferentes elipsoides se diferencian entre si por el valor de sus par3metros (semieje mayor, semieje menor y por el aplastamiento).
2. Un punto llamado fundamental en el que el elipsoide y la tierra son tangentes. En este punto deben coincidir las coordenadas astron3micas del elipsoide y las geogr3ficas de la tierra, adem3s del azimuth1 de una direcci3n con origen en el punto "fundamental". Esta desviaci3n se denomina:

Eta : Desviaci3n Vertical.

Xi : Desviaci3n en el meridiano.

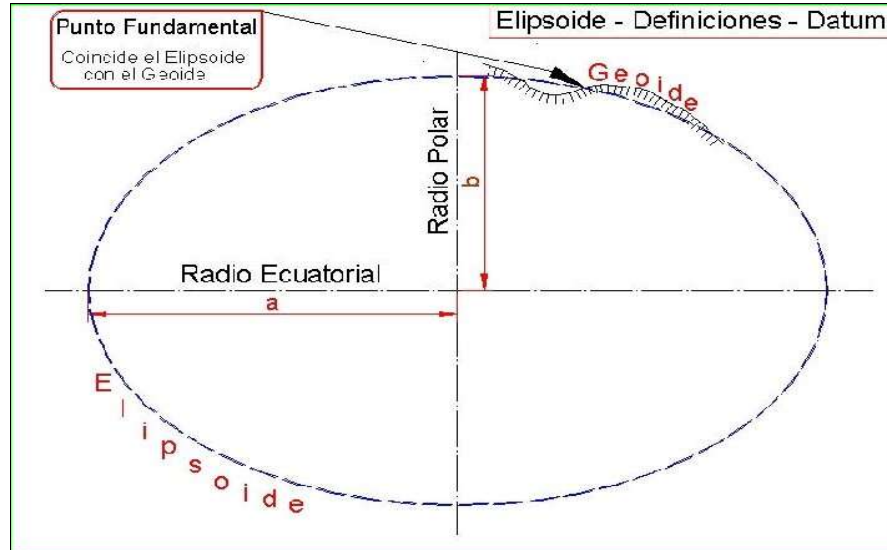


Figura 1.23 Puntos Fundamentales.

En el punto Fundamental coincide el elipsoide con la superficie real de la tierra así como en este punto las coordenadas astronómicas (las del elipsoide) y las geodésicas (las de la tierra).

Estas dos desviaciones definidas vienen dadas al no coincidir la vertical perpendicular al geoide, trazada por el punto fundamental, con la vertical perpendicular al elipsoide. Quedando el sistema definido al estar definidos estos ángulos en el Datum.

Definido el Datum, ya se puede elaborar la cartografía de cada lugar, pues se tienen unos parámetros de referencia que relacionan el punto origen del geoide y del elipsoide con su localización geográfica, así como la dirección del sistema.

1.4.1 Desviación de la Vertical (Eta).

Esta desviación viene dada al no coincidir la vertical en el geoide con la vertical en el elipsoide, no pasando la perpendicular al elipsoide por el centro de la de la elipse de revolución que me genera al elipsoide:

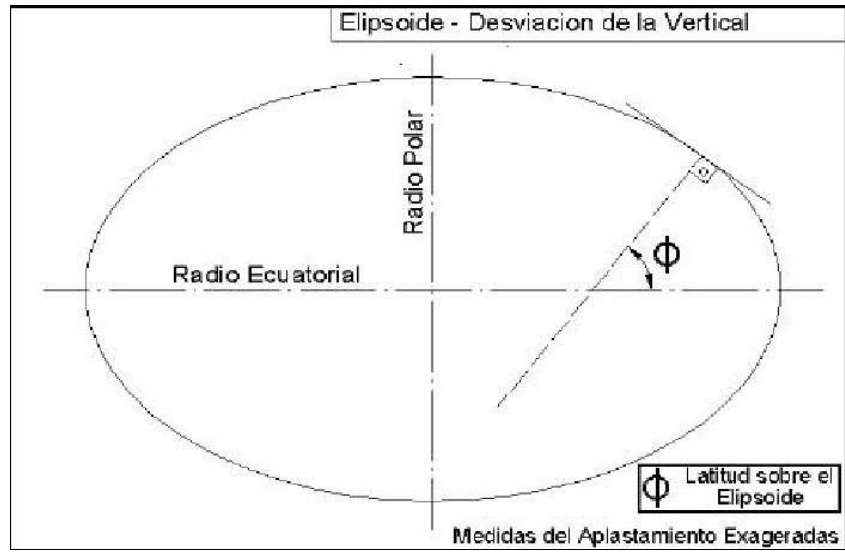


Figura 1.24 Desviación de la Vertical.

Visto sobre la medición de un punto:

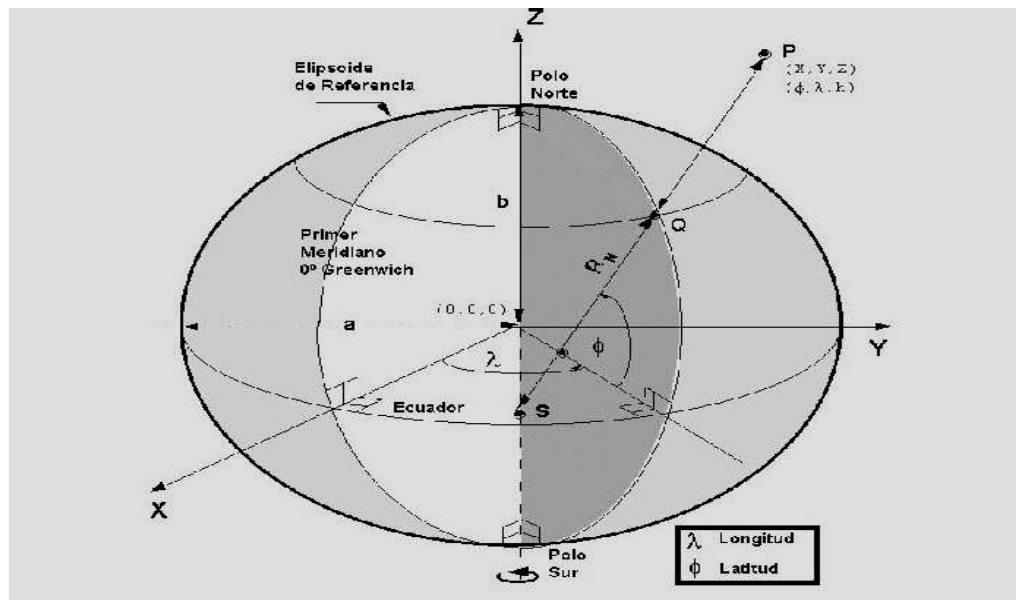


Figura 1.25 Desviación de la vertical en tres dimensiones.

1.4.2 Desviación Sobre el Meridiano (xi)

La desviación sobre la vertical hace que la latitud, al realizar su medición angular, no pase por el centro (0,0,0), originando un punto ficticio “5”, que puede no estar situado en el eje “Polo Norte- Polo Sur”. Si este punto esta situado sobre el eje “Polo Norte- Polo Sur” la desviación sobre el meridiano es 0°. Hay que recordar que tanto la desviación sobre el meridiano como la desviación de la vertical, únicamente es evaluada para el punto fundamental y no para la totalidad de las posiciones geográficas del sistema, sistema para el que independientemente en su desviación toma su origen de meridianos en Greenwich, Inglaterra 0°.

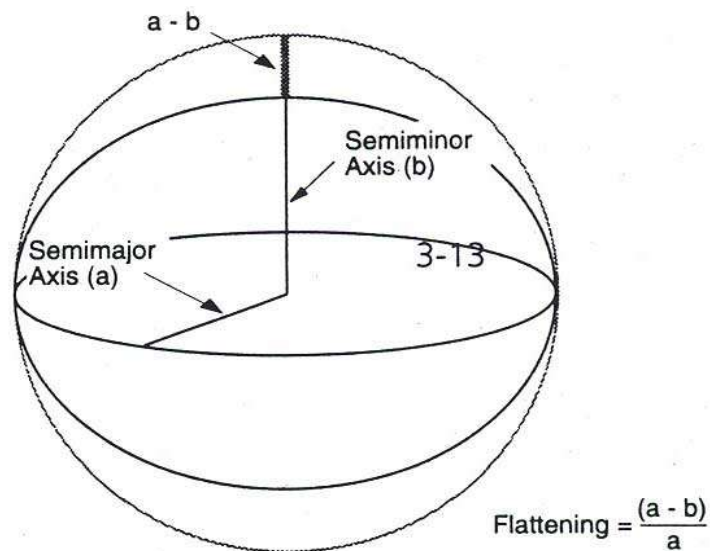


Figura 1.26 Desviación sobre el meridiano.

1.4.3 Parámetros del Datum WGS-84.

Los gps por defecto utilizan este modelo matemático universal. El sistema tiene las siguientes características:

- Origen en el centro de masas de la tierra
- El eje Z es paralelo al polo medio
- El eje X es la intersección del meridiano de Greenwich y el plano del ecuador.
- El eje Y es perpendicular a los ejes Z y X, y coincidente con ellos en el Centro de Masas Terrestre.
- Las coordenadas geodésicas están referidas a un elipsoide de revolución con las siguientes características:

- Semieje mayor (a) : 6.378.137 m.
- Inversa del aplanamiento ($1 / a$) : 298,257223563.
- Constante Gravitacional de la tierra: 0.3986004418.1015 m³/s².
- Velocidad angular de rotación (ω) : 7.292.115.10⁻¹¹ rad /s.

CAPITULO II

Introducción al sistema de posicionamiento global GPS-DGPS

2.1 Marco Histórico.

2.1.1 Antecedentes.

El sistema de satélites GPS fue creado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para el ejército, que a su vez, es el responsable de su correcto funcionamiento. El control principal está en la base aérea de Falcón, en Colorado; allí se reciben las señales de radio procedentes de los 24 satélites y se corrige su situación.

Desde tierra, los usuarios cuentan con receptores que miden el tiempo que tarda la señal de al menos tres satélites en llegar a él; pueden recibirse hasta once, y la precisión es suficiente para determinar la posición con un error de 110 metros o menos. El sistema nunca será completamente exacto, porque influyen variables como las interferencias, la inclinación o los puntos sin cobertura; además los errores fueron introducidos deliberadamente por los militares de los Estados Unidos, cuyos receptores pueden incluso dirigir misiles esto les da una mayor ventaja en el campo de batalla en caso de guerra.

En 1973 el Departamento de Defensa de Estados Unidos, con una inversión de 12 millones de dólares, empezó a desarrollar el proyecto Navstar GPS para proveer información precisa de localización para aeronaves, navíos, submarinos, tanques de guerra, etc. No fue sino hasta 1983 que Navstar GPS expandiera sus señales para uso civil por orden del presidente Ronald Reagan, a partir de la destrucción en pleno aire del vuelo 007 de las aerolíneas coreanas por parte de un bombardero soviético, después de pasar accidentalmente por espacio aéreo prohibido. Esto permitió a la aviación y a otros medios de transporte una mejor precisión en sus sistemas de navegación.

Durante estos años las tecnologías GPS-DGPS han arrojado grandes dividendos a los fabricantes de receptores. Los fabricantes de tecnología GPS ahora han encontrado otro potencial y lucrativo mercado: los teléfonos celulares; gracias a una iniciativa lanzada por la FCC (Federal Communications Commission) que entro en vigor en los Estados Unidos el primero de octubre del 2001, la cual menciona que cada sistema de celdas deberá ser capaz de localizar en caso de emergencia a sus teléfonos remotos dentro de un espacio de 125 metros al menos el 67 por ciento del tiempo. Este programa es llamado E911 (Enhanced 911).

Dentro del área automovilística, una compañía con base en San José, Ca., Datas Inc., desarrolló un sistema de navegación portátil para vehículos con capacidad para calcular automáticamente las rutas, con instrucciones de voz a cada momento. Este sistema conocido como RouteFinder PNA opera bajo el ambiente Microsoft Windows CE.

El Clarion AutoPC, incluye características de comunicación, navegación, información y

entretenimiento bajo el ambiente Windows CE. Con este sistema del tamaño de un estereo para automóvil se pueden hacer llamadas telefónicas a manos libres, envío de correo electrónico además de contener una libreta de direcciones. Contiene también un modo de navegación con mapas y direcciones el cual puede ser activado mediante voz; con sólo decirle donde uno se encuentra y donde se quiere ir, el sistema es capaz de guiarlo a un destino final.

2.2 Descripción del Sistema.

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS por sus siglas en inglés) es un sistema satelital basado en señales de radio emitidas por una constelación de 24 satélites activos en órbita alrededor de la tierra a una altura de aproximadamente 20,200 km. El sistema permite el cálculo de coordenadas tridimensionales que pueden ser usadas en navegación o mediante el uso de métodos adecuados, para determinación de mediciones de precisión, provisto de receptores que captan las señales emitidas por los satélites. El GPS fue implementado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos con el objeto de obtener en tiempo real la posición de un punto en cualquier lugar de la tierra.

Este sistema surgió debido a las limitaciones del sistema TRANSIT que en la década de los 70 proporcionaba posicionamiento usando métodos Doppler¹. La principal desventaja de este último era la no disponibilidad de satélites las 24 horas del día.

La idea original del GPS, que aún hoy día se mantiene, era usarlo para navegación. Esto es, conocer la posición del observador en cualquier momento del día dentro de un sistema de referencia creado para tal fin. Esto es conocido como posicionamiento absoluto. La posición del receptor es conocida a partir de las coordenadas de los satélites y las distancias medidas a por lo menos cuatro satélites, mediante una intersección espacial. La distancia a cada satélite es determinada haciendo uso de la fórmula básica siguiente:

$$R = c * \Delta t$$

Donde:

c = velocidad de la luz en el vacío

Δt = tiempo de recorrido de la señal desde el satélite hasta el receptor.

Evidentemente se necesita proveer al sistema de un mecanismo de medida de tiempo. Tanto los satélites como los receptores son provistos de relojes para tal efecto. Debido a que no se puede tener un reloj perfecto, tanto los relojes en el receptor y satélite poseen un error que afectará la

distancia medida, más si se considera la magnitud de las distancias involucradas. Debido a que el intervalo de tiempo es calculado a partir de dos relojes distintos, con errores diferentes, es que se usa el término de pseudo-distancias² para hacer referencia a las distancias medidas.

La determinación de coordenadas en forma absoluta presenta varios problemas. Además de los errores de reloj, se debe considerar que en la medición de pseudo-distancias la señal proveniente del satélite cambiará su velocidad de propagación al atravesar capas atmosféricas de distinta densidad, lo que introduce otro error en la posición.

También, debe recordarse que la posición de observación es determinada a partir de las coordenadas de los satélites, la distancia medida, por lo tanto, también se encuentra afectada por las distintas perturbaciones orbitales, que sacan a los satélites de las órbitas teóricas.

La constelación Navstar GPS, compuesta de 24 satélites envía dos tipos de señales a la tierra que difieren en niveles de precisión. El primer tipo conocido como PPS (Precise Positioning Service, Servicio de Localización Precisa), es una señal encriptada para usos militares, la cual fue diseñada para niveles de aproximación de 15 a 30 metros.

La segunda señal conocida como SPS (Standard Positioning Service, Servicio de localización Estándar), es una señal estándar para uso civil, tiene una precisión de 100 a 150 metros. La señal SPS es degradada a propósito por el Departamento de Defensa utilizando una técnica conocida como SA (Selective Availability, Disponibilidad Selectiva). Es lógico que el Departamento de Defensa no le va a dar la misma precisión al usuario civil, el cual en algunos casos puede ser su enemigo militarmente hablando.

La posición del receptor GPS es determinada por triangulación. El dispositivo receptor mide el tiempo que toma una señal en viajar por el espacio aproximadamente 20,200 Km. Y haciendo uso de una ecuación de recepción de señal, se determina la distancia entre el satélite y el receptor.

Como la posición de cada satélite es conocida y se tienen al menos 3 satélites en recepción se determina la posición exacta del receptor GPS (latitud, longitud y elevación). Las aplicaciones civiles que demanden una mayor precisión pueden ser determinadas por GPS diferencial (DGPS), una técnica de refinamiento que se auxilia de estaciones terrestres de referencia, incrementando en gran medida la precisión de los receptores GPS.

El DGPS se construyó principalmente por la introducción de la disponibilidad selectiva(SA). Es un sistema a través del cual se intenta mejorar la precisión obtenida al hacer uso del sistema GPS. El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre si. Los errores están fuertemente correlacionados en los receptores próximos entre si.

Con el sistema DGPS se pueden corregir en parte los errores debidos a:

- La disponibilidad selectiva.
- La propagación por la ionosfera - troposfera.
- Los errores en la posición del satélite.
- Los errores producidos por errores en el reloj del satélite.

De esto se puede concluir que las diferencias fundamentales de GPS y DGPS son:

- Los rangos de precisión de los DGPS son mejores en la toma de lecturas.
- Los DGPS cuentan con la posibilidad de corrección de errores.
- El costo económico es mayor utilizando DGPS.

2.3 Principio de Funcionamiento.

El sistema NAVSTAR-GPS se basa en la medida simultánea de la distancia entre el receptor y al menos 3 satélites, el cuarto satélite es usado para la sincronización del sistema y así obtener una mejor precisión.

Mediante la lectura de cuatro parámetros puede establecerse la posición relativa de un punto cualquiera, tres de estos datos recibidos pertenecen a las coordenadas X, Y, Z mientras que el último parámetro mide el tiempo GPS.

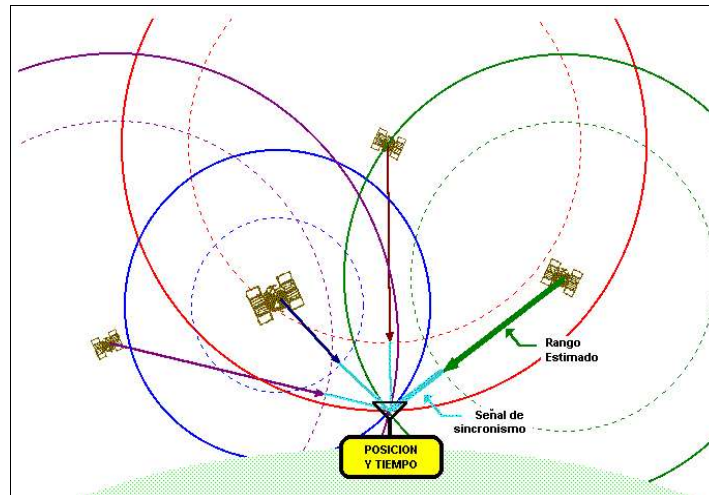


Figura 2.1. Interacción de los cuatro satélites.

En la figura 2.1 puede verse que los rangos estimados son interceptados, mientras que la señal de sincronización de un cuarto satélite, permite discriminar los puntos erróneos. El sistema ofrece

las siguientes informaciones:

Posición del receptor.
Referencia temporal muy precisa.

Las distancias entre el receptor y el satélite se obtienen por medio del retardo temporal en el lapso de tiempo en que el satélite envía la señal y el receptor la recibe. Los satélites emiten dos portadoras a la misma frecuencia. Estas portadoras están moduladas en fase (BPSK) por diferentes códigos pseudo-aleatorios.

El receptor GPS calcula la correlación entre el código recibido y el código del satélite cuya señal pretende detectar, de esta forma:

Se pueden separar las señales de los diferentes satélites.
Y finalmente se obtiene el retardo temporal.

En principio se podría pensar que calculando los retardos temporales entre 3 satélites se tendría la posición deseada (X_i, Y_i, Z_i), puesto que tres esferoides que se cortan definen un solo punto. Pero esto no es así debido a la precisión y estabilidad de los relojes del satélite y transmisores. Si bien los satélites cumplen estas dos condiciones, pues incorporan un reloj atómico (que son muy precisos y muy estables), este no es el caso de los receptores puesto que su precio sería desorbitado.

La solución a este problema consiste en introducir una nueva incógnita en el sistema (además de las tres coordenadas espaciales del receptor) debido a la deriva existente entre el reloj del satélite y el reloj del usuario. Y debido a esto es que se necesitan 4 satélites como mínimo, y no 3 como parecía en un principio. Se emplean 4 satélites respecto a los cuales el receptor calcula las distancias respectivas. En realidad no se miden distancias, sino pseudo distancias. Y así se ha llegado a un sistema con 4 ecuaciones y 4 incógnitas que se van a calcular conociendo las distancias a los satélites.

Si hay más de 4 satélites visibles se calculan las pseudo distancias respecto a todos los satélites visibles, obteniendo así un sistema con más ecuaciones que incógnitas, y se simplifica el cálculo de la posición.

El sistema está diseñado para que sobre cualquier punto de la superficie terrestre haya al menos 4 satélites visibles. El sistema GPS, además de la posición, ofrece una referencia temporal muy exacta; esto permite:

Sincronizar los relojes locales.*
Posibilidad de medir la velocidad a la que se desplaza el usuario.

*Esto tiene muchas aplicaciones, por ejemplo sincronización en transmisiones.

Algunos detalles del sistema GPS son:

- Error instrumental del cálculo de pseudo distancias como consecuencia de un error en la medida del retardo temporal de la señal.
- El sistema GPS requiere sistemas de medidas de retardo muy precisos.
- El reloj del satélite también puede sufrir alguna deriva (al cabo de varios años). El GPS envía al receptor una serie de modelos para corregir estas derivas.
- Puede suceder que el receptor sólo sea capaz de recibir las señales de 3 satélites. En este caso se debe de introducir la altura manualmente y se emplea el GPS en 2D, en la actualidad los GPS pueden situarse en 2D ó 3D.

La señal tarda unas centésimas de segundo en llegar al receptor, la posición del satélite tomada en cuenta para calcular la posición del usuario es la que tenía el satélite en el momento de transmitir la señal.

2.4 Configuración del Sistema GPS

El sistema GPS está compuesto por tres elementos:

1. Segmento espacial.
2. Segmento de control.
3. Segmento de los usuarios.

NOTA:

El Usuario: Este componente consiste en los receptores GPS que utilizan los datos recibidos de los satélites que en cada instante se encuentran por encima de su horizonte local, para determinar cuales es su posición geográfica y el tiempo

2.4.1 Segmento espacial.

El segmento espacial está formado por los satélites artificiales GPS. La constelación GPS está compuesta por 24 satélites operativos colocados en seis planos orbitales distintos. Sus órbitas son circulares y con un periodo de 12 horas. El posicionado de los satélites en cada instante es tal que, desde cualquier punto de la superficie de la Tierra se pueden observar un mínimo de cuatro satélites por encima del horizonte local. A intervalos de tiempo muy precisos (1 segundo) los satélites emiten información sobre su estado, su navegación, datos para la corrección de la propagación de ondas electromagnéticas a través de la atmósfera y, lo que más nos interesa, datos de tiempo según sus relojes internos.

Al principio se pensó que sólo eran necesarios 18 satélites (más 3 de emergencia por sí acaso alguno fallaba). Sin embargo más tarde se comprobó que con este número la cobertura en algunos puntos de la superficie terrestre no era buena. Así que se pasaron a utilizar 21 satélites (más 3 de reserva como antes) repartidos en 6 órbitas, de forma que hay 4 satélites por órbita.

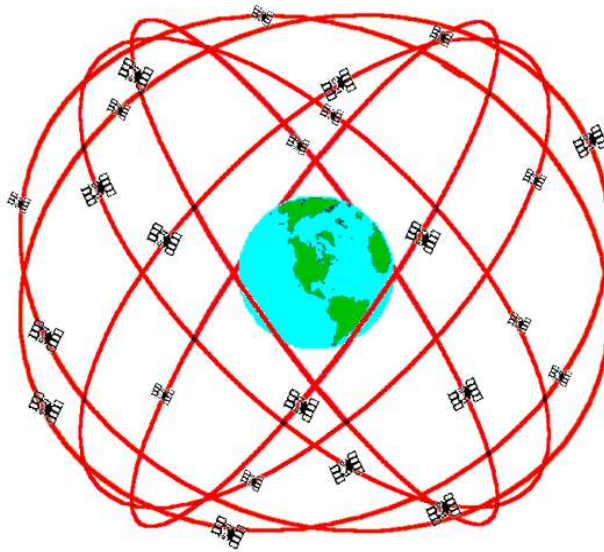


Figura 2.2 Constelación GPS (24 satélites).

Las órbitas que siguen los satélites están diseñadas para que se pueda recibir sus señales desde cualquier punto del planeta. El sistema GPS está preparado para funcionar aún en las peores

condiciones atmosféricas. Las órbitas de los satélites son casi circulares, con una excentricidad de 0.03 a 0.3. Están situadas a una altura de 20180 km.

Características de las órbitas de los sistemas GPS:

- Tienen una inclinación respecto al plano del ecuador de 55°.
- La separación entre las órbitas es de 60°.
- El periodo de los satélites es de 11h 58m.
- Hay 6 efemérides que caracterizan a las órbitas.
- Los satélites se hallan a aproximadamente 11,000 millas náuticas.

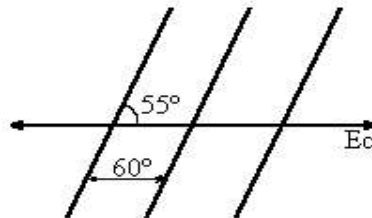


Figura 2.3 Inclinación de las órbitas.

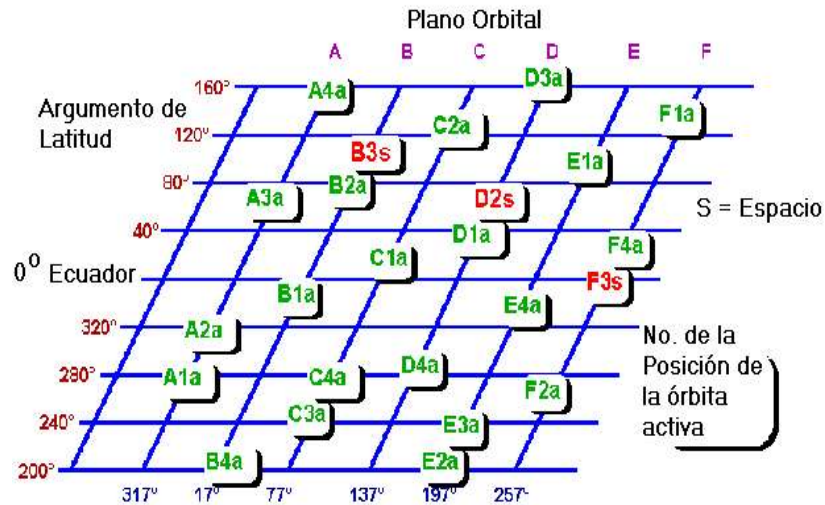


Figura 2.4 Representación simplificada de las constelaciones del GPS.

Satélites del sistema NAVSTAR_GPS:



Figura 2.5 Fotografía de un Satélite GPS.

Características:

- Emiten con una potencia de 700W.
- La antena.
- Es un array (arreglo) helicoidal.
- Emiten con polarización a derechas.
- Su ganancia es de 15dB.
- Incorporan un reloj atómico muy estable y preciso.
- Su vida media es de aproximadamente 7.5 a 10 años, al cabo de este tiempo hay que sustituirlo.

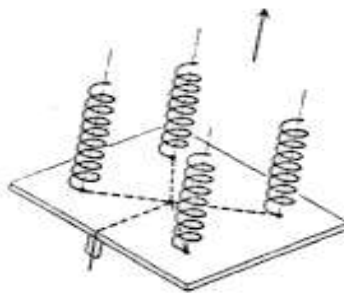


Figura 2.6 Antena de los Satélites GPS.

2.4.2 Segmento de control(OCS).

El segmento de control esta formado por las bases terrestres de control: El sistema terrestre también consiste en diez estaciones terrestres: cinco civiles (Quito (EC), Buenos Aires (AR), Hermitage (UK), Bahrain y Smithfield (AU)) y otras cinco de las fuerzas aéreas norteamericanas (Hawaii, Colorado, Isla Ascensión, Diego García y Kwajalein). A través de sus antenas, esta "constelación" de estaciones terrestres monitorean el estado de todos y cada uno de los satélites Navstar. La vigilancia se hace mediante receptores GPS pasivos para acumular datos sobre las señales emitidas por cada satélite. Esta información se procesa en la Estación Central de Seguimiento para determinar con precisión cuales son las órbitas reales de los satélites y proceder a las correcciones de trayectoria que sean necesarias enviándoles mensajes de navegación a cada uno de ellos a través de su antena en tierra.

Existe una estación maestra de control (Colorado Spring). Esta se encarga de calcular las efemérides de cada uno de los satélites y de mantenimiento de cada uno de los subsistemas como por ejemplo:El segmento de control formado por las bases terrestres de control.

Esta información se procesa en la Estación Central de Seguimiento para determinar con precisión cuales son las órbitas reales de los satélites y proceder a las correcciones de trayectoria que sean necesarias enviándoles mensajes de navegación a cada uno de ellos a través de su antena en tierra. Dependiendo de la versión del satélite los datos de navegación pueden ser guardados por un periodo comprendido entre 14 hasta un máximo de 210 días, en intervalos de entre 4 a 6 horas.

Los datos almacenados sirven para calcular la posición del satélite y además ayudar a este en la adquisición de las señales.

Además la OCS resuelve anomalías en los satélites (SA) y hace medidas de los pseudo rangos y rangos delta en las estaciones de monitoreo, para determinar correcciones en el reloj del satélite (sincronización del reloj) ,almacenamiento de datos y calculo de efemérides.

Para realizar sus funciones el segmento de control se compone de 3 componentes:

- 1. Estación de control maestra(MCS).**
- 2. Estación de monitoreo.**
- 3. Antena terrestre.**

2.4.2.1 Funcionamiento del segmento de control.

La estación de control (MCS) procesa los datos de las estaciones de monitoreo para la navegación de los satélites. Los datos de todas las estaciones de monitoreo son usadas para la corrección de los relojes, las efemérides y el almacenamiento de datos de cada satélites, además la estación de control vigila el estado de configuración de cada satélite y la estación terrestre. El

procesador del satélite diagnostica cuando esto es necesario y entonces el reloj puede ser ajustado.

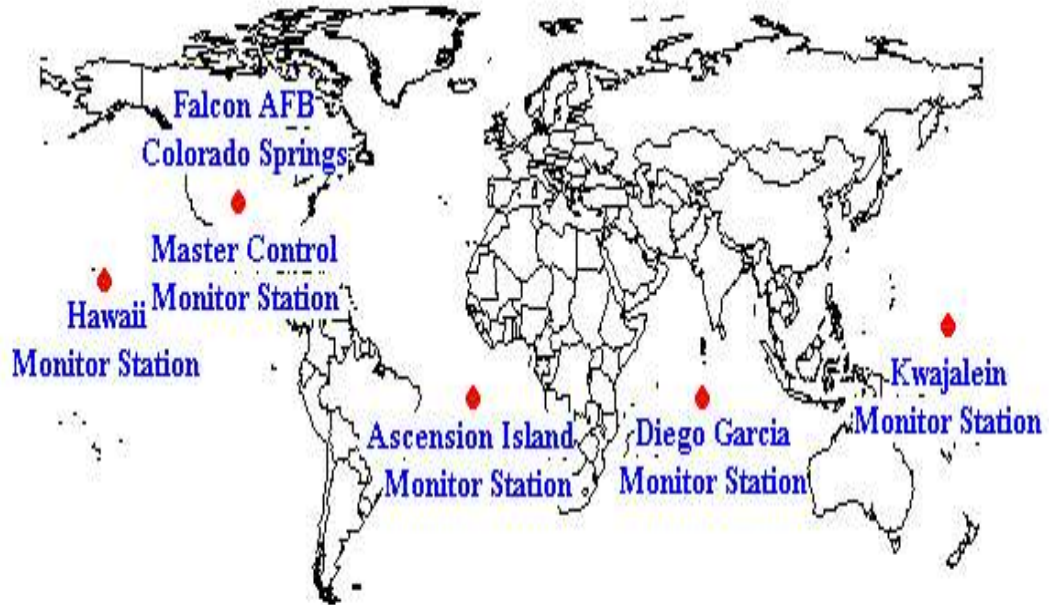


Figura 2.7 Ubicación de las estaciones de control.

Hay 3 estaciones de carga que están situadas en Diego García, Isla Ascensión y Kwajalein, Ellas transmiten datos (mensaje de navegación) y reciben las señales que los satélites envían a estas estaciones. Para la transmisión se emplea la banda S.

- Canal ascendente: 1,783.74MHz
- Canal descendente: 2,227.5 MHz

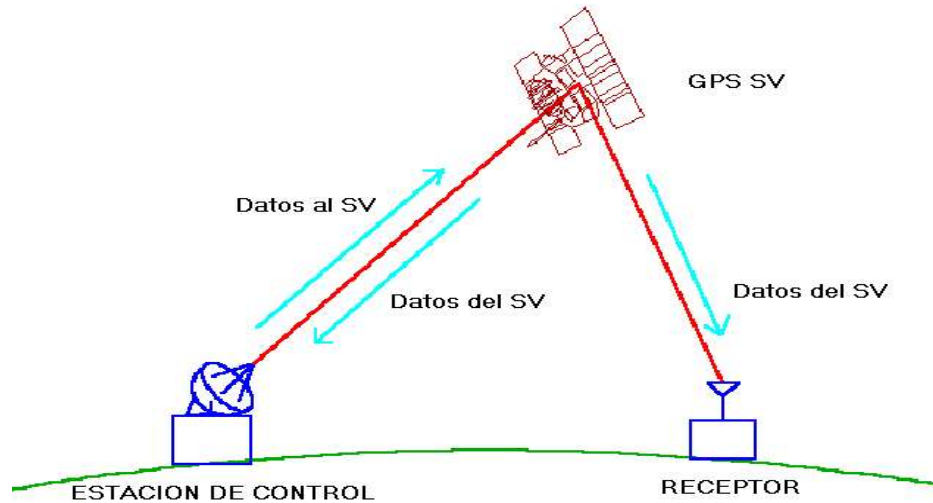


Figura estructura del segmento de control 2.8

2.4.2.2 Descripción de la estación de monitoreo.

Las estaciones de monitoreo forman la componente de base de datos del segmento de control. Una estación de monitoreo maneja las frecuencias del canal ascendente y descendente (L1/L2) del receptor GPS que continuamente realiza medidas de los rangos y los pseudo rangos de cada satélite en vista. Las estaciones monitoras reciben las señales transmitidas por los satélites y a partir de ellas obtienen información para poder calcular las efemérides de los satélites. Esta información es transmitida a la estación maestra de control que es la encargada de calcular las efemérides y obtener así la posición de los satélites con una aproximación muy buena.

2.4.2.3 Descripción de servicios de los eslabones de antenas.

La antena de tierra provee la transmisión y la recepción de las señales y comandos necesarios para el funcionamiento y navegación de los satélites. El conjunto de antenas o eslabones guardan y cargan los datos de telemetría, pistas o sectores y comandos (TT&C). Un único arreglo de datos TT&C (incluyen mensajes de navegación) es preparado por la estación de control maestra (MCS) para cada uno de los 24 satélites en órbita.

Estos datos son enviados a las antenas de tierra desde la estación de control maestra (MCS) hasta que sea usado con algún satélite en particular (satélite en vista).

2.4.2.4 Procesamiento de la Estación de Control Maestra.

La estación de control maestra(MCS)realizan una gran cantidad de funciones que son el soporte del funcionamiento de los sistemas GPS. Una de sus principales funciones es el procesamiento de los datos recolectados en las estaciones remotas de monitoreo para realizar aproximaciones del reloj del satélite GPS, efemérides y el almacenamiento de datos concretos.

Con los datos colectados de las estaciones de monitoreo remotas, el proceso comienza con las correcciones de las medidas de los pseudo rangos para los retrasos de la troposfera y la ionosfera. Los pseudo rangos y la medida de los rangos delta de las estaciones de monitoreo remotas son procesadas con filtro de Kalman para formar una efeméride precisa del satélite y corrección del offset del reloj. El filtro de Kalman es un filtro que se encarga de mantener una sincronización precisa o fija ante alguna fluctuación. Este filtro es mantenido en el tiempo de aplicación de la efeméride mientras se toman medidas en diferentes tiempos. Este filtro es ajustado cada 15 minutos con la posición computada en el ECEF del sistema de plano cartesiano.

Este proceso provee una buena aproximación de la efeméride del satélite y el offset del reloj atómico en el momento de la toma de los datos. La posición del satélite y las correcciones del reloj pueden ser predecidas mediante modelos llamados fuerza de integración el cual es una arreglo de ecuaciones diferenciales las cuales predicen el comportamiento dinámico del satélite antes las perturbaciones producidas por los campos de gravedad, la presión de la radiación solar y el movimiento polar. Los intervalos de predicción de estos modelos son en intervalos de 4 a 6 horas.

Otra función importante del MCS es la de monitorear la con fiabilidad del sistema. El segmento de control debe de ser muy preciso para determinar que los relojes, las efemérides y la carga de los datos sean correctas . El MCS procesa los datos de navegación y mantiene imágenes o copias de los mensajes de los satélites para realizar comparaciones, cargar datos y verificar la transmisión de los mensajes de control del satélites segmento de control(OCS) monitorea el comportamiento de las señales de la banda I del satélite y al detectar una falla pone al MCS en alarma en cuestión de unos 60 segundos.

2.5 Segmento de los Usuarios.

Este segmento está formado por los receptores y antenas GPS es decir, por todos los instrumentos que se emplean para el cálculo, mediante el empleo de las señales provenientes de los satélites NAVSTAR, de las coordenadas de un punto, adquirir el tiempo de oscilador atómico o para navegación. Sus funciones principales son las siguientes:

- 1) Sintonizar las señales emitidas por los satélites.
- 2) Decodificar el mensaje de navegación.
- 3) Medir el retardo de la señal (desde el transmisor hasta el receptor) a partir de los cuales calculan la posición.
- 4) Presentar la información de la posición en la que se encuentra (en 3D ó en 2D).

Otras funciones complementarias son:

- 1) Ayuda a la navegación.
- 2) Almacenamiento de datos.
- 3) Presentación más sofisticada (mapa de fondo...)
- 4) Prestaciones de los receptores civiles (C/A).
- 5) 1ª posición 2D en menos de 2 minutos (siempre que no partamos de la posición perdido).
- 6) 1ª posición 3D en menos de 2.5 minutos (siempre que no partamos de la posición perdido).
- 7) Actualizaciones de la posición de 0.5 a 1 segundos.
- 8) Precisión en torno a 15m.
- 9) Medida de la velocidad del usuario, precisión de 0.1m/s aproximadamente.
- 10) Referencia temporal, precisión de 100ns aproximadamente.

2.5.1 Antenas de los Receptores GPS.

La función de la antena del receptor G.P.S. es la conversión de la señal radioeléctrica que recibe de los satélites de la constelación NAVSTAR a señal eléctrica. La corriente eléctrica inducida en la antena por las señales radiadas, recibidas, posee toda la información modulada sobre ellas.

La antena es de cobertura semiesférica omnidireccional, para poder captar con la misma sensibilidad las señales que provengan desde el origen hasta el horizonte. Puede ser de muchas formas y materiales, dependiendo de las aplicaciones y del coste del receptor: mono polo, dipolo, dipolo curvado, cónico-espiral, o helicoidal.



Figura 2.9 Antenas Receptoras.

En la parte inferior de la antena se conecta el cable a la salida de un preamplificador. Éste es necesario para evitar que la señal recibida se atenúe antes de llegar al receptor y no pueda ser leída. El preamplificador debe amplificar sólo las frecuencias que se desean recibir, mientras que el resto sufren la atenuación del cable sin haber sido amplificadas. El preamplificador se alimenta habitualmente con corriente procedente del receptor por el cable de la antena. Las especificaciones de potencia del preamplificador van a depender de la ubicación del receptor y de la antena. El cable y los circuitos del receptor introducen un retardo en la medición del tiempo.

Se han desarrollado antenas múltiples que asocian hasta cuatro antenas muy cercanas en el mismo plano de tierra. En un receptor de 24 canales se podrían distribuir 6 canales por antena en grupo de 4 antenas, 8 en grupo de 3, 12 canales en grupo de dos o los 24 en una antena.

2.5.2 Receptor GPS.

En la antena se han de generar tantas señales como satélites por canal se estén recibiendo. Por ejemplo: un receptor de 12 canales bifrecuencia recibe 16 señales si sigue a 8 satélites, y podría admitir 24 señales si hubieran 12 satélites en seguimiento. Cada señal necesita un canal o dispositivo electrónico que la procese con independencia del resto, tras ser separada y aislada por el receptor.

Las señales G.P.S. se transmiten empleando la técnica del espectro ensanchado que protege contra interferencias y es favorable a la transmisión. Así pues la amplitud de la señal que llega a la antena es estable lo que ahorra la existencia de una etapa de control automático de ganancia (C.A.G.).

El receptor G.P.S. es del tipo heterodino, basado en la mezcla de frecuencias que permite pasar de la frecuencia recibida en la antena a una baja frecuencia que podrá ser manejada por la electrónica del receptor. La mezcla de frecuencias se realiza con la ayuda de un oscilador local que genera una señal sinusoidal pura.

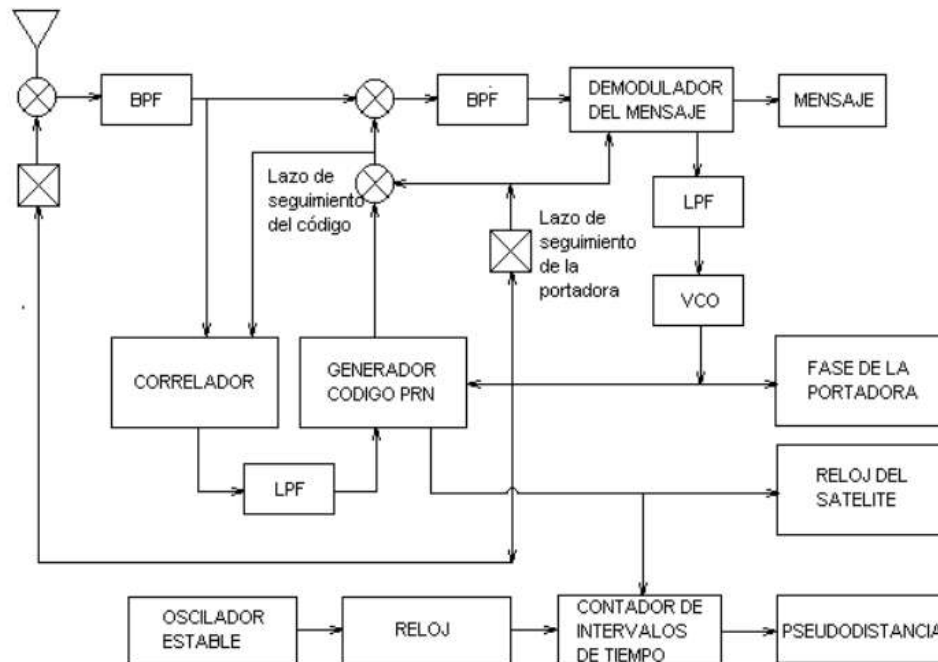


Figura 2.10 Diagrama de Bloques de Receptor.

2.6 Estructura de los GPS

El diagrama de bloques del receptor GPS se muestra en la siguiente figura este consta de 5 partes principales: antena, receptor, procesador, entrada/salida(I/O), unidad de display de control y fuente de poder.

2.6.1 Antena.

Las señales del satélite son recibidas vía antena, la cual tiene polarización horaria (RHCP) y

tienen cobertura cercana a los hemisferios dato típico de cobertura es de 160 grados con variaciones de ganancias de cerca de 2.5dBic y un ángulo de elevación de 10 grados, la ganancia en estas condiciones generalmente es negativa. Desde que las señales son RHCP las antenas usan un modelo cónico. Los receptores GPS que manejan la transmisión de bodigos del satélite a la estación de control remota p(y) L1 y L2 necesitan manejar por lo menos un ancho de banda de 20.46MHz entre ambas frecuencias y al usar el modo de recepción C/A con L1 se necesita manejar un ancho de banda de 2.04MHz.

La selección de el tipo de antena ha utilizar depende de la evaluación de parámetros tales como la ganancia:

- 1) La redistribución del terreno.
- 2) Los diseños aerodinámicos.
- 3) Estabilidad-propagación.
- 4) La resistencia a las interferencias.

2.6.2 Receptores.

En la actualidad existen dos tipos de receptores , que manejan los dos formas de transmitir códigos de el satélite a la estación de control remota(p(y) - C/A).

Los usuarios PPS generalmente utilizan arreglos que manejan códigos p(y) en ambas frecuencias L1 y L2 . Estos inician operando como receptores C/A en L1 y luego cambian al otro modo de operación usando ambas frecuencias. Los usuarios SPS. usan el modo C/A y la frecuencia L1.

La mayoría de los receptores tienen múltiples canales donde por cada canal se maneja la transmisión de cada satélite. El diagrama de bloques de un receptor multicanal genérico SPS se muestra en la siguiente figura:

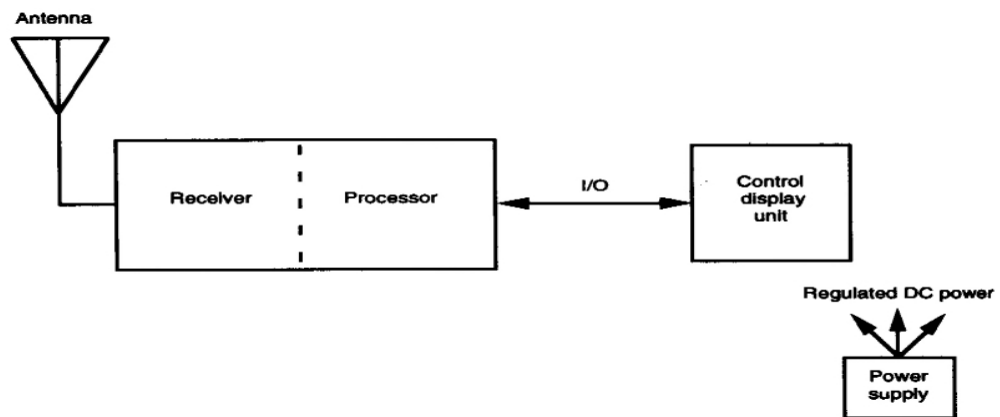


Figura 2.11 Componentes de un receptor GPS

Las señales RF CDMA del satélite son generalmente filtradas con un filtro pasa banda pasivo para reducir las interferencias de RF y la señal resultante es amplificada para transmitir datos. Las señales RF son convertidas a señales de frecuencia intermedia(IF). En un receptor GPS las señales IF son muestreadas y digitalizadas por un convertidor análogo-digital(A/D). El convertidor(A/D) muestrea los códigos PRN entre 8 y 12 veces (1.023MHz para códigos C/A y 10.23 para p(y) L1 L2). Para los códigos de L1 C/A el ancho de banda puede ser ligeramente superior a los 2 MHz. Por otro lado el ancho de banda de los códigos p(y) es ligeramente superior a los 20 MHz. El muestreo reduce la sensibilidad del receptor para el ruido de cuantización del A/D y es por esto que se reduce el número de bits necesarios para el convertidor A/D. Las muestras son enviadas al procesador digital de señales (DSP). El DSP contiene N canales en paralelo para simultanear los intervalos de las portadoras y códigos de los N satélites (estos pueden ser entre 5 y 12 receptores a la vez).Cada canal contiene los códigos y los lazos de tiempos entre las portadoras para formar los nuevos códigos y medir las fases entre las diferentes portadoras así como los datos de navegación demodulados. El canal puede manejar tres diferentes tipos de señales:

- a) Pseudorángos.
- b) Rangos Deltas.
- c) Doppler Integrados.

Esto depende de la configuración del sistema. Los resultados deseados y los mensajes de navegación demodulados son enviados al procesador.

2.6.3 Procesador de navegación/recepción.

Estos procesadores son usados para el control y el manejo del receptor en una secuencia de operación, empezando por la adquisición de las señales de los canales del DSP (Procesador de Señales Digitales) y siguiendo con la recolección de datos. En pocas palabras el procesador debe formar las soluciones PVT de los datos del receptor. En algunas aplicaciones un procesador independiente puede procesar las funciones PVT y de navegación. La mayoría de procesadores proveen soluciones independientes PVT en una base de 1Hz sin embargo en aplicaciones de mucha precisión se requieren bases de tiempo de 5Hz. La solución PVT final y otros datos de navegación son enviados a los dispositivos de I/O.

2.6.4 Dispositivos de entrada/salida I/O.

Los dispositivos de entrada salida son la interfaz entre el sistema GPS y el usuario. Estos dispositivos son de dos tipos externos e internos .Para muchas aplicaciones los dispositivos I/O es un CDU. El CDU(unidad de control y despliegue de datos) permite operar datos de entrada y

mostrar el estado y parámetros de solución de navegación . Muchos aviones y barcos tienen integrados en sus paneles de control dispositivos I/O.

2.6.5 Fuentes de poder.

La fuente de poder puede ser externa o interna al sistema o una combinación de ambas. Las baterías alcalinas o de litium son usadas según sea el dispositivo como por ejemplo los dispositivos portátiles como los handheld, los dispositivos de recepción instalados en computadoras personales. Las aplicaciones de navegación marítima, aérea o terrestre emplean plataformas de baterías y usando ciclos convertidores de energía convierten los voltajes de AC a DC o DC a AC además estas utilizan reguladores muy precisos para la protección del equipo. Para guardar los datos existentes en las memorias RAMS, IC'S y mantener operando los relojes y dispositivos de sincronismo se utilizan baterías o fuentes de poder independiente para evitar la perdida de datos ante una desconexión.

2.7 Selección de los Receptores GPS.

Hasta la fecha de investigación de esta tesis se pudo consultar la existencia de 50 proveedores de tecnología GPS que producen alrededor de 200 versiones diferentes de GPS. El uso de cada uno de estos aparatos depende de varios factores entre los cuales se pueden enumerar:

- 1) Respuesta del equipo a interferencias, temperaturas extremas y contenidos salinos de la atmósfera. Si el receptor sera usado con propósitos militares o civiles PPS, SPS.
- 2) Los rangos de precisión, velocidad y tiempo ha ser determinados, es decir los coeficientes para determinar estos parámetros PVT son diferentes para aplicaciones aéreas, terrestres y marinas.
- 3) Las condiciones dinámicas de operación (velocidad, aceleración) del sistema GPS, los GPS para aplicaciones de aeronaves de combate mantienen desempeño óptimo bajo las condiciones extremas.
- 4) Si se requieren aplicaciones de precisión, DGPS provee los estándares mas altos de precisión.
- 5) Si se requiere que el GPS trabaje en un ambiente donde se necesita realzar las capacidades de rechazo a las interferencias.
- 6) Si el receptor debe de ser interfazado con sistemas externos , podrán coexistir el hardware I/O con los softwares .

7) Aspectos económicos, tamaños físicos, consumo de energía deben de ser considerados.

2.8 Tipos de Receptores GPS.

Existen los siguientes tipos de receptores GPS:

- a) Receptor secuencial.
- b) Receptor continuo o multicanal.
- c) Receptor con canales multiplexados.

2.8.1 Receptor secuencial.

Este tipo de receptor sólo cuenta con un canal. Sigue secuencialmente a los diferentes satélites visibles. El receptor permanece sincronizado con cada uno de los satélites al menos 1 segundo. Durante este tiempo adquiere la señal y calcula el retardo temporal, luego extrae el retardo de sólo 4 satélites y a partir de estos calcula la posición. Los satélites que elige son aquellos que tienen mejor SNR. Características de los éstos receptores son:

Son los más baratos.

Son los más lentos.

Su precisión es menor que la de los otros tipos de receptores.

Suele emplearse en aplicaciones de baja dinámica (barcos, navegación terrestre...)

2.8.2 Receptor continuo o multicanal.

En este caso estos receptores disponen de al menos 4 canales. A cada canal se le asigna el código de un satélite para que se sincronice con él y adquiera el retardo con ese satélite. Se miden los retardos simultáneamente. Son más rápidos que los secuenciales a la hora de calcular la posición. Su precisión también es mejor que en el modelo anterior. Están recomendados para aplicaciones de gran dinámica (aeronaves).

2.8.3 Receptor con canales multiplexados.

Tienen 1 único canal físico (hardware).

Tienen 4 o más bucles de seguimiento (software).

De este modo se deben muestrear todos los satélites visibles en un tiempo inferior a 20 ms, pues así podrá obtener la información recibida de todos los satélites visibles (Tbit=20ms).

La complejidad software es mayor y se necesita un microprocesador más potente. Pero tiene la ventaja respecto al receptor continuo de que al emplear 1 sólo canal físico será menos sensible a las posibles variaciones de canal que en el caso de los receptores continuos (los canales no pueden ser exactamente iguales, unos tendrán un retardo distinto al resto.)

2.9 Fases del Desarrollo del Segmento Espacial.

El desarrollo del segmento de control y del segmento espacial han sido simultáneas empezando a mediados de los años 70. Los satélites son asociados con cada fase de este desarrollo y se les conoce como bloques de satélites. Las características de estos bloques se presentan a continuación.

2.9.1 Sumario de características de los bloques de satélites.

Tres bloques de satélites han sido desplegados hasta la fecha y se tiene planeado desplegar dos bloques más. Los primeros bloques fueron conocidos con el nombre de BLK1, el último satélite de esta generación el PRN12 es usado desde 1995, luego se aumentó la producción con los modelos BLK1, BLKII y BLKIIA los cuales están en servicio actualmente y a futuro se están implementando la generación BLKIIR que serán los sustitutos de las generaciones antes mencionadas.

| Bloque | Numero Satélite | | Fecha de Lanzamiento | Órbita |
|--------|-----------------|-----|----------------------|--------|
| | PRN | SVN | | |
| II | 14 | 14 | Feb. 89 | F1 |
| II | 02 | 13 | Jun. 89 | B3 |
| II | 16 | 16 | Ago. 89 | F3 |
| II | 19 | 19 | Oct. 89 | A4 |
| II | 17 | 17 | Dec. 89 | D3 |
| II | 18 | 18 | Ene. 90 | F3 |

| | | | | |
|-----|----|----|---------|----|
| II | 20 | 20 | Mar. 90 | B2 |
| II | 21 | 21 | Ago. 90 | F2 |
| II | 15 | 15 | Oct. 90 | D2 |
| IIA | 23 | 23 | Nov. 90 | F4 |
| IIA | 24 | 24 | Jul. 91 | D1 |
| IIA | 25 | 25 | Feb. 92 | A2 |
| IIA | 28 | 28 | Abr. 92 | C2 |
| IIA | 26 | 26 | Jul. 92 | F2 |
| IIA | 27 | 27 | Sen. 92 | A3 |
| IIA | 01 | 32 | Nov. 92 | F1 |
| IIA | 29 | 29 | Dec. 92 | F4 |
| IIA | 22 | 22 | Feb. 93 | B1 |
| IIA | 31 | 31 | Mar. 93 | C3 |
| IIA | 07 | 37 | May. 93 | C4 |
| IIA | 09 | 39 | Jun. 93 | A1 |
| IIA | 05 | 35 | Ago. 93 | B4 |
| IIA | 04 | 34 | Oct. 93 | D4 |
| IIA | 06 | 36 | Mar. 94 | C1 |
| IIA | 03 | 33 | Mar. 96 | C2 |

Nueve satélites del BLKII y 15 BLKIIA componen actualmente la constelación de satélites. Actualmente hay de reserva 4 satélites del tipo BLKIIA los cuales están a disposición del personal de las estaciones de control remoto (MCS), al utilizarse estos cuatro satélites se utilizarán como reemplazos de satélites del tipo BLKIIR los cuales están previstos entre los años 1997 al 2004 después de este tiempo se utilizarán satélites del tipo BLKIIF, en la siguiente tabla se observa la tabulación de las órbitas de estos satélites.

2.9.2 Cargas de Navegación.

La carga de navegación es la parte del satélite responsable de la recepción de los datos del segmento de control operacional (OCS), transmisión de códigos y datos para el usuario.

La carga de navegación es solo una parte del sistema de navegación, otros sistemas son responsables de cada función independiente, como por ejemplo el control de altitud, paneles solares etc. La figura siguiente es un diagrama genérico de la carga de navegación. El OCS, TT&C son responsables de la carga de datos, dirigir y controlar la información del satélite, estos datos son guardados en la memoria del procesador. Los estándares de frecuencia de los subsistemas contienen los estándares de frecuencias atómicas, en la actualidad hay cuatro estándares diferentes 2 de cesium y dos de rubidium. De estos múltiplos de estándares atómicos uno es designado como primario y sirve para fijar una referencia temporal en el espacio, para la generación y transmisión de las señales de navegación.

El otro estándar es usado como redundancia es decir para fijar comparaciones en términos de referencias temporales. El generador de códigos produce los códigos C/A y P(y) los cuales son

sumados con los datos de navegación los cuales son enviados al subsistema de generación de banda L y estos a su vez son transmitidos a los usuarios. El subsistema de la banda L contiene las portadoras L1,L2 sintetizadas y antenas asociadas . El procesador interfaza la recepción y la transmisión para las diferentes versiones de satélites (BLKIIR Y BLKIIF) El transmisor y el receptor usan diferentes apoyos para este propósito.

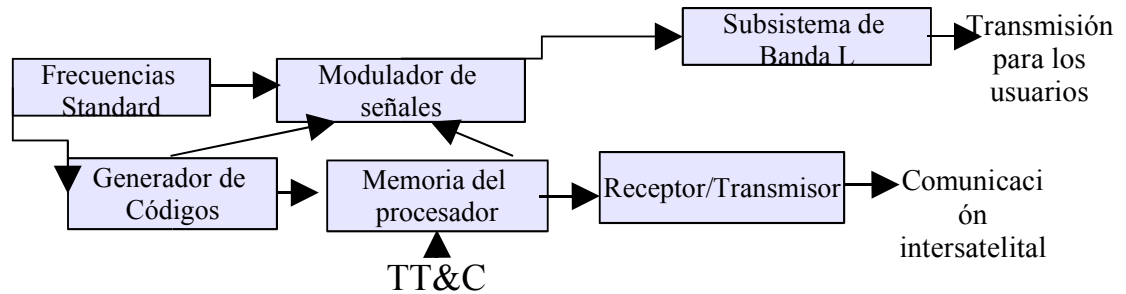


Figura 2.12 Carga de Navegación satélital.

CAPITULO III

Características de las señales GPS.

3.1 Frecuencias y Formatos de Modulación.

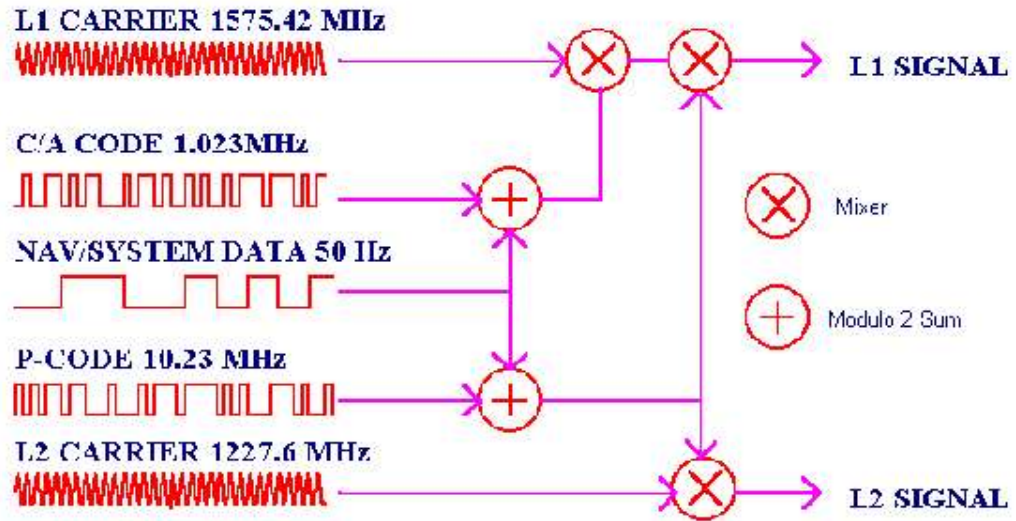


Figura 3.1 Señales GPS.

Estos códigos están formados por una serie impar de n bits con una duración de T segundos.

$$a_0, a_1, a_2, \dots, a_{n-1} \quad \text{con } a_i = \pm 1$$

$$\theta_{ac}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot a_{i+\tau} \begin{cases} \tau = 0 & \text{Pico} \\ \tau \neq 0 & \text{Lobulos secundarios} \end{cases}$$

Su espectro es similar al ruido (tienen componentes frecuenciales en todo el rango de frecuencias). Se caracterizan porque la función de auto correlación esta dada por:

$$\theta_{ab}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} a_i \cdot b_{i+\tau}$$

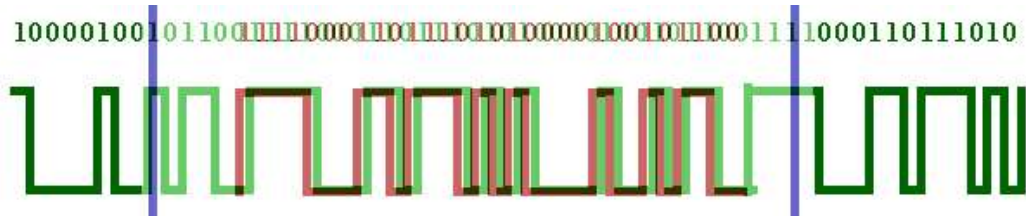


Figura 3.4 Correlación parcial de código de identificación y PRN.

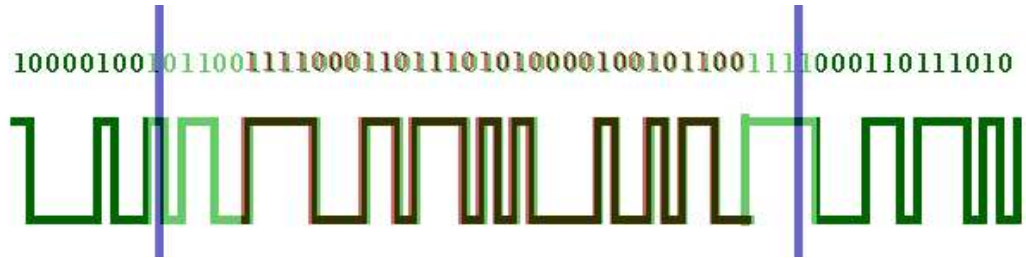


Figura 3.5 Correlación completa (código en fase) del receptor del satélite con el código PRN.

El sistema NAVSTAR-GPS emplea dos tipos de códigos:

- Código C/A**
- Empleado para navegación de baja precisión (uso civil) --
- Código P**
- Empleado para navegación de alta precisión (uso militar) --

3.1.1 Código C/A (Clear/Adquisition).

Para obtenerlo se multiplica la salida de dos códigos de 1023 bits. La frecuencia de reloj que se emplea es de 1.023 MHz. Donde, n es el identificativo de cada satélite y T es el tiempo de duración de 1 bit. ($10^{-6}/1.023$ s). El tiempo de duración del código es:

$$T_0 = \frac{1023 \cdot 10^6}{1.023} = 1 \text{ms}$$

3.1.2 Código P.

Para obtenerlo se multiplica la salida de dos códigos (P1,P2). La frecuencia de reloj que se

emplea es de 10.23 MHz. La longitud de los dos códigos que se multiplican para obtener el código P es de:

- P1: 15345000 bits.
- P2: 15345034 bits.

Donde, n es el identificativo de cada satélite y T es el tiempo de duración de 1 bit ($10^{-6}/10.23$ s). El período de estos códigos es de 267 días, aunque únicamente se emplean 7 días y al cabo de la semana se resetea este código, asignando secuencias semanales distintas a cada satélite. Así, en este caso no hay ningún tipo de ambigüedad. El receptor únicamente corre una parte del código.

3.1.3 Técnica del Espectro Ensanchado.

El fundamento de esta técnica consiste en que la señal transmitida se expande sobre un ancho de banda mayor mediante una modulación extra. La señal que se desea transmitir se modulará con otra señal con un régimen binario mucho mayor. Esta técnica es muy robusta frente a las interferencias (característica muy importante en sistemas militares). Los diagramas de bloques del transmisor y del receptor se muestran a continuación:

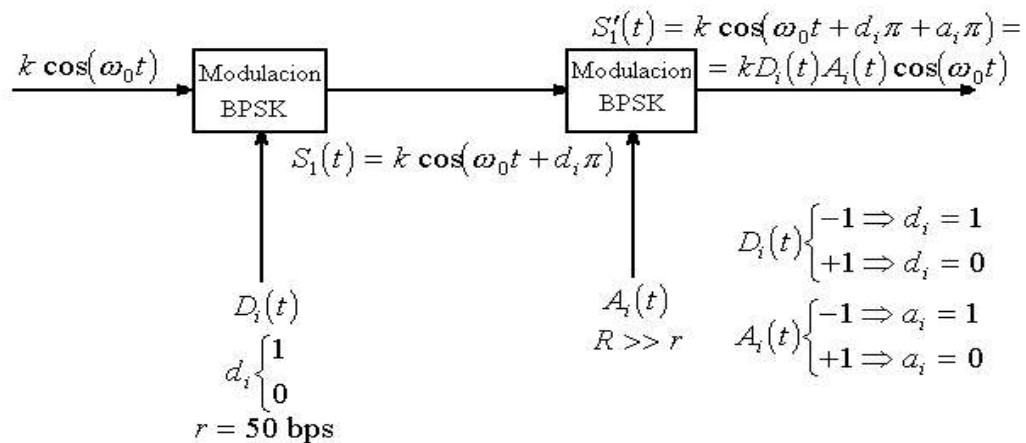


Figura 3.6 Diagrama en Bloques del Transmisor GPS.

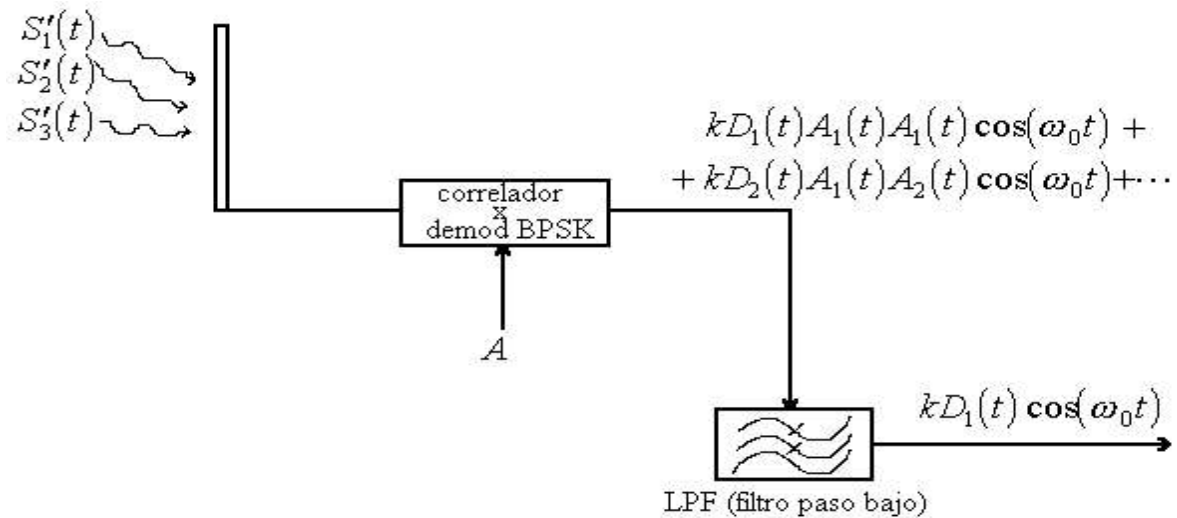


Figura 3.7 Diagrama en bloques del receptor GPS.

3.2 Características de las señales de los GPS.

Los vehículos espaciales GPS (SVs) transmiten sus señales en dos frecuencias L1 y L2. L1 es la frecuencia primaria y L2 la frecuencia secundaria. Estas dos portadoras son moduladas a través de la técnica de espectro esparcido con una única secuencia PRN asociada con cada SV y por los datos de los mensajes de navegación.

Todos los SVs transmiten a estas dos frecuencias, pero no hay interferencias entre ellos debido a que cada uno tiene un código PRN diferente, esta técnica es la utilizada en la tecnología celular CDMA. Para categorizar un SV en vista con otros SVs usando la técnica CDMA el receptor GPS duplica la secuencia PRN (relación señal a Ruido) para el SV deseado con lo que se duplica la señal portadora incluyendo el efecto Doppler.

Dos portadoras son provistas para permitir dos frecuencias de usuarios para medir los retrasos de la ionosfera debido a que el retraso está relacionado con el factor de escala de la modulación utilizada. El código P(y) es modulado en cuadratura de fase con el código C/A en L1. Así hay un desfase de 90 grados entre la modulación de los datos C/A y la modulación de los datos P(Y) en las dos frecuencias portadoras en L1. Esto se ilustra en la figura 3.8 el cual es el diagrama del vector de fase.

La figura 3.9 ilustra el resultado de la función OR exclusiva entre los códigos C/A y P, este proceso es equivalente a la multiplicación binaria entre ellos o es decir el proceso de modulación BPSK.

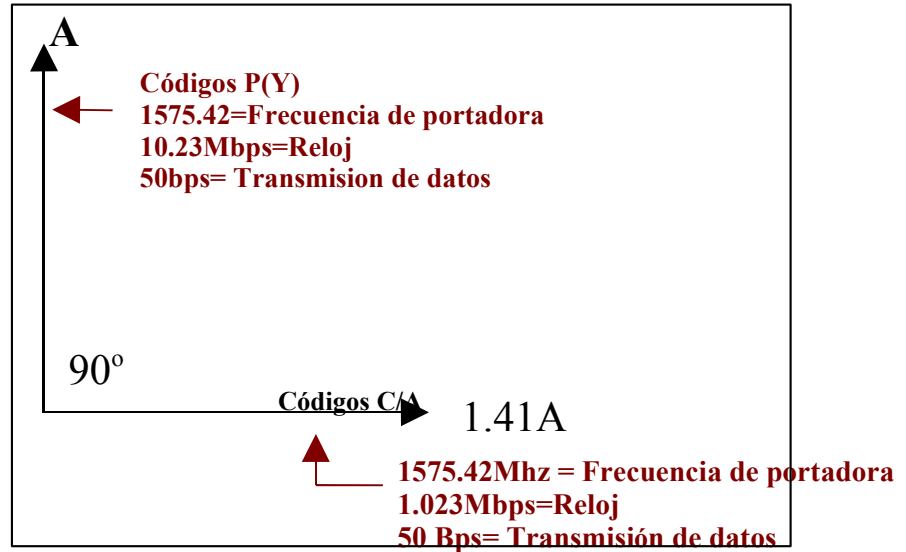


Figura 3.8 Estructura de las señales GPS para L1.

Existen 204,600 códigos P(y) entre la secuencia de datos y los 20460 códigos C/A para estas mismas secuencias. Además la fase no cambia en las secuencias de los códigos PRN debido a esta modulación(BPSK).

La figura 3.9 muestra como las formas de las señales podrían presentarse antes o después de la modulación BPSK en una transición de nivel, en un código P(y) o C/A. Hay 154 ciclos de la portadora por cada código P(Y) y 1540 ciclos de portadora por cada código C/A en L1.

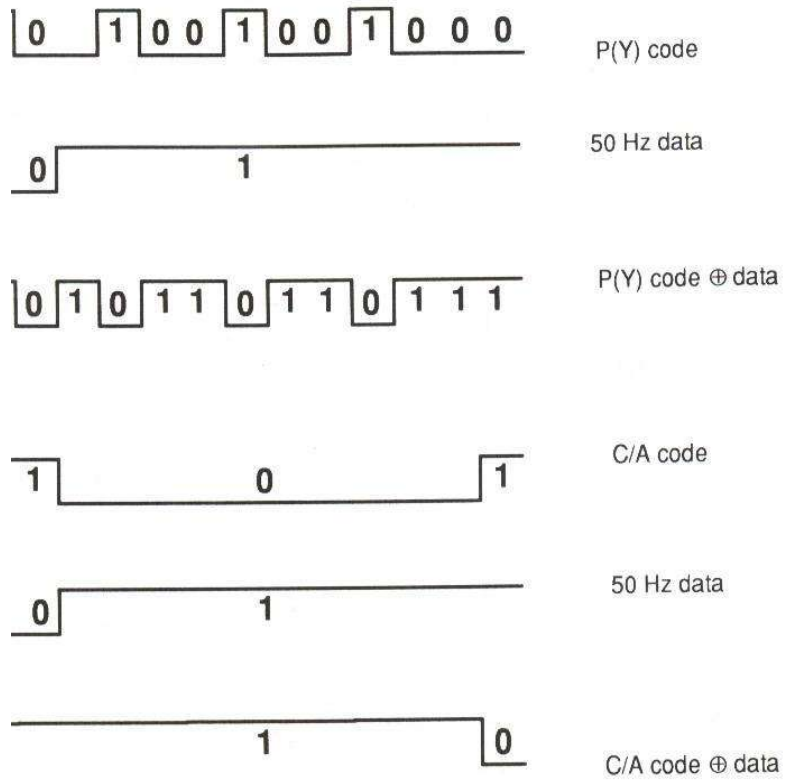


Figura 3.9a Transferencia de códigos GPS contra datos

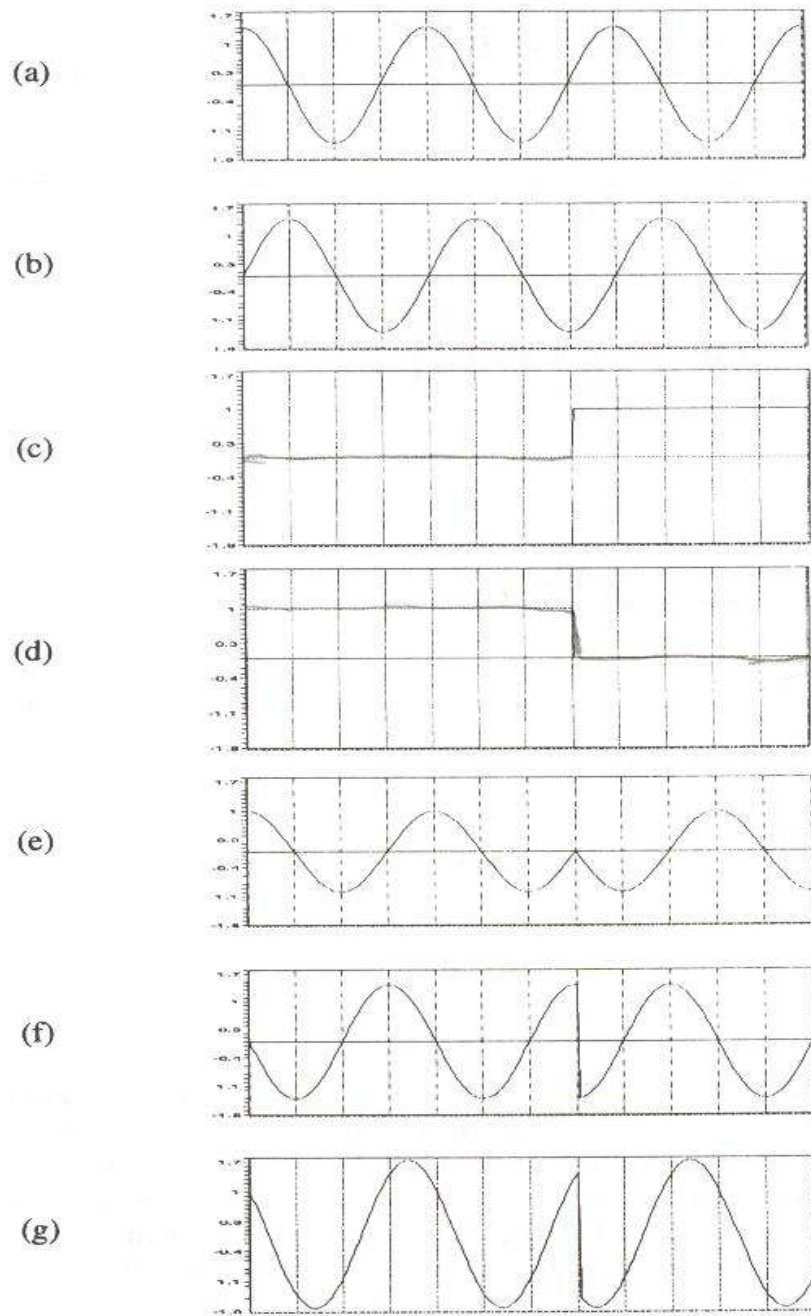


Figura 3.9b Modulación de la portadora del GPS: (a) Portadora L1 fase 0, (b) Portadora L1 con fase 90;(c) Código P(Y) en ex-or con los datos; (d) Código C(a) en ex-or con datos;(e) Códigos en ex-or con los datos resultantes de la modulación bpsk en la portadora de fase 0;(f) Código C(A) en ex-or con los datos resultantes de la modulación bpsk con la portadora de 90;(g) Resultante de la modulación de la portadora L1.

Las frecuencias L2 (1227.60 MHz) pueden ser moduladas por cualquier código P(y) o C/A, o solamente por el código P(y) según sea seleccionado por el segmento de control. Los códigos P (Y) y C/A nunca están presentes simultáneamente en L2 o L1.

En general los códigos P(Y) son los únicos seleccionados por el segmento de control. Hay 120 ciclos de portadoras por cada código P(y) en L2. Además las transiciones de fase en la portadora L2 son improbables. La tabla 3.1 muestra las estructuras de las señales GPS en L1 y L2.

| ESTRUCTURA DE LAS SEÑALES GPS. | | |
|---|---|---------------------------|
| <i>Señal/Prioridad</i> | <i>Primaria</i> | <i>Secundaria</i> |
| Designación de señal. | L1 | L2 |
| Portadora. | $1575.42 \cdot 10^6$ | $1227.60 \cdot 10^6$ |
| Códigos PRN (chips X seg). | P(Y) = $10.23 \cdot 10^6$ C/A = $1.023 \cdot 10^6$ | P(Y) = $10.23 \cdot 10^6$ |
| Mensaje de navegación y modulación de datos(bps). | 50 | 50 |

Tabla 3.1 Estructura de las señales GPS.

3.3 Secuencia Directa y Generación de Códigos PRN.

Según la ilustración que se presenta a continuación se muestra el diagrama de bloques del generador PRN usado por el GPS para implementar la técnica CDMA. Cada código sintetizado PRN se deriva de otros dos generadores de códigos.

En cada caso el segundo generador de códigos es retrasado con respecto al primero antes de que sus salidas sean combinadas por el circuito OR exclusiva. Estos retrasos son variables dependiendo del código que se está utilizando, estos retrasos son mostrados en la tabla 3.2 .

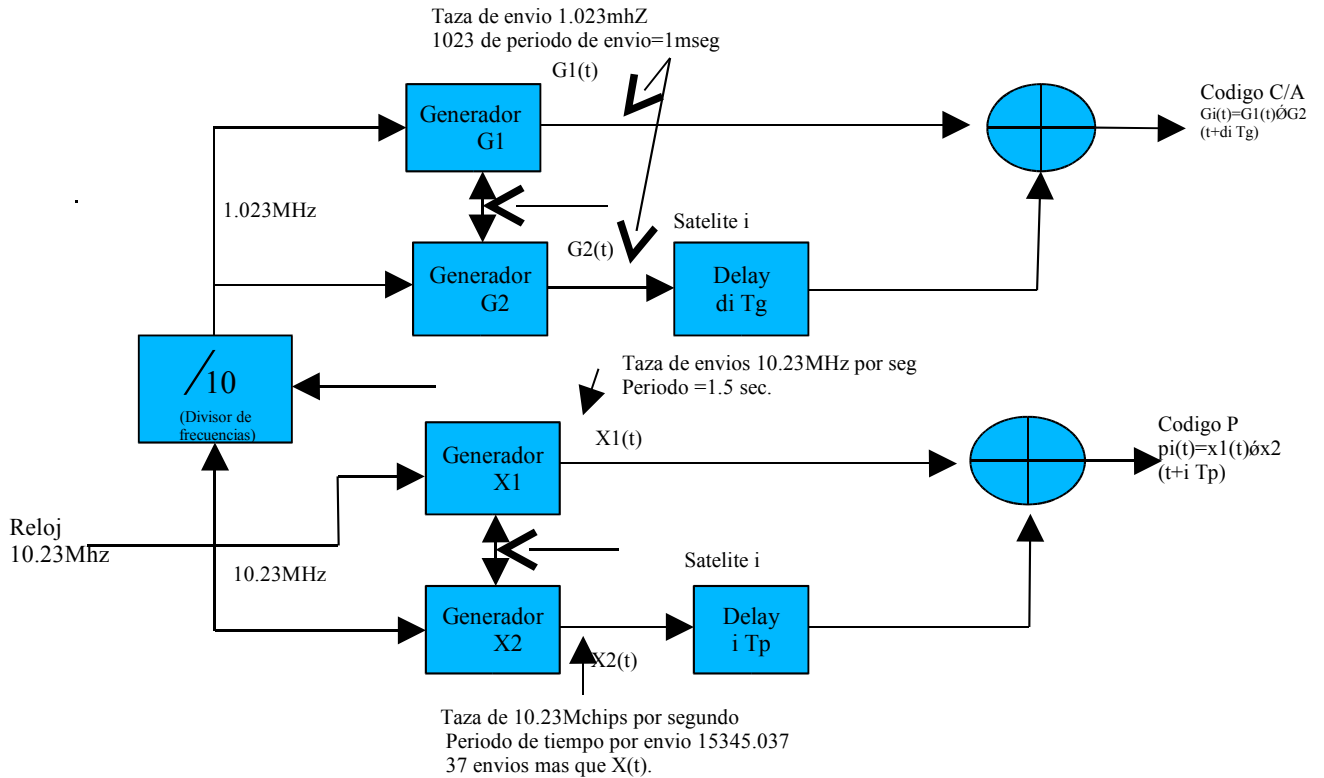


Figura 3.10 Generador de Códigos GPS.

El código C/A tiene una longitud de bit de 1023 bits. La frecuencia de transmisión de estos códigos es entonces de 1.023Mhz, por tanto el periodo de repetición de los pseudo rangos es entonces $1023 / 1.023 \times 1000k$ o el equivalente a 1 milisegundo.

La figura 3.11 muestra la arquitectura de diseño de un generador GPS del tipo C/A. En este se pueden observar dos registros de desplazamiento G1y G2, los cuales generan un máximo de pseudo ruido de 1023bits, es fácil describir el funcionamiento de los generadores lineales a través de los polinomios de la forma $G1 = \sum x_i + 1$, donde x_i significa que la salida de la i-ésima celda del registro de desplazamiento es usada como sumador de modo 2(OR exclusiva) y el 1 significa que la salida del sumador es retro alimentado de la primera celda(3).

Estos estados de los registros son combinados con los otros existentes y con la función OR exclusiva y retro alimentada a la etapa 1. El polinomio que describe la arquitectura del registro de desplazamiento es $G1 = 1 + x^3 + x^{10}$

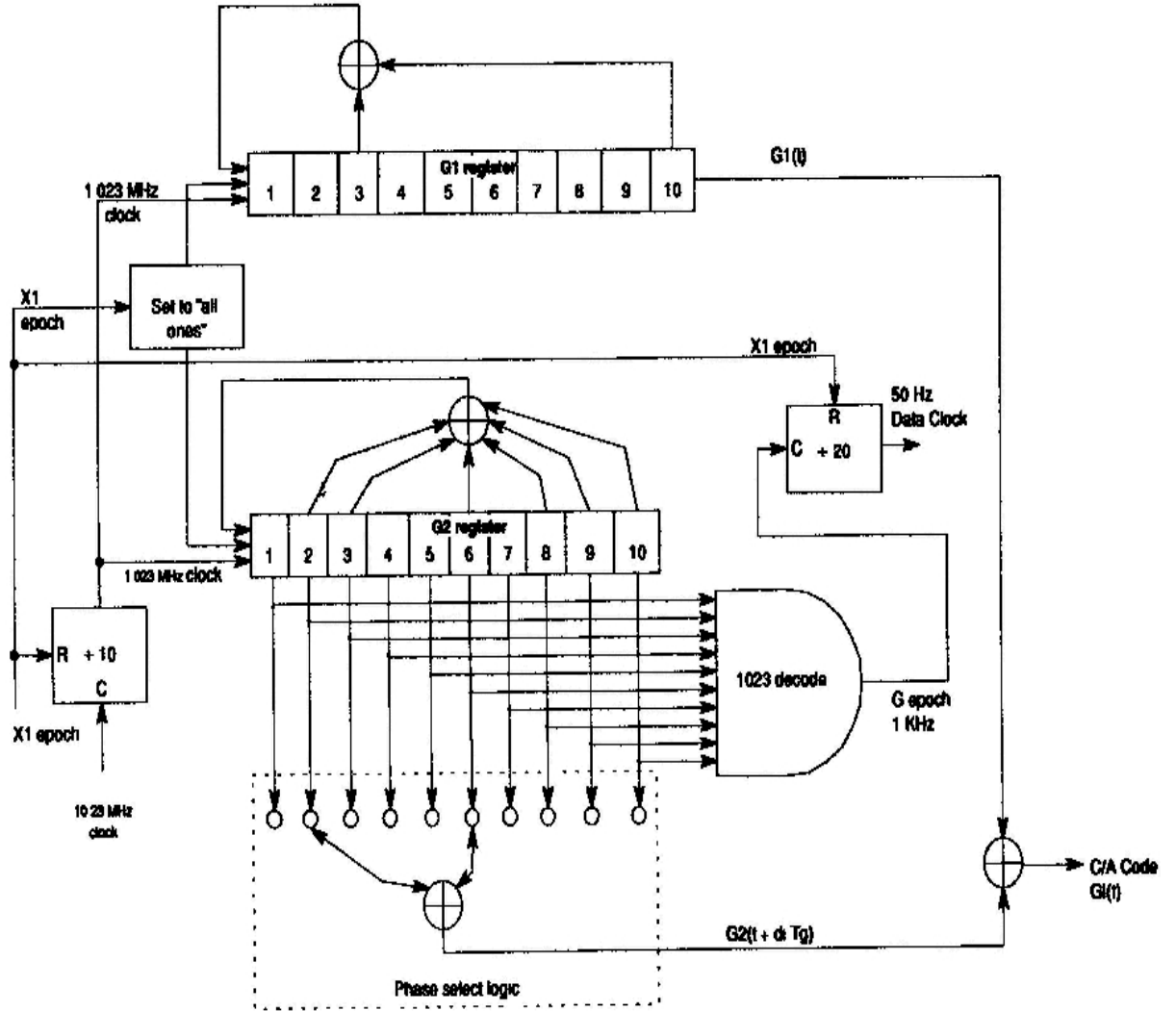


Figura 3.11 Generador de códigos C/A

| SV PRN Number | C/A-Code Tap Selection | C/A-Code Delay (Chips) | P-Code Delay (Chips) | First 10 C/A-Chips (Octal)* | First 12 P-Chips (Octal) |
|---------------------|------------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 2 ⊕ 6 | 5 | 1 | 1440 | 4444 |
| 2 | 3 ⊕ 7 | 6 | 2 | 1620 | 4000 |
| 3 | 4 ⊕ 8 | 7 | 3 | 1710 | 4222 |
| 4 | 5 ⊕ 9 | 8 | 4 | 1744 | 4333 |
| 5 | 1 ⊕ 9 | 17 | 5 | 1133 | 4377 |
| 6 | 2 ⊕ 10 | 18 | 6 | 1455 | 4355 |
| 7 | 1 ⊕ 8 | 139 | 7 | 1131 | 4344 |
| 8 | 2 ⊕ 9 | 140 | 8 | 1454 | 4340 |
| 9 | 3 ⊕ 10 | 141 | 9 | 1626 | 4342 |
| 10 | 2 ⊕ 3 | 251 | 10 | 1504 | 4343 |
| 11 | 3 ⊕ 4 | 252 | 11 | 1642 | “ |
| 12 | 5 ⊕ 6 | 254 | 12 | 1750 | “ |
| 13 | 6 ⊕ 7 | 255 | 13 | 1764 | “ |
| 14 | 7 ⊕ 8 | 256 | 14 | 1772 | “ |
| 15 | 8 ⊕ 9 | 257 | 15 | 1775 | “ |
| 16 | 9 ⊕ 10 | 258 | 16 | 1776 | “ |
| 17 | 1 ⊕ 4 | 469 | 17 | 1156 | “ |
| 18 | 2 ⊕ 5 | 470 | 18 | 1467 | “ |
| 19 | 3 ⊕ 6 | 471 | 19 | 1633 | “ |
| 20 | 4 ⊕ 7 | 472 | 20 | 1715 | “ |
| 21 | 5 ⊕ 8 | 473 | 21 | 1746 | “ |
| 22 | 6 ⊕ 9 | 474 | 22 | 1763 | “ |
| 23 | 1 ⊕ 3 | 509 | 23 | 1063 | “ |
| 24 | 4 ⊕ 6 | 512 | 24 | 1706 | “ |
| 25 | 5 ⊕ 7 | 513 | 25 | 1743 | “ |
| 26 | 6 ⊕ 8 | 514 | 26 | 1761 | “ |
| 27 | 7 ⊕ 9 | 515 | 27 | 1770 | “ |
| 28 | 8 ⊕ 10 | 516 | 28 | 1774 | “ |
| 29 | 1 ⊕ 6 | 859 | 29 | 1127 | “ |
| 30 | 2 ⊕ 7 | 860 | 30 | 1453 | “ |
| 31 | 3 ⊕ 8 | 861 | 31 | 1625 | “ |
| 32 | 4 ⊕ 9 | 862 | 32 | 1712 | “ |
| 33† | 5 ⊕ 10 | 863 | 33† | 1745 | “ |
| 34† | 4 ⊕ 10 | 950‡ | 34 | 1713‡ | “ |
| 35† | 1 ⊕ 7 | 947 | 35 | 1134 | “ |
| 36† | 2 ⊕ 8 | 948 | 36 | 1456 | “ |
| 37† | 4 ⊕ 10 | 950‡ | 37 | 1713‡ | 4343 |

Tabla 3.2 Asignaciones y códigos de fase y estados iniciales para los códigos C/A y P(y)

| Registro | Polinomio | Estado Inicial |
|---------------|--|----------------|
| Código-C/A G1 | $1+X^3+X^{10}$ | 1111111111 |
| Código-C/A G2 | $1+X^2+X^3+X^6+X^8+X^9+X^{10}$ | 1111111111 |
| Código-P X1A | $1+X^6+X^8+X^{11}+X^{12}$ | 001001001000 |
| Código-P X1B | $1+X^1+X^2+X^5+X^8+X^9+X^{10}+X^{11}+X^{12}$ | 010101010100 |
| Código-P X2A | $1+X^1+X^3+X^4+X^5+X^7+X^8+X^9+X^{10}+X^{11}+X^{12}$ | 100100100101 |
| Código-P X2B | $1+X^2+X^3+X^4+X^8+X^9+X^{12}$ | 010101010100 |

Tabla 3.3 Polinomios y estados iniciales de los generadores de códigos

El polinomio y los estados iniciales de los registros de desplazamientos de ambos generadores de códigos P(y) y C/A se presentan en la tabla 3.3. Un código único C/A para cada SV(satélite) es el resultado de la función OR exclusiva de la secuencia directa de salida G1 y la secuencia de retraso G2. El efecto de retraso de G2(pseudo ruido) es obtenido por la función OR exclusiva de las posiciones seleccionadas de las dos derivaciones, la cual será conocida como G21. Esto se debe a que las secuencias de pseudo ruido tiene ambas características, y estas se agregan a sus desplazamientos de fases aunque estas no cambien.

La función de las dos derivaciones en G2 de la figura 3.11 cambian el código de fase en G2 con respecto a G1 sin la necesidad de otro registro de desplazamiento para realizar el retraso. Cada código de ruido pseudoaleatorio(PRN) C/A es asociado con dos posiciones de G2. La tabla 3.2 describe esas combinaciones de salidas para todos los códigos PRN del GPS y especifica los retrasos en los envíos de los códigos C/A. Los primeros 32 números de esos códigos PRN son reservados para el segmento espacial y 5 valores de PRN de la 33 a la 37 son reservados para otras aplicaciones como transmisiones en tierra (GTs). Los GTs fueron usados en la primera generación de GPS para evaluar la operación y la exactitud antes de que los satélites fueran lanzados.

El código P del GPS es generado, por secuencias de pseudo ruido utilizando 12 registros de desplazamiento llamados X1A,X1B,X2B y X2A. El diagrama de bloques de este registro de desplazamiento se muestra en la figura 4.12. Es de notar que las salidas X1A y X1B están relacionadas por un circuito que realiza la función OR exclusiva formando la nueva salida X1 al igual que X2A y X2B están relacionadas por el mismo circuito y forman la salida X2 del generador de códigos.

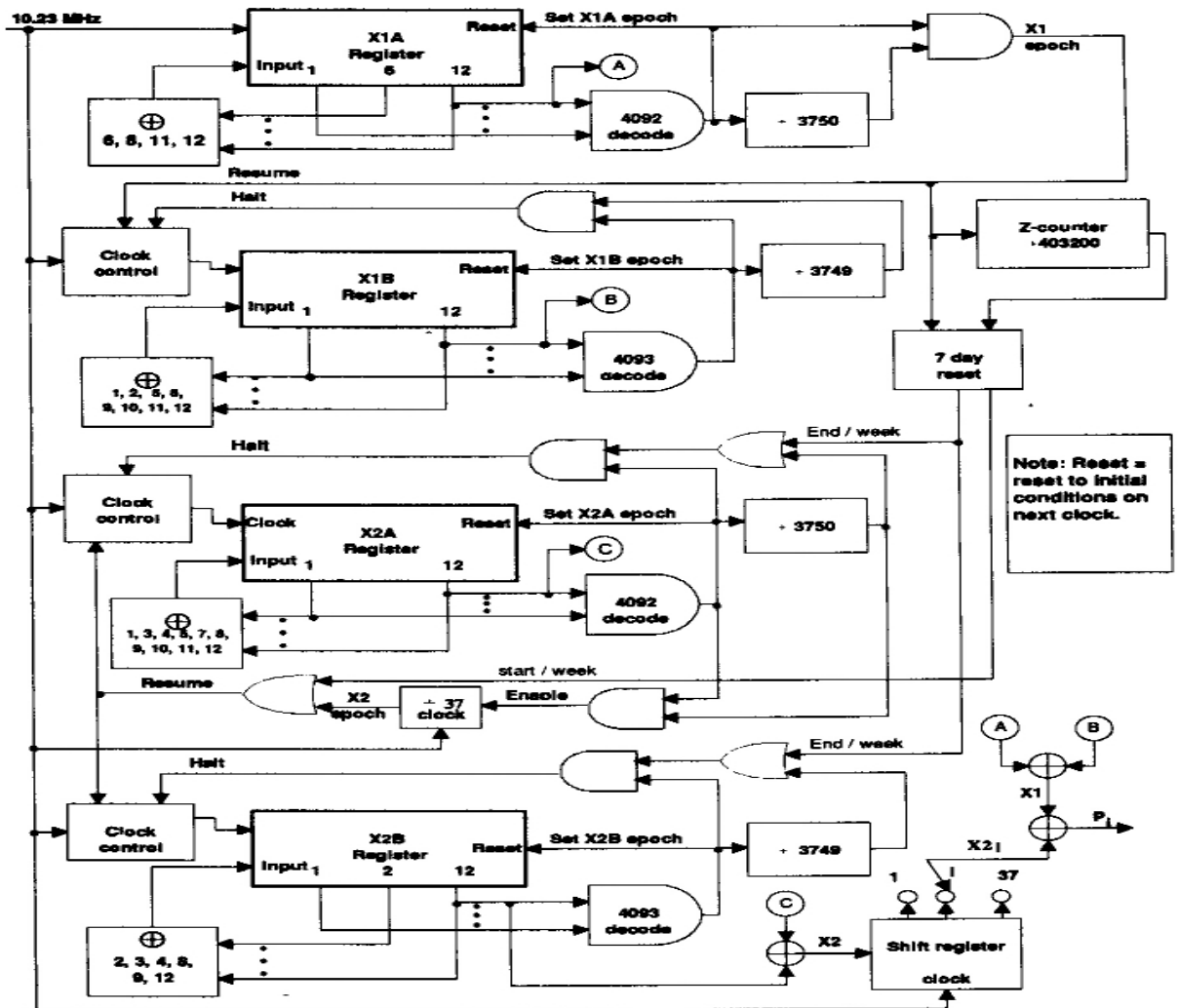


Figura 3.12 Generador de códigos P

El resultado compuesto de X2 es usado para realimentar el retraso del registro de desplazamiento del SV(satélite) y generar los códigos de pseudo rangos y al ser combinadas con el resultado de de X1A Y X1B se genera el código P. Dentro de esta arquitectura de registro de desplazamiento el tamaño de las secuencias de los códigos P podría ser mayor a 38 semanas pero estas están

particionadas dentro de 37 secuencias únicas las cuales son truncadas al final de una semana. Sin embargo la longitud de la secuencia de cada código de ruido pseudoaleatorio (PRN) es $6.1871 \cdot 10^6$ y el periodo de repetición es de 7 días. Las especificaciones de diseño para generar los códigos P de cada uno de los cuatro registros de desplazamiento y lazos de retroalimentación son combinados con un circuito OR exclusivo con cada una de sus respectivas etapas de entradas. Los polinomios que describen la arquitectura de estos registros de desplazamientos retroalimentados se muestran en la tabla 3.3

Haciendo referencia a la figura 3.12 los ciclos naturales de los lazos de realimentación de los 4 registros de desplazamiento son truncados como sigue: X1A y X2A son reseteadas después de 4092 paquetes de datos transmitidos eliminando los últimos tres paquetes de sus 4095 secuencias naturales. Esto da como resultado las secuencias de fase de X1B las cuales son datos encapsulados de los ciclos de secuencias de X1A. Como consecuencia existe una precesión entre fases entre los registros de X1A y X1B. De igual forma existe una precesión de fases en los registros de X2A y X2B. Al comienzo de cada semana los GPS toman sus condiciones iniciales simultáneamente como se ve en la tabla 3.3. Además al final de cada etapa de X1A, X1B, X2A, X2B los registros de desplazamiento correspondientes se ajustan a sus estados iniciales. La salida de registros A y B (salida 12 de los registros) son combinados por un circuito OR exclusivo para formar una secuencia X1 derivada de la función Or exclusiva de X1A y X1B, y la secuencia de X2 derivada de X2A y X2B. La secuencia X2 es retrasada i transmisiones (correspondiente al i -ésimo GPS), para formar X2i. El código P para Svi es

$$P_i = X1 + X2.$$

Además existe un desfase entre los registros de desplazamiento X2A/X2B con respecto a los registros de desplazamiento de X1A/X1B. Esto se manifiesta con un retraso de fase del envío de los 37 paquetes de datos entre X1 y X2. El detalle de estos desfases es como sigue. El periodo de X1 está definido por 3750 ciclos de X1A, es decir que cuando X1A ha realizado 3750 ciclos o $3750 \cdot 4093 = 15345000$ envíos un periodo de $1.5 \text{sec} \cdot X1$ ha ocurrido. Cuando X1B ha realizado 3,749 ciclos de 4093 envíos el detiene su ciclo de operación hasta que los $1.5 \text{sec} \cdot X1$ ocurran. Por lo tanto los registros de X1 tienen un periodo combinado de 15345000 transmisiones de datos (paquetes) en 1.5 seg. X2A y X2B son controlados de la misma forma como X1A y X1B pero con la diferencia que cuando los 15345000 transmisiones de datos han sido completados en los 1.5 seg, X2A y X2B, retienen 37 transmisiones de datos para detener el control del reloj hasta que comience el ciclo X2 o empiece la cuenta de reloj semanal. Es decir en total los registros de X2 manejan un periodo combinado de 15345037.

En el caso de los códigos C/A, 32 secuencias PRN están reservadas para el segmento espacial y de la 33 a la 37 están reservadas para otros usos. EL PRN 38 de los códigos P es usado algunas veces como un código de prueba en los códigos P(y) de los receptores GPS. Un código P único para cada SV es el resultado de los retrasos en las secuencias de salida de X2. La tabla 3.2

muestra estos retratos en los códigos P para cada valor de PRN(ruido pseudo aleatorio). Los retratos en los códigos son idénticos en sus respectivos valores de PRN pero los códigos C/A cambian dichos valores.

3.4 Niveles de Energía.

La tabla 3.4 muestra los niveles mínimos de energía recibida para las tres señales del GPS. Estos niveles están expresados en términos de decibelios con respecto a 1W(dBw). Las señales de energía recibidas están basadas en una polarización lineal de antena con 3dB de ganancia. Desde que los SVs GPS transmiten señales polarizadas con la regla de la mano derecha (RHCP) la tabla es ajustada para valores típicos de RHCP con ganancia unitaria. Debido a esto es que las antenas reciben niveles de señales ligeramente mayores a las señales mínimas transmitidas.

| Parámetro | Código-P L1 | Código C/A L1 | L2 |
|--|--------------------|----------------------|------------|
| Potencia mínima de recepción | -163.0 dBw | -160.0 dBw | -166.0 dBw |
| Ganancia Lineal | 3.0 dB | 3.0 dB | 3.0 dB |
| Perdida de propagación en espacio libre | 184.4 dB | 184.4 dB | 182.3 dB |
| Perdida atmosférica | 2.0 dB | 2.0 dB | 2.0 dB |
| Perdidas por polarización | 3.4 dB | 3.4 dB | 4.4 dB |
| Requerimientos EIRP del satélite | +23.8 dBw | +26.8 dBw | +19.7 dBw |
| Ganancia de antena del satélite @14.3 para el caso de satélite BLKII | 13.5 dB | 13.4 dB | 11.5 dB |
| Requerimientos mínimos de la antena del satélite | +10.3 dBw | +13.4 dBw | +8.2 dBw |
| Potencia de entrada | 10.72 W | 21.88 W | 6.61 W |

Tabla 3.4 tabla de potencias de recepción mínimas de las señales

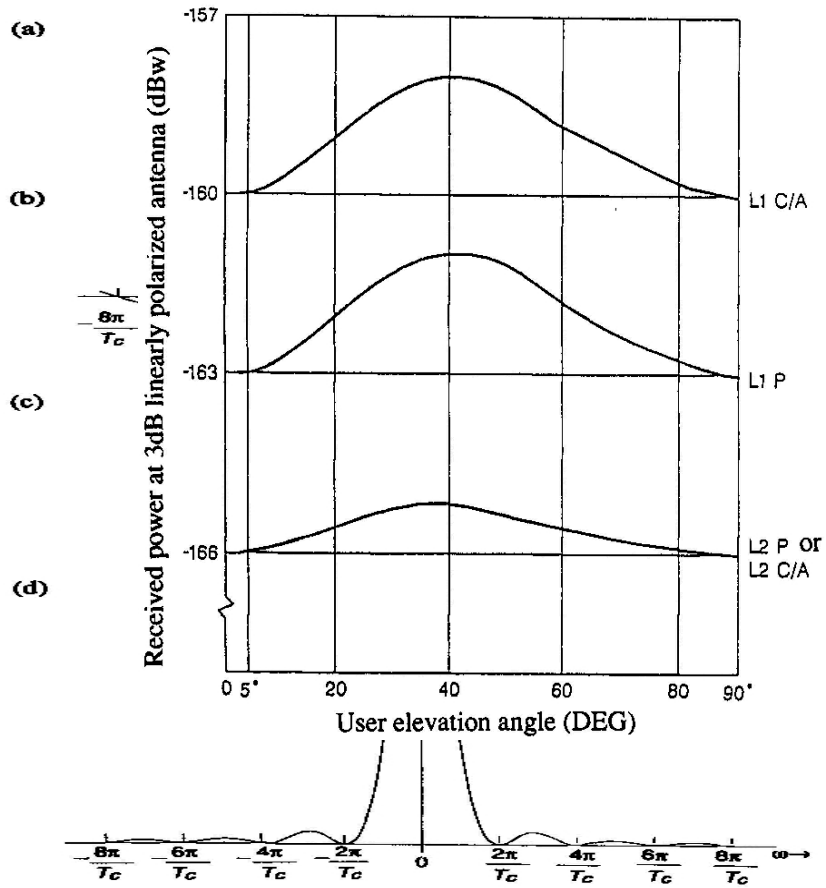


Figura 3.13 Potencia mínima de las señales transmitidas

La figura 3.13 muestra el mínimo nivel de energía que es recibido cuando el SV está en 5 grados de elevación con respecto al horizonte del usuario. Al aumentar el ángulo de elevación, el nivel de energía se incrementa hasta un máximo de 2dB para L1 y arriba de 1dB como máximo para L2 y estas vuelven a decrementarse hasta un valor especificado.

Los niveles de las señales recibidas no deben de exceder los -153.0dBw y los -155.5dBw para los componentes de los códigos C/A y P(y) en L1 respectivamente.

3.5 Autocorrelación y Densidad Espectral.

Las características de auto correlación de los códigos PRN de los GPS son fundamentales para el proceso de demodulación de las señales. La densidad de la potencia espectral de los códigos

PRN de los GPS determinan el ancho de banda requerido para transmitir y recibir las señales del espectro esparcido, las similitudes de los códigos PRN del GPS se harán aparentes cuando las funciones de auto correlación y las señales espectrales sean analizadas por las siguientes señales binarias:

Un pulso rectangular, $f_1(t)$, su amplitud es A y su ancho de banda es T_c . El pulso rectangular se ubica cerca de la referencia en el eje del tiempo, la ecuación para el pulso rectangular se muestra a continuación.

$$f_1(t) = A \quad |t| \leq T_c/2 \quad (3.1)$$

$$f_1(t) = 0$$

Figura 3.14 .(a)Pulso rectangular;(b)Espectro;(c) Función de auto correlación (d)Potencia Espectral

La transformada de Fourier de esta función se denota por la siguiente ecuación.

$$F_1(\omega) = AT_c \left(\frac{\text{sen} \frac{\omega T_c}{2}}{\frac{\omega T_c}{2}} \right) \quad (3.2)$$

Donde:

$\omega = 2\pi f$ (rad/seg)

f = frecuencia (Hz)

La función de autocorrelación de esta función esta definida por:

$$R_1(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(t) f_1(t + \tau) dt \quad (3.3)$$

Es importante entender el proceso matemático de la auto correlación, debido a que este proceso

es experimentado al momento de la recepción de las señales GPS y en la búsqueda de los códigos correspondientes a la función de auto correlación consiste en multiplicar las señales y después cambiar las fases mientras se multiplica con la señal original. Cuando la fase de la réplica es igual a la señal original se obtiene la máxima correlación ($t=0$).

Para un pulso rectangular la función de auto correlación es una onda triangular, la correlación baja linealmente mientras τ cambia hacia la derecha o izquierda del cero hasta que la amplitud de la correlación llega a cero cuando cambia a la derecha o la izquierda de la función original por $T_c/2$ o más. El resultado de la auto correlación triangular la cual es función de un pulso rectangular se muestra en la siguiente ecuación.

$$R_1(\tau) = A^2 T_c \left(1 - \frac{|\tau|}{T_c} \right) \quad \text{para } |\tau| \leq T_c \quad (3.4)$$

$$R_1(\tau) = 0$$

La potencia espectral es una función real y esta puede ser determinada a través de la función de autocorrelación como sigue:

$$S_1(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} R_1(\tau) \cos \omega \tau d\tau \quad (3.5)$$

Para el pulso rectangular la potencia espectral se determina como sigue:

$$S_1(\omega) = \int_{-T_c}^{T_c} A^2 (T_c - |\tau|) \cos \omega \tau d\tau \quad (3.6)$$

La potencia espectral total se determina como sigue:

$$S_1(\omega) = A^2 T_c^2 \left(\frac{\text{sen } \frac{\omega T_c}{2}}{\frac{\omega T_c}{2}} \right)^2 \equiv A^2 T_c^2 \text{sen}^2 \frac{\omega T_c}{2} \quad (3.7)$$

Debido a que muchas funciones no tienen transformada de Fourier el proceso usual es obtener la función espectral de la función de autocorrelación, pudiendo obtenerse de cada función temporal. Por ejemplo para un código binario aleatorio no hay una función de auto correlación. La función de auto correlación de un código binario aleatorio es similar a la de un pulso rectangular como se ve en 3.14 Si $r(t)$ es un código binario pseudo aleatorio con una amplitud de $\pm A$ y un periodo de T_c como se muestra en la figura 3.14a, entonces la función de auto correlación que se ve en 3.14b es definida como la ecuación (3).

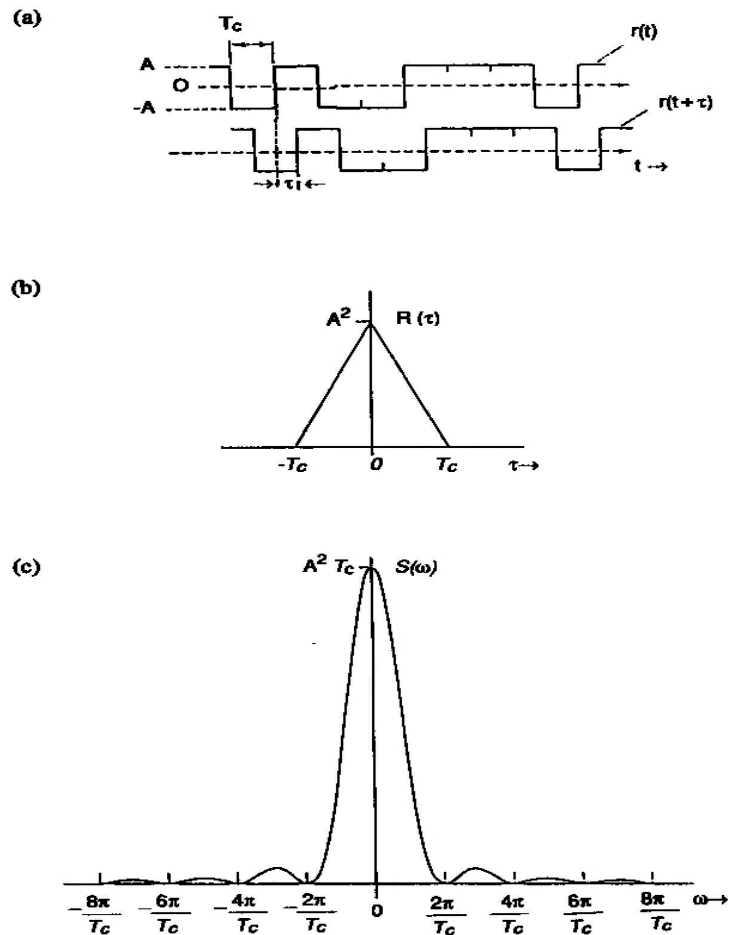


Figura 3.14 (a)Rango binario;(b) Función de auto correlación;(c)Potencia espectral

La potencia espectral de esta señal se puede obtener con la transformada de Fourier de la función de auto correlación . Sin embargo la potencia espectral de un código binario pseudoaleatorio se muestra en la figura 3.14c y se define por la siguiente ecuación.

$$S(\omega) = A^2 T_c \left(\frac{\sin \frac{\omega T_c}{2}}{\frac{\omega T_c}{2}} \right)^2 \equiv A^2 T_c \operatorname{sinc}^2 \frac{\omega T_c}{2} \quad (3.10)$$

Es de notar que la función de autocorrelación de un código binario pseudoaleatorio difiere de un pulso rectangular por un factor de escala T_c . El pulso rectangular se correlaciona ha si mismo. Los satélites GPS usan códigos con funciones similares de auto correlación y de potencia espectral para los códigos binarios pseudoaleatorios, pero los códigos GPS son periódicos,predecibles y reproducibles. Debido a que los códigos PRN de los GPS son derivados de secuencias PN, las funciones de auto correlación y potencia espectral pueden ser descritas.

La función de autocorrelación para una secuencia máxima PN es una serie infinita de funciones triangulares con un periodo nT_c (segundos) y se muestra en la figura 3.15 cuando la fase es elevada hasta un valor (τ) y es más grande que $\pm T_c$ o múltiplos de $\pm T_c * (N \pm 1)$. Y representa un término dc en la serie. Expresando la ecuación 3.6 para la función matemática de auto correlación se requiere el uso de la función impulso unitario en un intervalo de tiempo por incrementos discretos (m) de secuencias PN nT_c : $\delta(\tau + m nT_c)$. Utilizando esta notación la función de auto correlación puede ser expresada como la suma de los términos dc y una serie infinita de funciones triangulares $R(\tau)$ definida en la ecuación 4.9 La serie infinita de la función triangular es obtenida por la convolución (\otimes) de $R(\tau)$ con una serie infinita de funciones impulsos unitarios como sigue.

$$R_{PN}(\tau) = \frac{-A^2}{N} + \frac{N+1}{N} R(\tau) \otimes \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\tau + mNT_c) \quad (3.12)$$

La potencia espectral de esta secuencia periódica PN se deriva de la transformada de Fourier de (3.12) y esta se ve en la figura 3.17b. Además la función de impulso unitario requerida para expresar esta función es como sigue.

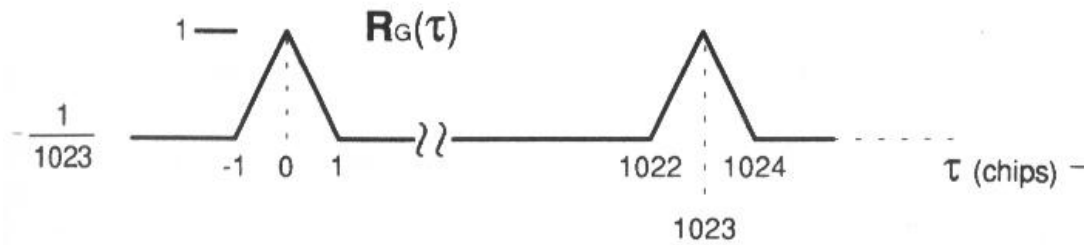


Figura 3.15 autocorrelación simplificada y normalizada de un código C/A contra transmisión de datos

Los códigos GPS PRN tienen una correlación triangular periódica y una línea espectral que se asemeja a la máxima longitud de los registros de cambio de las secuencias P, pero con diferencias muy leves. Esto se debe a que los códigos GPS PRN no son secuencias de registros de cambios de longitudes máximas.

Por ejemplo para los códigos C/A con un registro de cambio de 10 bits y existen 30 secuencias de longitud máxima disponibles y la correlación cruzada entre estos códigos, no es buena para el funcionamiento de los GPS. Otro problema existente es que la función de auto correlación de las secuencias de longitud máxima se da en periodos de integración muy cortos.

En los receptores GPS el tiempo de integración y descarga asociados con los códigos C/A reproducidos con el código del SV entrante es típicamente de 1 a 5 mseg. Pero este puede ser mayor como por ejemplo cuando el GPS trabaja en un modo especializado llamado WIPEOFF aquí los tiempos de integración y descarga pueden ser de hasta 20 segundos.

Durante los modos de búsqueda esos tiempos cortos de integración y descarga para las secuencias de longitud máximas incrementan la posibilidad de que el receptor sea conducido a realizar una mala correlación en los datos que este recibe. Usando la función OR exclusiva de los registros de cambio de longitud máxima G1 y G2 existen $2n-1$ posibles retrasos. Sin embargo existen 1023 códigos importantes para la arquitectura del regenerador de los códigos C/A. La función de auto correlación de los códigos C/A del GPS son:

$$R_G(\tau) = \frac{1}{1,023T_{CA}} \int_{t=0}^{t=1023} G_i(t)G_i(t + \tau)dt \quad (3.14)$$

Donde:

$G_i(t)$ = Código C/A de cada secuencia de tiempo t para cada SV.

T_{CA} = Periodo de transmisión para cada código C/A

τ = Fase para cada cambio de tiempo de la función de autocorrelación

La función de autocorrelación de los códigos C/A es una serie de triángulos de correlación con un periodo de 1023 envíos de códigos C/A o 1 milisegundo como se ve la figura 3.16(a), la función de auto correlación de los códigos C/A tienen el mismo periodo y la misma forma en los intervalos de auto correlación como en los tamaños de las secuencias PN. Las pequeñas fluctuaciones en la función de autocorrelación de los códigos C/A resulta en una desviación de la línea espectral de el sinc^2 como se ve en 3.16b. La figura 3.16c ilustra que el radio de energía en cada línea C/A del total de energía del espectro planteado en decibeles, este fluctúa con respecto a los -30db que se deberían de tener si cada línea contienen la misma energía.

La función de auto correlación de los códigos P(Y) de los GPS es:

$$R_p(\tau) = \frac{1}{6.1871 \times 10^{12} T_{CP}} \int_{t=0}^{t=6.1871 \times 10^{12}} P_i(t) P_i(t + \tau) dt \quad (3.15)$$

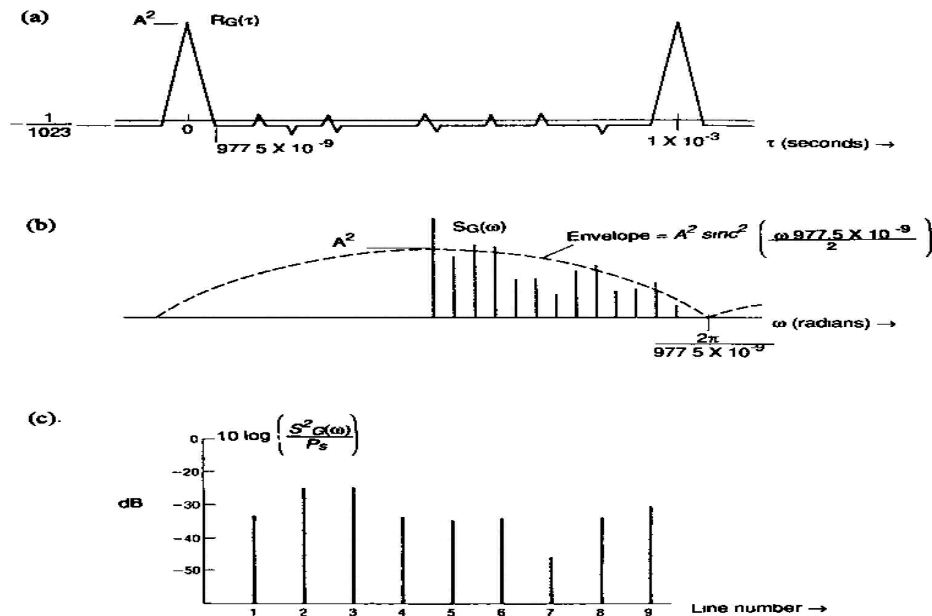


Figura 3.16 Autocorrelación, (b) Espectro,(c) Radio de potencia de un código C/A

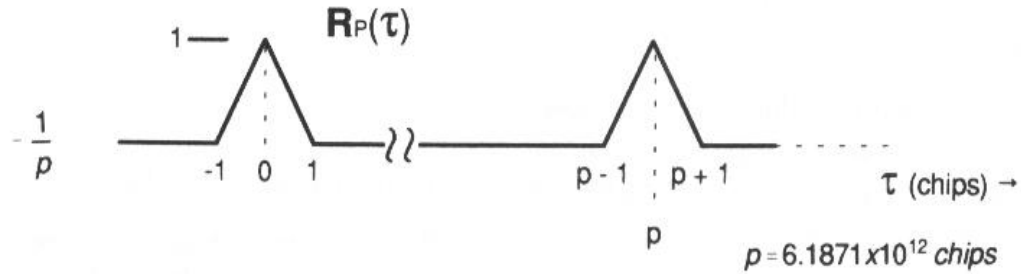


Figura 3.17 función de auto correlación de un código P(y) contra envío de datos

El código P(y) no es el código con la secuencia de longitud máxima, pero como su período es largo y su tasa de transmisión es rápida y sus características de autocorrelación son ideales lo hace utilizable. El código P(y) fue diseñado para tener un período de una semana con periodos por etapas arriba de 403200 de 1.5secX1 a esto se le denomina conteo Z. La figura 3.17 muestra una función de auto correlación normalizada para los códigos P(y) (amplitud $A \pm 1$) con cambio de fase en el eje τ y con unidades de P(Y) en términos de envíos de datos(chips).

La función de autocorrelación para los códigos P(y) tiene características similares a los códigos C/A pero con valores diferentes en cada caso la tabla 3.6 compara estas características. En la tabla podemos observar algunos detalles como por ejemplo: que los códigos P(y) no se correlacionan a si mismos(típicamente -127.9dB) para todos los intervalos, fuera de este intervalo de correlación de la misma manera para los códigos C/A pero con un valor de -30.1dB.

| Parámetro | Código - C/A | Código - P(Y) |
|--|-------------------------|---------------------------------|
| Máxima amplitud de autocorrelación | 1 | 1 |
| Tipica amplitud de autocorrelación fuera del intervalo de correlación | -(1/1023) | -(1/6.1871 x 10 ¹²) |
| Tipica autocorrelación (fuera del intervalo de correlación) en dB con respecto a la máxima correlación | -30.1 | -127.9 |
| Periodo de autocorrelación | 1 ms | 1 semana |
| Intervalo de autocorrelación (chips) | 2 | 2 |
| Intervalo de tiempo de autocorrelación (nseg) | 1955.0 | 195.5 |
| Intervalo del rango de autocorrelación (m) | 586.1 | 58.6 |
| R _c Tasa de chips (chips/seg) | 1.023 x 10 ⁶ | 10.23 x 10 ⁶ |
| T _c Periodo de chips (nseg) | 977.5 | 97.8 |
| Rango de un chip (m) | 293.0 | 29.3 |

Tabla 3.6 comparaciones de correlación entre los códigos C/A y P(y).

Cuando los códigos del GPS son combinados con los datos de navegación a 50Hz se produce un efecto imperceptible en el resultado de las funciones de autocorrelación y la potencia espectral. Cuando estas son moduladas sobre la portadora de la banda L se produce una traslación de la potencia espectral de la banda L desde las frecuencias de la banda base. La figura 3.18 muestra la potencia espectral de los códigos P(Y) y C/A de los GPS modulados en PSK de la portadora L1 a 50Hz.

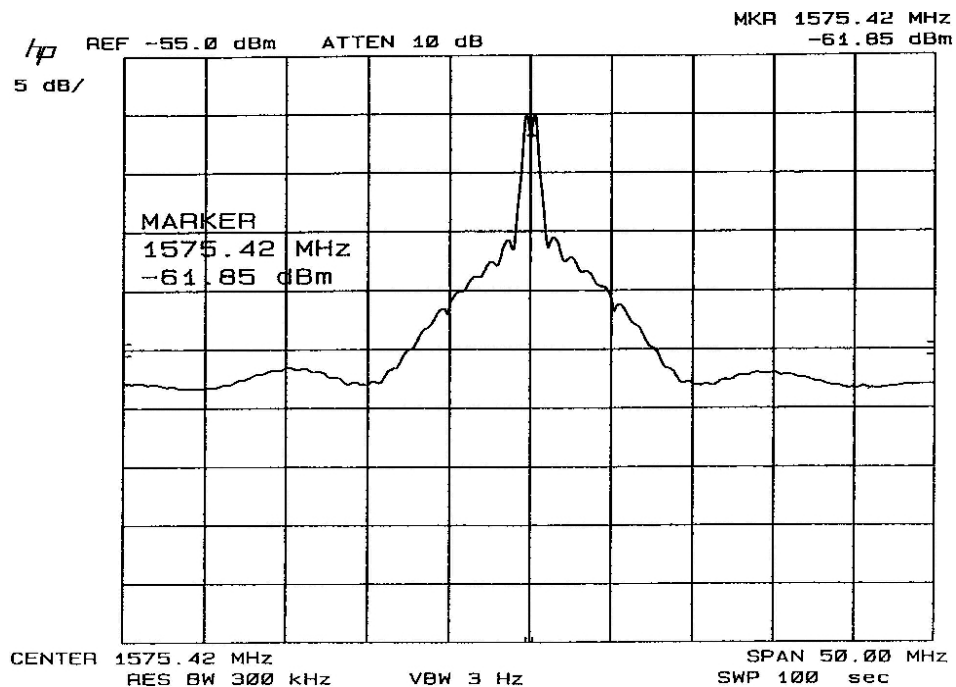


Figura 3.18 Potencia espectral del código C/A y P (y) del generador de códigos

El analizador de espectro se utilizó con una resolución de 300KHz aunque cabe recalcar que es imposible observar las características lineales del espectro de cualquier código aunque estos aparenten ser lineales. La frecuencia central esta en la portadora L1 a 1.575Mhz. El primer cero de la potencia espectral de el código C/A esta en ± 1.023 Mhz de la frecuencia central y el primer cero del código P(y) esta en ± 10.23 Mhz de la frecuencia central.

La figura 3.19 muestra la potencia espectral del código P(y) (a 50 Hz) esta modulada en PSK modulada sobre la portadora L2. La gráfica es idéntica a la gráfica 3.19 excepto que la frecuencia

central esta en la portadora L2 y que el código C/A ha sido removido.

La figura 3.20 es la gráfica de la potencia espectral de el código C/A del GPS modulado en PSK en la portadora L1.

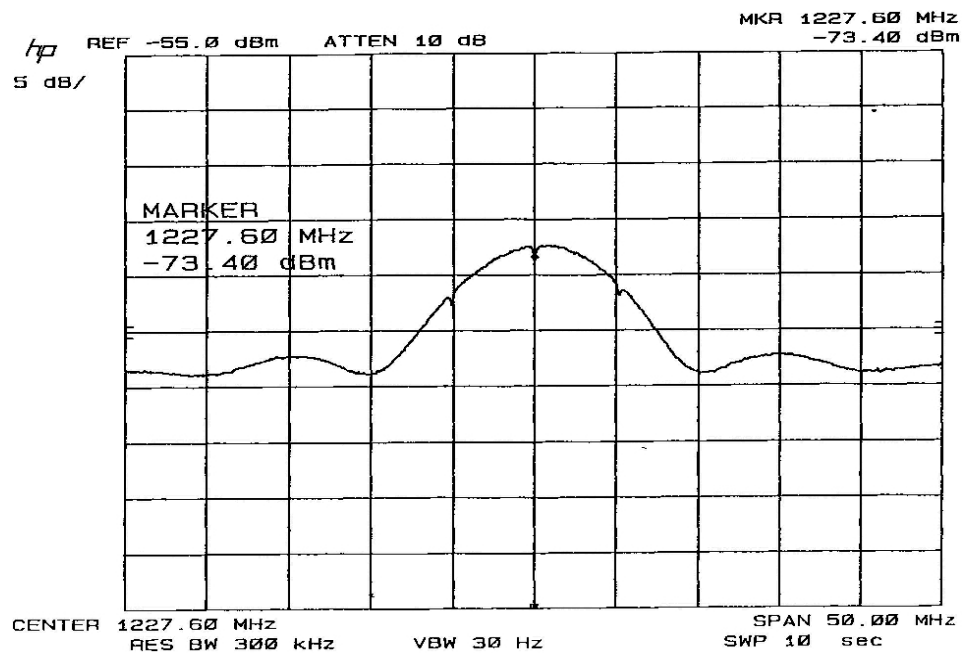


Figura 3.19 Potencia espectral de L2 P(y) del generador de códigos

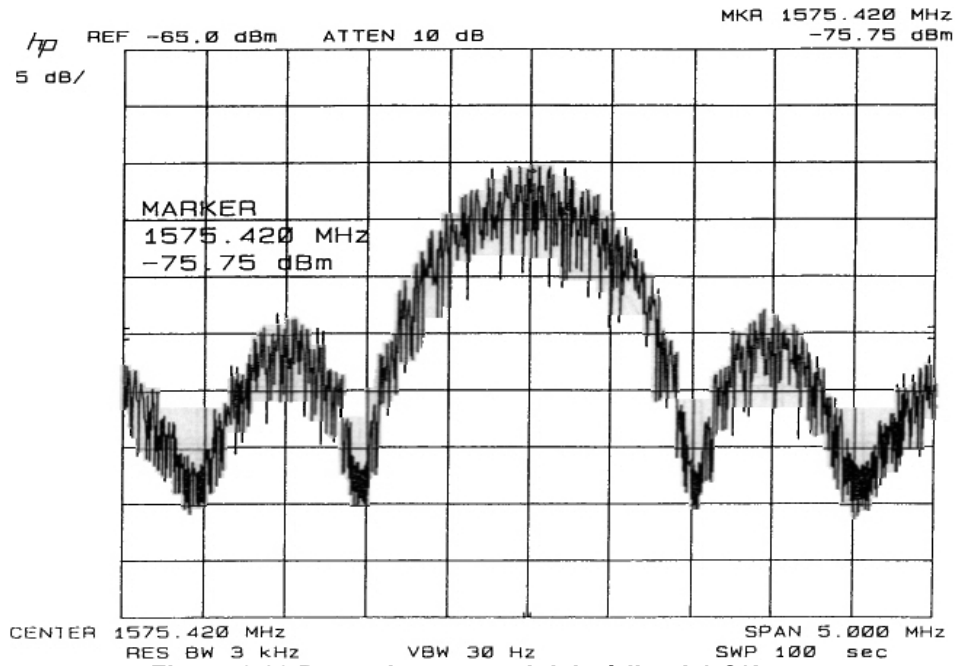


Figura 3.20 Potencia espectral del código L1 C/A.

CAPITULO IV

Rendimiento de los GPS-DGPS

4.1 Rendimiento de los GPS-DGPS

4.1.1 Fuentes de error, precisión en la medida y estimaciones de posición y tiempo del usuario.

La precisión con la cual un receptor de usuario puede determinar su posición y velocidad, o sincronizarse al sistema de tiempo del GPS, depende de una interacción de varios factores. En general, la precisión del GPS depende de la medida del pseudorango y el delta del pseudorango, como también de los datos de las efemérides. Además, la fidelidad del modelo físico subestimado que relaciona estos parámetros es muy importante. Por ejemplo, la precisión a la cual el reloj del satélite se desplaza relativamente al sistema de tiempo del DGPS es conocida para el usuario, o la precisión con la cual los errores de propagación del-satélite al usuario se compensan, son importantes. Los errores relevantes son inducidos por los segmentos de control, espacio y usuario.

Para analizar el efecto de los errores en la precisión, una asunción fundamental se hace comúnmente, esta es que las fuentes de error pueden ser asignadas a pseudorangos de cada satélite individual y puede ser visto efectivamente como un error en los valores resultantes de los pseudorangos. La precisión efectiva del valor del pseudorango tiene como término el *error de rango equivalente del usuario* (en inglés UERE).

El UERE para un satélite dado se considera como la suma (estadística) de las contribuciones de cada una de las fuentes de error asociadas con el satélite. Comúnmente, las componentes de error se consideran independientes y el UERE compuesto para un satélite se aproxima como una variable aleatoria Gaussiana de media cero donde su varianza se determina como la suma de las varianzas de cada una de sus componentes. El UERE se asume comúnmente que es independiente y distribuido idénticamente de satélite a satélite. Sin embargo, para ciertas ampliaciones de GPS, es algunas veces apropiado para estas asunciones que sean modificadas. (Por ejemplo, si uno se considera la suma de los satélites de alcance geosíncronicos (GEOS, en inglés) a la constelación GPS, el UERE asociado con el GEOS puede modelarse con una varianza diferente, comparada a la constelación estándar de satélites dependiendo de las características de diseño de los satélites. En otras situaciones, puede ser apropiado modelar ciertas componentes del UERE correlacionadas entre los satélites.

La precisión de la solución posición/tiempo determinada por el DGPS se expresa como el producto de un factor geométrico y un factor de error de pseudorango. Es decir, el error en la solución del DGPS se calcula por la fórmula:

$$(\text{error en la solución DGPS}) = (\text{factor de geometría}) \times (\text{factor de error de pseudorango}) \quad (4.1)$$

Bajo las asunciones apropiadas, el factor de error de pseudorange es el UERE del satélite. El factor de geometría expresa el efecto compuesto de la geometría relativa satélite/usuario en el error de solución del GPS.

Se llama genéricamente la dilución de la precisión (DOP, en inglés) asociado con la geometría satélite/usuario. Una variedad de factores de geometría están definidos y son usados en la estimación de varios componentes (por ejemplo, la vertical, la horizontal) de la solución de navegación del GPS.

4.1.2 Errores de pseudorange

Los efectos de los desplazamientos del reloj del satélite y el receptor y varias fuentes de error “corrompen” las mediciones de rango de la geometría satélite-al-usuario. Las señales del satélite experimentan retrasos cuando se propagan a través de la atmósfera. Además, las reflexiones (es decir, múltiples rutas), SA y efectos del hardware entre el centro de fase de la antena del usuario y el punto de correlación del código del receptor pueden retrasar (o adelantar) la señal. El desplazamiento de tiempo total debido a todos estos efectos es:

$$\delta t_D = \delta t_{atm} + \delta t_{ruido\&res} + \delta t_{mr} + \delta t_{hw} + \delta t_{SA}$$

Donde

| | | |
|-------------------------|---|---|
| δt_{atm} | = | retraso debido a la atmósfera |
| $\delta t_{ruido\&res}$ | = | ruido del receptor y desplazamiento de resolución |
| δt_{mr} | = | desplazamiento por múltiples rutas |
| δt_{hw} | = | desplazamientos por el hardware del receptor |
| δt_{SA} | = | degradación de SA |

El equivalente del tiempo de pseudorange es la diferencia entre la lectura del reloj del receptor cuando la señal (es decir, una fase del código particular) fue recibida y la lectura del reloj del satélite cuando la señal se envió. Esta relación de tiempos se muestra en la Figura 4.1, donde

| | | |
|------------|---|--|
| Δt | = | equivalente de tiempo del rango equivalente |
| T_s | = | tiempo del sistema en el cual la señal deja el satélite |
| T_U | = | tiempo del sistema en el cual la señal tendría que haber alcanzado el receptor del usuario sin el δt_D (teórica) |
| T'_U | = | tiempo del sistema en el cual la señal alcanza el receptor del usuario con δt_D |
| δt | = | desplazamiento del reloj del satélite desde el tiempo del sistema (adelanto es positivo; retardo (retraso) es negativo) |
| t_U | = | desplazamiento del reloj del receptor desde el tiempo del sistema |

- $T_s + \delta t =$ lectura del reloj del satélite en el tiempo en el cual la señal deja el satélite
- $T'_u + t_u =$ lectura del reloj del usuario en el tiempo cuando la señal alcanza el receptor del usuario
- $c =$ velocidad de la luz

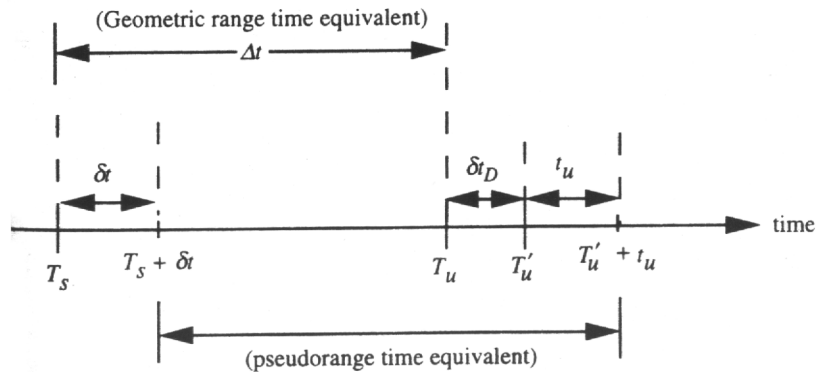


Figura 4.1. Relaciones de tiempo en la medición de rangos.

Se observa que el pseudorange ρ es:

$$\begin{aligned} \rho &= c [(T'_u + t_u) - (T_s + \delta t)] \\ &= c (T'_u - T_s) + c (t_u - \delta t) \\ &= c (T_u + \delta t_D - T_s) + c (t_u - \delta t) \\ &= \tau + c (t_u - \delta t + \delta t_D) \end{aligned}$$

Donde τ es el rango geométrico

$$\tau = c (T_u - T_s) = c \Delta t$$

Los retrasos de hardware, δt_{hw} , son también referidos al punto de operación y no serán discutidos ya que son muy pequeños en comparación con todas las otras fuentes de error.

4.1.2.1 Error del reloj del satélites

Los satélites contienen relojes atómicos que controlan todas las operaciones temporizadas a bordo incluyendo la generación de señales de transmisión. Aunque estos relojes son altamente

estables, δt puede desviarse hasta aproximadamente 1 ms desde el tiempo del sistema GPS . (Un desplazamiento de 1ms trasladado a un error de pseudorange de 300-km). Los errores de rango inducidos por errores del reloj son en el orden de 3.0m (1σ) . La estación de control maestro (MCL, en inglés) determina y transmite los parámetros de correlación del reloj a los satélites por retransmisión en el mensaje de navegación .

Estos parámetros de correlación se implementan por el receptor usando el polinomio de segundo orden

$$\delta t = a_{f0} + a_{f1} (t - t_{\alpha}) + a_{f2} (t - t_{\alpha})^2 + \Delta t_r \quad (4.2)$$

Donde

| | | |
|------------|---|---|
| a_{f0} | = | punto de operación del reloj (s) |
| a_{f1} | = | flotación del reloj (s/s) |
| a_{f2} | = | flotación de la frecuencia (es decir, envejecimiento) (s/s ²) |
| t_{oc} | = | reloj de tiempo de referencia de datos (s) |
| t | = | época del tiempo actual (s) |
| Δt | = | correlación debida a efectos relativistas (s) |

La correlación Δt , compensa para una de tres efectos relativistas relacionados al GPS. Ya que los parámetros anteriores son estimaciones “acomodadas” de los errores de reloj del satélite, algún error residual permanecerá.

4.1.2.2 Error de predicción de efemérides

La estimación óptima de la efemérides para todos los satélites se calcula y se adhiere a los satélites con otros parámetros de mensaje de datos de navegación para retransmitirlos al usuario. Como en el caso de la correlación del reloj del satélite, estas correlaciones son estimadas y contienen error residual. El error residual es un vector que se ilustra en la Figura 4.2. La magnitud de este error se entiende como un error de pseudorange efectivo al proyectar el vector de la línea de visión del satélite al usuario. El error de pseudorange efectivo está en el orden de 4.2m (1σ).

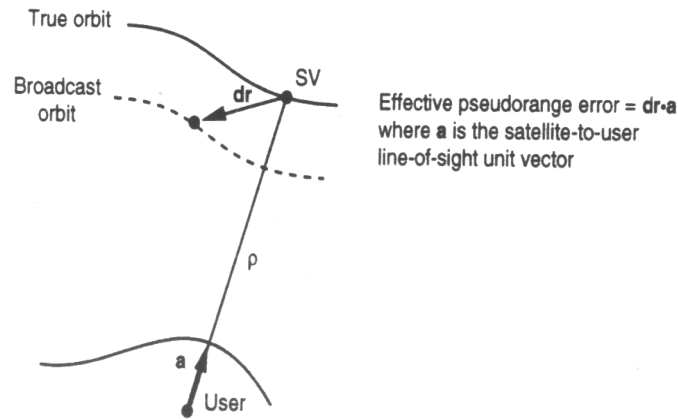


Figura 4.2. Error de efemérides

4.1.2.3 SA DGPS.

La fuente única de error más grande para usuarios SPS es la SA. La SA se induce intencionalmente por el DOD para degradar la solución de navegación del usuario. La SA fue formalmente implementada el 25 de Marzo de 1990. La degradación se cumple a través de la manipulación de los datos de efemérides transmitidos (componente de error orbital) y a través de movimientos del reloj del satélite (componente de error del reloj). La componente de error orbital se referencia por epsilon, ϵ , mientras que la componente movida se denota por δ .

La aparición de la SA a través del movimiento del reloj resulta en un disturbio variable en el tiempo del pseudorange que se muestra en la Figura 4.3. Se observa que el error de reloj de muestra una tendencia consistente de oscilación aleatoria con periodos en el orden de 4 a 12 minutos con variaciones en el error de pseudorange de hasta 70m. Debido al hecho de que la SA se genera en el lado del transmisor (es decir el satélite), esta componente de error está correlacionada espacialmente. La correlación espacial significa que hay una fuerte relación entre el error en una localidad y el error en una localidad cercana. Esta propiedades de la SA puede explotarse para eliminar el error si se emplea DGPS. La DGPS remueve todos los errores que comúnmente están en la estación monitoreo terrestre del GPS local y en el receptor del usuario.

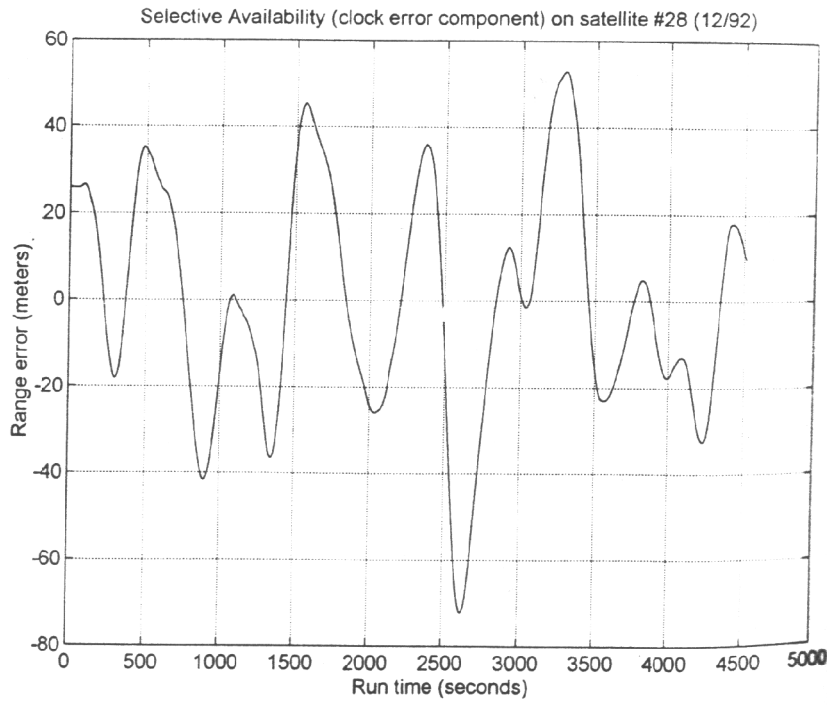


Figura 4.3. SA (componente de error del reloj), satélite #28, Dic. 1992

Se ha hecho mucho esfuerzo en el modelado e identificación de la componente SA del reloj. El resultado son muchos modelos diferentes y mayor optimización contra SA que pueden determinarse a través de las técnicas más frecuentes para modelar la componente SA del reloj. Globalmente, las mejoras de los modelos DGPS pueden dividirse en modelos estocásticos y determinísticos.

Como se especificó anteriormente, otra forma de la SA es la manipulación de la efeméride transmitida. La introducción de errores intencionales en los parámetros de la efeméride resultará en la determinación de una posición del satélite errónea por el usuario. Los datos de efemérides transmitidos contienen 15 parámetros, lo cual significa que los errores podrían inducirse de varias formas. El error de pseudorange efectivo ϵ sería la suma vectorial del error de efeméride residual y la componente orbital de la SA proyectada en el vector de línea de visión del satélite al usuario.

4.1.2.4 Efectos Relativistas

Las teorías especial y general de la relatividad son factores en el proceso de medición del pseudorange. La necesidad para las correcciones relativistas de la relatividad especial (SR) aumentan en cualquier momento que la fuente de señal (en este caso, los satélites GPS) o el

receptor de señal (receptor GPS) se estén moviendo con respecto al marco de referencia de la velocidad de la luz isotrópico elegido, el cual en el sistema GPS es el marco ECI. La necesidad por las correcciones relativistas de la relatividad general (GR) aumentan en cualquier momento que la fuente de señal y la señal del receptor estén colocados en diferentes potenciales gravitacionales.

El reloj del satélite se ve afectado por ambas relatividades especial y general. De modo de compensar ambos efectos, la frecuencia del reloj del satélite se ajusta a 10.22999999545 MHz antes del lanzamiento. La frecuencia observada por el usuario al nivel del mar será 10.23 MHz; por lo tanto, el usuario no tiene que corregir este efecto.

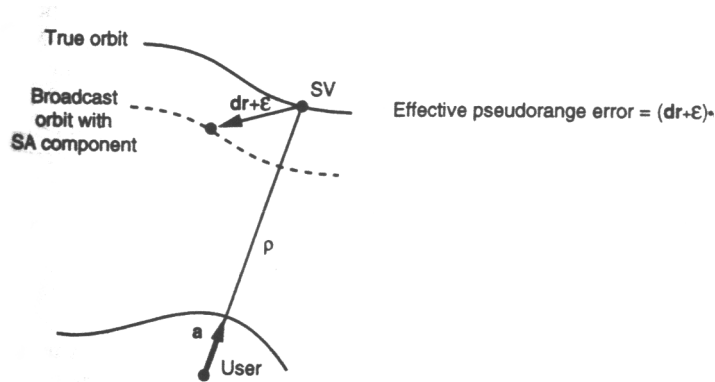


Figura 4.4. Efecto combinado de la componente de error orbital SA y error de predicción de efemérides.

El usuario tiene que hacer una corrección para otro efecto periódico relativista que aumenta debido a la leve excentricidad de la órbita del satélite. Exactamente la mitad del efecto periódico es causado por el cambio periódico de la velocidad del satélite relativo al marco ECI y la mitad es causada por el cambio periódico del satélite en su potencial gravitacional

Cuando el satélite está en su perigeo, la velocidad del satélite es la mayor y el potencial gravitacional es el más bajo, ambos hacen que el reloj del satélite corra más lento. Cuando el satélite está en el apogeo, la velocidad del satélite es la más baja y el potencial gravitacional es el mayor, ambas causan que el reloj del satélite corra más rápido. Este efecto puede compensarse por :

$$\Delta t_r = Fe\sqrt{A} \sin E_k \quad (4.3)$$

donde

$$F = -4.442807633 \times 10^{-10} \text{ s/m}$$

$$e = \text{Excentricidad de la órbita del satélite}$$

A = Eje semimayor de la órbita del satélite
 E_k = anormalidad excéntrica de la órbita del satélite

Estos efectos relativistas pueden alcanzar un máximo de 70 ns (en el rango de 21m). Corregir el reloj del satélite contra este efecto relativista resultará en una estimación más precisa del tiempo de transmisión por el usuario.

Debido a la rotación de la tierra durante el tiempo de la transmisión de la señal, un error relativista se introduce el cual se llama el efecto Sagnac. Durante el tiempo de propagación de la señal de transmisión del SV, un reloj en la superficie de la Tierra experimentará una rotación finita con respecto al marco de referencia fijado en el geocentro. La Figura 4.5 muestra este fenómeno conocido como el efecto Sagnac. Claramente, si el usuario experimenta una rotación neta en el camino del SV, el tiempo de propagación aumentará y viceversa. Por ejemplo, un usuario transportado por aire viajando al este a Mach 2.5 (838.2 m/s) de modo que la rotación de la Tierra y la velocidad del avión se sumen, totalizando 1365 m/s, experimentaría un error de 2.7m sobre una época de 100s bajo el peor caso de geometría SV/usuario.

Finalmente, la señal GPS experimenta la curvatura espacio-tiempo debida al campo gravitacional de la Tierra. La magnitud de este efecto relativista va desde 0.001 ppm en el posicionamiento relativa hasta cerca de 18.7 mm para el posicionamiento puntual.

4.1.2.5 Efectos atmosfericos

La velocidad de propagación de una onda en un medio puede expresarse en términos del índice de refracción del medio. El índice de refracción se define como la relación de la velocidad de propagación de la onda en el espacio vacío a la misma en el medio por la fórmula:

$$n = \frac{c}{v} \quad (4.4)$$

Para WGS-84, $c = 299,792,548$ m/s. El medio es dispersivo si la velocidad de propagación (o equivalentemente, el índice de refracción) es una función de la frecuencia de onda. En un medio disperso, la velocidad de propagación v_p de la fase portadora de la señal difiere de la velocidad v_g asociadas con las ondas que llevan la información de la señal. El aspecto de la portadora de información puede ser pensado como un grupo de ondas viajando a frecuencias levemente diferentes.

Para clarificar los conceptos de velocidades de grupo y fase, se consideran dos componentes, S_1 y S_2 , de una onda electromagnética con frecuencias f_1 y f_2 (o ω_1 y ω_2) y las velocidades de fase v_1 y v_2 , viajando en la dirección x. La suma S de estas señales es

$$S = S_1 + S_2 = \sin \omega_1 \left(t - \frac{x}{v_1} \right) + \sin \omega_2 \left(t - \frac{x}{v_2} \right)$$

Usando la identidad trigonométrica,

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \cos \frac{1}{2} (\alpha - \beta) \sin \frac{1}{2} (\alpha + \beta)$$

encontramos que

$$S = 2 \cos \left[\frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2) t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} - \frac{\omega_2}{v_2} \right) x \right] \times \sin \left[\frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_2) t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} + \frac{\omega_2}{v_2} \right) x \right]$$

$$= 2 \cos \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2) \left[t - \frac{x}{\frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2)} \right] \times \sin \left[\frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_2) t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} + \frac{\omega_2}{v_2} \right) x \right]$$

$$= 2 \cos \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2) \left[t - \frac{x}{\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} - \frac{\omega_2}{v_2} \right)} \right] \times \sin \left[\frac{1}{2} (\omega_1 + \omega_2) t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} + \frac{\omega_2}{v_2} \right) x \right]$$

La parte coseno es un grupo de onda (la modulación impuesta sobre la sinusoide – esa parte de la onda que lleva la información) que se mueve con velocidad

$$v_g = \frac{\frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2)}{\frac{1}{2} \left(\frac{\omega_1}{v_1} - \frac{\omega_2}{v_2} \right)} = \frac{2\pi (f_1 - f_2)}{2\pi \left(\frac{f_1}{v_1} - \frac{f_2}{v_2} \right)} = \frac{f_1 - f_2}{\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2}} = \frac{\left(\frac{v_1}{\lambda_1} - \frac{v_2}{\lambda_2} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)}$$

$$= \frac{\left(\frac{v_1}{\lambda_1} - \frac{v_1}{\lambda_2} + \frac{v_1}{\lambda_2} - \frac{v_2}{\lambda_2} \right)}{\left(\frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right)} = v_1 - \lambda_1 \frac{(v_2 - v_1)}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \quad (4.5)$$

Donde λ_1 y λ_2 son las longitudes de ondas de las señales correspondientes.

Para anchos de banda angostos, tales como los encontrados en señales GPS, podemos reemplazar $v_2 - v_1$ por el diferencial dv , $\lambda_2 - \lambda_1$ por el diferencia $d\lambda$ y λ_1 por λ , y agregar el subíndice p a v para denotar explícitamente velocidad de fase y obtener

$$v_g = v_p - \lambda \frac{dv_p}{d\lambda} \quad (4.6)$$

La cual implica que la diferencia entre la velocidad de grupo y la velocidad de fase depende en ambas de la longitud de onda y de la razón de cambio de la velocidad de fase con la longitud de onda.

Los correspondientes índices de refracción se relacionan por

$$n_g = n_p + f \frac{dn_p}{df} \quad (4.7)$$

Donde los índices de refracción se definen por

$$n_p = \frac{c}{v_p} \quad n_g = \frac{c}{v_g} \quad (4.8)$$

Y f denota la frecuencia de la señal. En un medio no dispersivo, la propagación de onda es independiente de la frecuencia y la fase de la señal y la información de la señal se propagan a la misma velocidad con $v_g = v_p$ y $n_g = n_p$.

4.1.2.6 Efectos Ionosféricos

La ionósfera es un medio dispersivo colocado en la región de la atmósfera entre los 70 km y 1000 km arriba de la superficie terrestre. Entre esta región, los rayos ultravioleta del Sol ionizan una porción de moléculas de gas y liberan electrones. Estos electrones libres influyen la propagación de las ondas electromagnéticas, incluyendo la transmisión de señales GPS de los satélites.

Lo siguiente está basado en un desarrollo similar en la referencia . El índice de refracción para la propagación de fase en la ionosfera puede aproximarse como:

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} + \frac{c_3}{f^3} + \frac{c_4}{f^4} \dots \quad (4.9)$$

Donde los coeficientes c_2 , c_3 y c_4 son frecuentemente independientes pero son una función del número de electrones (es decir, la densidad de electrones) a lo largo de la ruta de propagación de la señal del satélite al usuario. La densidad de electrones se denota como n_e . Una expresión similar para n_g puede obtenerse al derivar (4.9) con respecto a la frecuencia y sustituir el resultado con (4.9) en (4.7). El resultado es lo siguiente

$$n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} - \frac{2c_3}{f^3} - \frac{3c_4}{f^4} \dots$$

Para primer orden, estas aproximaciones son

$$n_p = 1 + \frac{c_2}{f^2} \quad n_g = 1 - \frac{c_2}{f^2} \quad (4.10)$$

El coeficiente c_2 se ha estimado como $c_2 = -40.3n_e \text{ Hz}^2$. Rescribiendo los campos anteriores

$$n_p = 1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \quad n_g = 1 + \frac{40.3n_e}{f^2} \quad (4.11)$$

Usando (7.8), las velocidades de fase y de grupo se estiman como

$$v_p = \frac{c}{1 - \frac{40.3n_e}{f^2}} \quad v_g = \frac{c}{1 + \frac{40.3n_e}{f^2}} \quad (4.12)$$

Puede observarse que la velocidad de fase excederá a la velocidad de grupo. La cantidad de retardo de la velocidad de grupo es igual al avance de la fase portadora con respecto a la propagación en el espacio libre. En el caso del GPS, esto se traduce a que la señal de información (es decir los datos de navegación y el código PRN) sea retrasada y la fase portadora experimentará un avance.

El rango de medición es

$$S = \int_{SV}^{Usuario} n ds \quad (4.13)$$

Así, el rango de la línea de visión (es decir, geométrico) es:

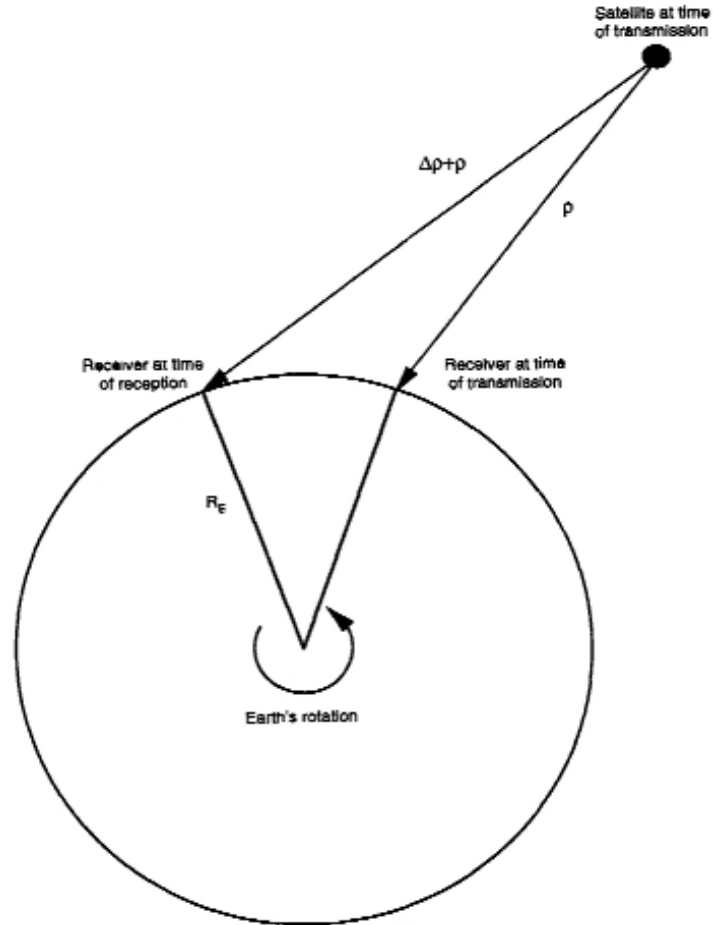


Figura 4.5 Rango de la línea de visión geométrica(Efecto Sagnac).

$$l = \int_{SV}^{Usuario} dl \quad (4.14)$$

La diferencia en la longitud de los caminos debida a la refracción ionosférica es

$$\Delta S_{iono} = \int_{SV}^{Usuario} n ds - \int_{SV}^{Usuario} dl \quad (4.15)$$

El retraso atribuido al índice reflexivo de fase es

$$\Delta S_{iono,p} = \int_{SV}^{Usuario} \left(1 - \frac{40.3n_e}{f^2} \right) ds - \int_{SV}^{Usuario} dl \quad (4.16)$$

Similarmente, el retraso inducido por el índice refractivo de grupo es:

$$\Delta S_{iono,g} = \int_{SV}^{Usuario} \left(1 + \frac{40.3n_e}{f^2} \right) ds - \int_{SV}^{Usuario} dl \quad (4.17)$$

Ya que el retraso será pequeño comparado con la distancia del satélite al usuario, simplificaremos (4.16) y (4.17) al integrar el primer término del camino de la línea de visión. Así, ds cambia a dl y tendremos

$$\Delta S_{iono,p} = -\frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{Usuario} n_e dl \quad \Delta S_{iono,g} = \frac{40.3}{f^2} \int_{SV}^{Usuario} n_e dl \quad (4.18)$$

La densidad de electrones a lo largo de la ruta se conoce como la cuenta total de electrones (TEC, en inglés) y se define como

$$TEC = \int_{SV}^{Usuario} n_e dl$$

La TEC se expresa en unidades de electrones/m². La TEC es una función de la hora del día, la localización del usuario, el ángulo de elevación del satélite, la estación del año, los flujos ionizantes, la actividad magnética, el ciclo solar. Su rango está nominalmente entre 10¹⁶ y 10¹⁹ con los extremos ocurriendo a medianoche y mediodía, respectivamente. Entonces se puede reescribir (4.18) en términos de la TEC:

$$\Delta S_{iono,p} = -\frac{40.3TEC}{f^2} \quad \Delta S_{iono,g} = \frac{40.3TEC}{f^2} \quad (4.19)$$

Ya que la TEC se referencia comúnmente a la dirección vertical a través de la ionosfera, la expresión anterior refleja el retraso de la ruta a lo largo de la dirección vertical con el satélite en un ángulo de elevación de 90° (es decir, el cenit). Para otros ángulos de elevación, se multiplica (4.19) por un factor de oblicuidad. El factor de oblicuidad cuenta para incrementar la longitud de la ruta que la señal viajará dentro de la ionosfera. El factor de oblicuidad empleado por la WAAS es (los términos se definen en la Figura 4.6)

$$F_{pp} = \left[1 - \left(\frac{R_e \cos \Phi}{R_e + h_f} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}}$$

La altura de la densidad máxima de los electrones, h_f , usada por la WAAS es 400km. Con la

adición del factor de oblicuidad, la expresión del retraso de ruta llega a ser de (4.19)

$$\Delta S_{iono,p} = -F_{pp} \frac{40.3TEC}{f^2} \quad \Delta S_{iono,g} = F_{pp} \frac{40.3TEC}{f^2}$$

Ya que el retraso de la ionosfera depende de la frecuencia, puede virtualmente eliminarse haciendo las mediciones de rango con un receptor de frecuencia doble. Diferenciando las mediciones de pseudorango hechas en L1 y L2 habilita la estimación de ambos retrasos de L1 y L2 (despreciando los errores de múltiples rutas y de ruido del receptor). Estas son estimaciones de primer orden ya que se basan en (4.10). La diferencia en la longitud de las rutas de L1 puede estimarse usando la siguiente expresión:

$$\Delta S_{iono,corr_{L1}} = \left(\frac{L_2^2}{L_2^2 - L_1^2} \right) (\rho_{L1} - \rho_{L2}) \quad (4.20)$$

La diferencia entre la longitud de rutas de L2 puede estimarse al multiplicar $\Delta S_{iono,corr_{L1}}$ por

$$(f_1 / f_2)^2 = (77 / 60)^2$$

Estas correcciones estimadas se restan de la medición de pseudorango hecha para cada frecuencia; sin embargo, ya que estas correcciones son estimadas, comúnmente se presentan errores residuales.

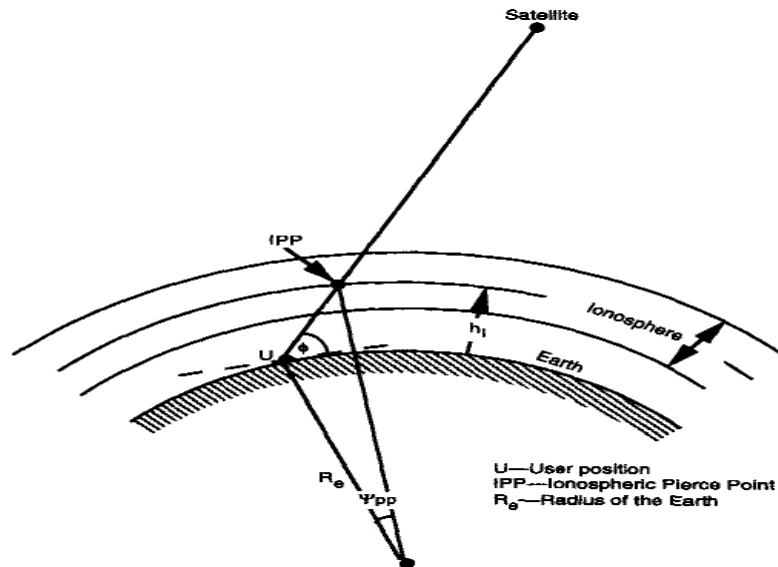


Figura 4.6 Modelo geométrico de la ionosfera

En el caso de un receptor de frecuencia única, es obvio que (4.20) no puede usarse. Consecuentemente, modelos de la ionosfera se emplean para corregir el retraso de la ionosfera. Un ejemplo es el modelo Klobuchar, el cual remueve (en promedio) cerca del 50% del retraso de ionosfera en latitudes medias.

Este modelo asume que el retraso de ionosfera vertical puede aproximarse por la mitad de la función coseno del tiempo local durante el día y por un nivel constante durante la noche .

Los retrasos se triplican cuando los satélites se ven en una más baja elevación que el cenit. Para una señal llegando con incidencia vertical, los rangos de retraso van desde cerca de 10ns (3m) en la noche hasta 50ns (15m) durante el día. En ángulos bajos en vista del satélite (de 0° hasta 10°), el rango de retraso puede ser de 30ns (9m) en la noche hasta 150ns (45m) durante el día .

4.1.2.7 Retraso Troposférico

La troposfera es la parte más baja de la atmósfera que no es dispersiva para frecuencias de hasta 15 GHz . Dentro de este medio, las velocidades de fase y de grupo asociadas con la información de portadora y señal GPS (datos de código PRN y navegación) en L1 y L2 están igualmente retrasados con respecto a la propagación en el espacio libre. Este retraso es una función del índice refractivo troposférico, el cual depende de la temperatura local, la presión, y la humedad relativa. Al quedar no compensado, el rango equivalente de este retraso puede variar desde cerca de 2.4m para un satélite en el cenit y el usuario al nivel del mar hasta cerca de 25m para el satélite con un ángulo de elevación de aproximadamente 5° [10,11].

De (4.15), tenemos que la diferencia de longitudes de ruta atribuida al retraso troposférico es

$$\Delta S_{tropo} = \int_{SV}^{Usuario} (n-1) ds$$

donde la integración es a lo largo de la ruta de la señal.

La diferencia de la longitud de la ruta también puede expresarse en términos de la refractividad,

$$\Delta S_{tropo} = 10^{-6} \int_{SV}^{Usuario} N ds \quad (4.21)$$

donde la refractividad, N , se define por

$$N \equiv 10^6 (n-1)$$

La refractividad es frecuentemente modelada usando una componente seca y una húmeda. La componente seca, la cual viene del aire seco, llega hasta cerca del 90% del retraso troposférico y puede predecirse muy exactamente. La componente húmeda la cual viene del vapor de agua, es más difícil de predecir debido a incertezas en la distribución atmosférica. Ambas componentes se extienden a diferentes alturas en la troposfera (vea la Figura 4.7); las capas secas se extienden hasta la altura de cerca de 40 km mientras que la componente húmeda se extiende hasta una altura de 10 km.

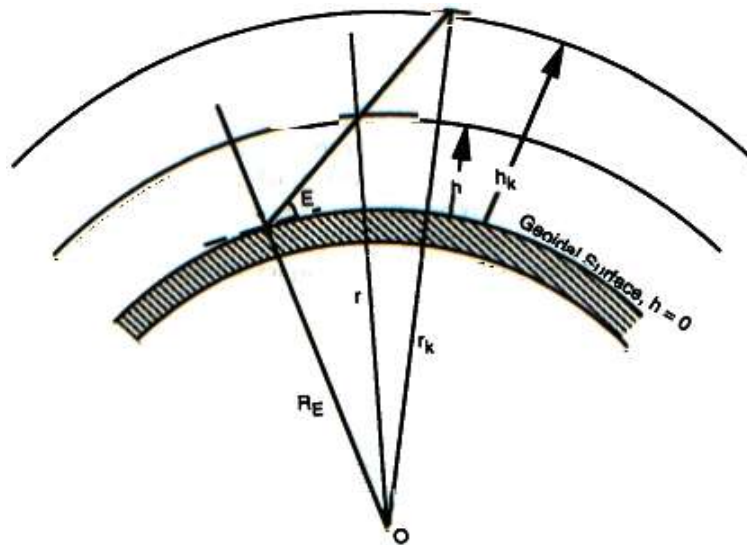


Figura 4.7 Componentes húmedos y secos de la troposfera

Definimos $N_{d,0}$ y $N_{w,0}$ como las refractividades de la componente seca y húmeda, respectivamente, al nivel del mar estándar. Para expresar ambas $N_{d,0}$ y $N_{w,0}$ en presión y temperatura,

$$N_{d,0} \approx a_1 \frac{p_0}{T_0}$$

con

- p_0 = presión parcial de la componente seca al nivel del mar estándar (mbar)
- T_0 = temperatura absoluta a nivel del mar estándar (K)
- a_1 = constante empírica (77.624 K/mbar)

$$N_{w,0} \approx a_2 \frac{e_0}{T_0} + a_3 \frac{e_0}{T_0^2}$$

4.1.2.8 Ruido de recepción y resolución.

Lo errores de medición son así mismo inducidos por los lazos de rastreo del receptor. En términos del DLL, fuentes dominantes de error de medición de pseudo rango son el ruido térmico fluctuante y los efectos de errores de tensión dinámica. Las fuentes secundarias de error incluyen las resoluciones de código en hardware y software, y la estabilidad del oscilador.

En el código C/A la composición de ruido de recepción y la contribución de la resolución de error es aproximadamente un orden de magnitud mayor que para el código P(Y) debido a que la longitud de onda de la tasa de envío del código C/A es diez veces mayor que para el código P(Y). Típicamente los receptores modernos poseen valores de 1σ para el ruido y la resolución de error son del orden de 1.5 m para el código C/A y 20 cm para el código P(Y).

El ruido de recepción y la resolución de errores afectan las mediciones de fase de portadora realizadas por el FLL o PLL. Las mediciones de error en PLL son del orden de 1.2 mm (1σ) cuando se rastrea el código C/A y 1.6 mm (1σ) cuando se rastrea el código P(Y). Sin embargo, las mediciones de fase en FLL son generalmente en orden de magnitud menos precisas que las que se obtienen con un PLL.

4.1.2.9 Efectos de multitrayectoria y sombreado.

Uno de los mayores errores incurridos en el proceso de medición del receptor es la multitrayectoria. Con la multitrayectoria, una señal llega al receptor por múltiples vías debido a las reflexiones de la tierra y objetos cercanos (por ejemplo, edificios, vehículos), como se muestra en la figura 4.8. La multitrayectoria no sólo distorsiona el código PRN y los datos de navegación, el cual es modulado sobre la portadora, sino también la propia fase de portadora. Bajo condiciones del peor caso, la multitrayectoria puede causar que el lazo de rastreo del receptor se pierda indefinidamente.

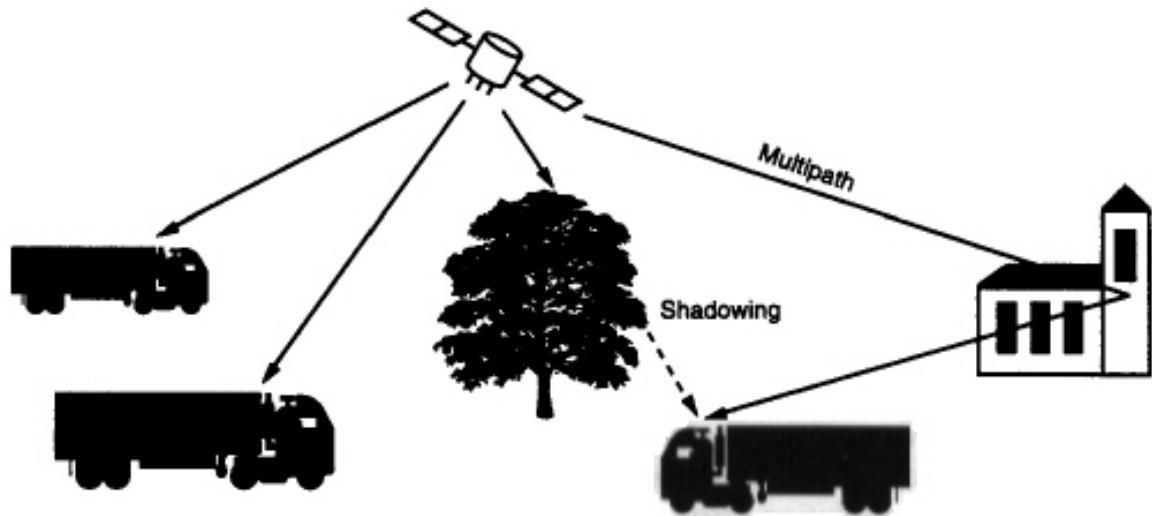


Figura 4.8 Efecto de multitrayectoria y sombra

La degradación de los pseudo rangos es causada por la distorsión del pico de correlación debido a la presencia de señales indirectas. La distorsión del pico de correlación causa el cruce por cero de la curva adelanto-retraso sea desplazada y de ese modo el receptor puede determinar un pseudo rango erróneo.

El pico de correlación de la curva de línea discontinuas en la figura 4.9(a) es la reflexión que está escalada (expresada por la razón multitrayectoria a directo, (MDR)) y retardada (por d) de la versión del pico de correlación directa. (El MDR es la razón de la señal reflejada y directa). Sumando ambos picos de correlación se obtiene como resultado la distorsionada curva de adelanto, mostrado en la figura 4.9 (b). Substrayendo la retrasada (figura 4.9c de la adelantada obtenemos la curva llamada “curva S” (Figura 4.9 (d)). Un incremento en MDR resulta en una mayor distorsión de la curva S y por lo tanto más errores por multitrayectoria. Claramente el cruce por cero en la curva S, difiere del cruce por cero en el caso de no multitrayectoria, resultando en una medición de pseudo rango.

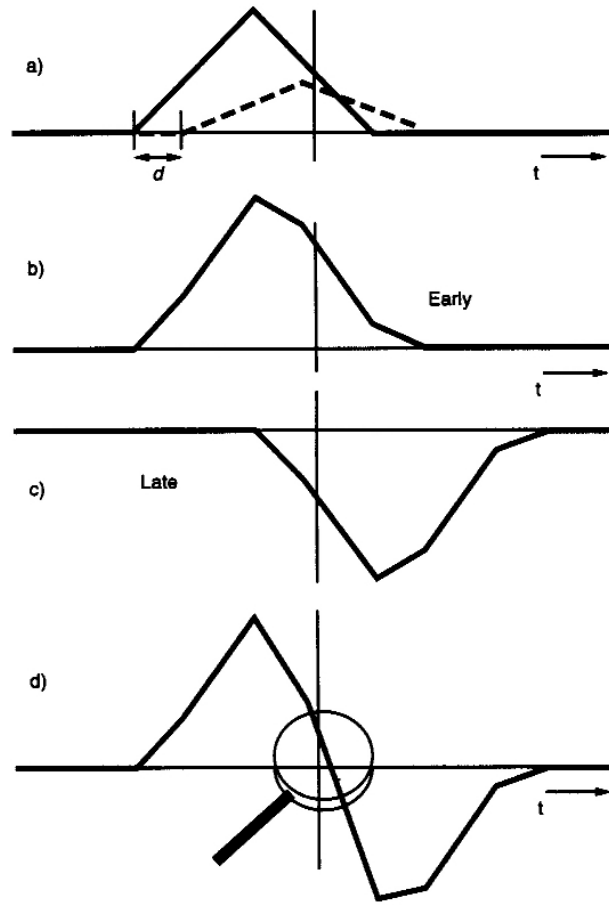


Figura 4.9 Efectos de las multitrayectorias

CAPITULO V
DGPS
(GPS Diferencial)

5.1 Introducción.

El uso de sistemas de navegación diferenciales está ampliamente extendido y se basa en el hecho de que una buena parte de los errores de los sistemas de navegación están fuertemente correlacionados entre receptores adecuadamente próximos.

Además, gran parte de estos errores también varían de forma suficientemente lenta con el tiempo, de tal forma que pueden ser corregidos. De este modo un receptor cuya posición es conocida puede estimar los errores del sistema y transmitirlos de alguna manera a los usuarios para que estos corrijan sus respectivas lecturas.

Otro apoyo son los Pseudolitos, que son, estaciones de referencias especiales que transmiten una señal idéntica a la de los satélites GPS y, por tanto, se puede utilizar el mismo receptor. El principal inconveniente que presentan son las características de propagación de la banda L utilizada (limitaciones en la cobertura).

Existen otros proyectos para la transmisión de las correcciones diferenciales, como incluir SUBPORTADORAS en las emisoras comerciales de FM, o la utilización de los sistemas celulares telefónicos existentes (GSM).

El DGPS se construyó principalmente por la introducción de la disponibilidad selectiva. Es un sistema a través del cual se intenta mejorar la precisión obtenida a través del sistema GPS. El fundamento radica en el hecho de que los errores producidos por el sistema GPS afectan por igual (o de forma muy similar) a los receptores situados próximos entre sí. Los errores están fuertemente correlacionados en los receptores próximos.

Si se supone que un receptor basándose en otras técnicas conoce muy bien su posición, y si este receptor recibe la posición dada por el sistema GPS será capaz de estimar los errores producidos por el sistema GPS. Si este receptor transmite la corrección de errores a los receptores próximos a él estos podrán corregir también los errores producidos por el sistema.

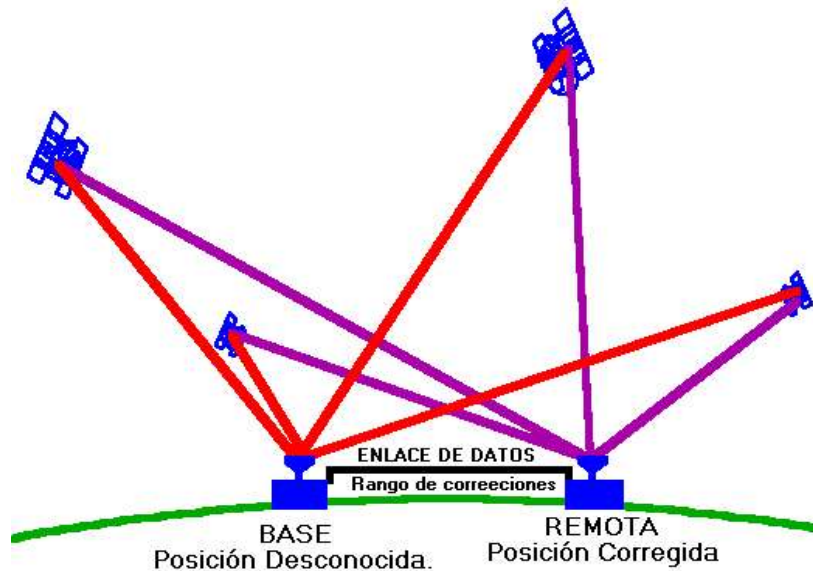


Figura 5.1 Sistema GPS de posición diferencial.

Con este sistema DGPS se pueden corregir en parte los errores debidos a:

- La disponibilidad selectiva.
- La propagación por la ionosfera - troposfera.
- Los errores en la posición del satélite (efemérides).
- Los errores producidos por errores en el reloj del satélite.

5.2 Estándar para Transmisión de Correcciones Diferenciales.

La "Radio Technical Commission for Maritime Services" (RTCM) estableció el Comité Especial 104 dedicado al Servicio GPS Diferencial para definir un estándar DGPS. Con la idea de que el DGPS se iba a utilizar por todo tipo de usuarios, no sólo marinos, el Comité aseguró que sus especificaciones no limitarían su uso. El Comité desarrolló una serie de recomendaciones ("1994 RTCM Recommended Standards for Differential Navstar GPS Service. Versión 2.1") sobre qué datos debe transmitir la estación base, el formato de estos datos y las reglas para utilizar las correcciones transmitidas. El Comité propuso, además, un diseño para la opción de transmitir las correcciones DGPS a través de pseudolites y otro para los radiofaros marinos que pueden suministrar estas mismas correcciones.

Existen 16 tipos diferentes de mensajes, de los cuales 12 se encuentran definidos. Todos los mensajes comienzan con dos palabras de 30 bits, en las que se encuentra un preámbulo (8 bits), el

tipo de mensaje (4 bits), la identificación de la estación de referencia (12 bits) y 6 bits de paridad. Además, cada mensaje contiene una serie de palabras de 30 bits para transmitir su información particular.

Una red DGPS utilizando como soporte o medio de transmisión los radiofaros resulta muy atractiva para la radio navegación marítima por numerosas razones. En primer lugar, los radiofaros están ampliamente difundidos y se puede contar con una red ya dispuesta por un coste muy bajo. Además, están localizados en sitios muy interesantes para algunas aplicaciones DGPS. En concreto la Guardia Costera de los EE.UU. está interesada en utilizar esta red para la navegación en bahías y zonas costeras. También la propagación por onda de superficie en estas frecuencias proporciona cobertura más allá de la línea del horizonte. Por último, los equipos son baratos de diseñar y fabricar también debido al uso de esta banda de frecuencias.

Los problemas que deben afrontar estos radiofaros DGPS están relacionados con la compatibilidad con las señales emitidas por el propio radiofaro, y el comportamiento frente al ruido atmosférico. El formato para la transmisión de las correcciones diferenciales, se expone a continuación:

- Los datos DGPS modulan una subportadora mediante MSK.
- La potencia de transmisión de estos datos debe estar 3 dB por debajo de la portadora principal del radiofaro y la frecuencia de la portadora DGPS está separada, al menos, 500 Hz de ésta. Con estas restricciones se consigue evitar la interferencia a los radio goniómetros que utilizan las señales transmitidas por el radiofaro.
- Esta separación de 500 Hz entre portadoras es perfectamente posible en los radiofaros de EE.UU. y Canadá, ya que éstas están separadas, al menos, 1000 Hz. Sin embargo, en Europa la separación mínima es de 500 Hz por lo que debe estudiarse cuidadosamente el emplazamiento de radiofaros con transmisión GPS DIFERENCIAL.

5.2.1 Pseudolites.

Los pseudolites son equipos de telecomunicaciones compatibles con los transpondedores de los satélites GPS y que están situados sobre el suelo en aquellas áreas donde puede resultar conveniente. Transmiten una señal muy parecida a la del GPS para usos civiles y los instantes de transmisión están controlados a través de la norma de transmisión temporal de los satélites GPS. De hecho los pseudolites pueden proporcionar el servicio GPS Diferencial más barato, pues la señal es procesada por el mismo hardware que tiene un receptor GPS. De la misma manera que los radiofaros comentados en el subapartado anterior, la señal del pseudolito transporta las correcciones diferenciales especificadas por el RTCM. Sin embargo, a diferencia de los radiofaros, la señal está en banda L y, por tanto, la propagación está limitada al horizonte.

Otra característica fundamental es que la señal que transmiten permite que un receptor GPS ligeramente modificado calcule también la pseudo distancia al pseudolito. Esta combinación de cualidades los hacen muy apropiados para aplicaciones de aterrizaje de aeronaves, sobre todo teniendo en cuenta que se encontrarán (en el aire) con más probabilidad en la zona de cobertura del pseudolito.

En este caso, para aplicaciones aeronáuticas, será necesario la utilización de al menos cuatro satélites (a diferencia de los tres que pueden bastar para aplicaciones marinas).

5.3 DGPS de Área Extensa y GPS Expandido.

Se puede considerar que el DGPS de Área Extensa ("Wide Area DGPS", WADGPS) es un subconjunto del concepto GPS Expandido ("Augmented GPS", AUGPS).

El WADGPS (DGPS de Área Extensa) es una mejora sobre el DGPS tradicional, para tratar de eliminar la dependencia del error del usuario con respecto a la distancia a la estación de referencia. Para ello, es necesario contar con una red de estaciones monitoras con capacidad de medir el retardo ionosférico por medio de las técnicas de las dos frecuencias y, por supuesto, las pseudo distancias a todos los satélites a la vista. Se han propuesto 15 estaciones monitoras para cubrir toda la superficie continental de los EE.UU.

Todas las medidas de estas estaciones son transmitidas a un ordenador central situado en una estación maestra. Este ordenador es capaz de calcular las posiciones de los satélites, el estado de sus relojes y un modelo atmosférico a partir de estas medidas. La estación maestra retransmite las correcciones para cada uno de los satélites normalmente a través de uno o varios satélites en órbita geoestacionaria.

El mayor inconveniente de este sistema está en todo el procesado que debe efectuar el receptor para recuperar y utilizar estos datos, además de ser capaz de recibir una señal proveniente de un satélite geoestacionario (típicamente en banda C).

Las pruebas hechas hasta la fecha del sistema ofrecen resultados que indican un error para el WADGPS de 2-3 m, equivalente a un espaciado entre estaciones DGPS tradicionales de 200 Km.

El GPS Extendido (AUGPS) considera que para alcanzar los requisitos de precisión, integridad y fiabilidad del sistema GPS en aplicaciones críticas como aterrizaje instrumental es necesario contar con todas las mejoras posibles del sistema.

En este sentido, el GPS Expandido comprende el uso de pseudolites, estaciones monitoras del sistema, estaciones maestras para WADGPS, satélites geoestacionarios para la retransmisión de correcciones diferenciales y cualquier otro método que ayuda a mejorar la fiabilidad y precisión

(por ejemplo: altímetros barométricos en las aeronaves).

5.4 Estructura del DGPS.

Una estación monitora que conoce su posición con una precisión muy alta contiene:

- Un receptor GPS.
- Un microprocesador para calcular los errores del sistema GPS y para generar la estructura del mensaje que se envía a los receptores.

Debido a que existe un canal de datos con sentido unidireccional hacia los receptores, se necesitan básicamente dos cosas: un transmisor (estación monitora) y un receptor para los usuarios para poder recibir los datos. En los mensajes que se envían a los receptores próximos se pueden incluir dos tipos de correcciones:

- 1.Una corrección directamente aplicada a la posición. Esto tiene el inconveniente de que tanto el usuario como la estación monitora deberán emplear los mismos satélites, pues las correcciones se basan en esos mismos satélites.
- 2.Una corrección aplicada a las pseudo distancias de cada uno de los satélites visibles. En este caso el usuario podrá hacer la corrección con los 4 satélites de mejor SNR. Esta corrección es más flexible.

El error producido por la disponibilidad selectiva varía incluso más rápido que la velocidad de transmisión de los datos. Por ello, junto con el mensaje que se envía de correcciones también se envía el tiempo de validez de las correcciones y sus tendencias. Por tanto el receptor deberá hacer algún tipo de interpolación para corregir los errores producidos.

5.5 Cobertura y precisión del DGPS

Tiene una cobertura de 200 km. en torno a la estación terrena. Esta zona es donde los errores están fuertemente correlacionados. Se eliminan los errores del segmento espacial y de control. En cuanto al segmento de los usuarios se eliminan los efectos de la ionosfera y troposfera y el parámetro que más afecta es el ruido del receptor.

Se están desarrollando sistemas WADGPS (DGPS de área amplia) que no es otra cosa que un DGPS de gran cobertura. Está formado por varias estaciones monitoras DGPS cuyas áreas de cobertura están superpuestas. Magnitud típica de los errores atribuibles a un GPS autónomo.

Errores en metros.

| Causa | GPS Autónomo | Diferencial |
|--------------------|--------------|-------------|
| Reloj del Satélite | 1.5 | 0 |
| Error Orbital | 2.5 | 0 |
| Ionósfera | 5 | 0.4 |
| Tropósfera | 0.5 | 0.2 |
| Ruido del Receptor | 0.3 | 0.3 |
| Multipath | 0.6 | 0.6 |
| SA | 30 | 0 |

| Precisión Típica | GPS Autónomo | Diferencial |
|------------------|--------------|-------------|
| Horizontal | 50 | 1.5 |
| Vertical | 78 | 2.0 |
| 3-D | 93 | 2.8 |

5.6 Técnicas para reducción de errores LADGPS.

Conceptualmente la manera más sencilla de implementar LADGPS, es colocar el receptor de referencia GPS en una localización supervisada, computar las diferencias de coordenadas (en latitud, longitud y altura) entre la posición derivada GPS y la localización supervisada, y luego transmitir esa diferencia a los usuarios. Los usuarios receptores emplean esa diferencia de coordenadas para corregir sus propias posiciones GPS.

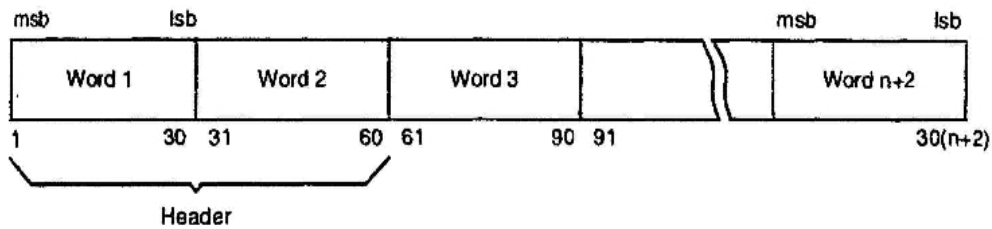
Esta técnica requiere que todos los receptores hagan mediciones en pseudo rango para el mismo conjunto de satélites para asegurar que los errores comunes sean experimentados. Por lo tanto, los usuarios receptores deben coordinar su selección de satélites con la estación de referencia, o la estación de referencia debe determinar y transmitir las correcciones de posición para todas las combinaciones de los satélites visibles.

Cuando ocho o más satélites son visibles, el número de combinaciones llega a ser impracticable mayor (80 o más combinaciones de 4 satélites), impidiendo el uso de técnicas simples de implementar. En lugar de determinar los errores de coordenadas de posición, la estación de

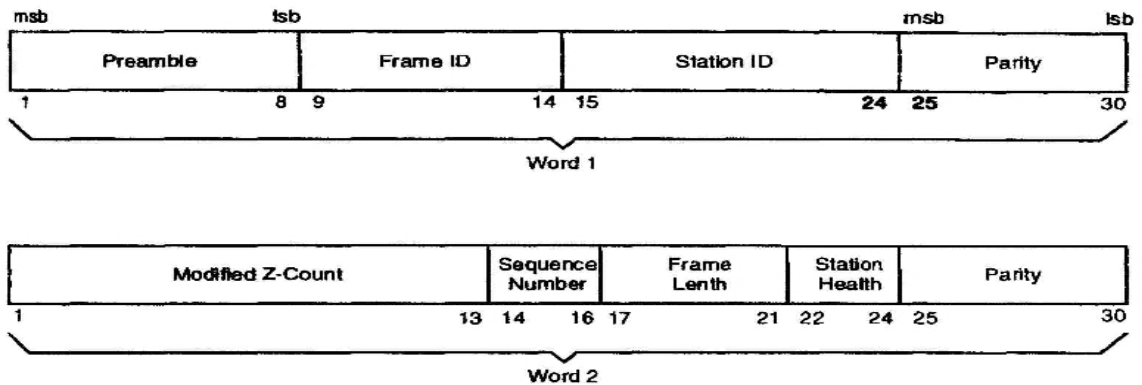
referencia puede determinar y diseminar correcciones en pseudo rango.

5.6.1 Formato del mensaje.

Varios protocolos han sido definidos para las comunicaciones entre las estaciones de referencia y los usuarios, tanto así que los usuarios pueden interpretar los datos transmitidos por las estaciones. Uno en particular desarrollado por la Comisión Radio Técnica para Servicios Marítimos (RTCM) en Comité estudio 104 (SC-104) ha sido ampliamente aceptado por la comunidad internacional. Como se muestra en la siguiente figura, el formato de la trama básica del RTCM-104 consiste de un número variable de palabras de 30 bits, de las cuales las primeras dos forman la información del encabezado. La primera palabra del encabezado contiene un preámbulo de 8 bits, consistiendo de la secuencia fijada 0110110, seguido por la trama ID, el cual identifica una de las 64 posibles tipos de mensaje. Luego, 12 bits para la estación ID, que identifica la estación de referencia y los últimos 8 bits de la primera palabra son los bits de chequeo de paridad.



Trama del mensaje DGPS RTCM SC-104



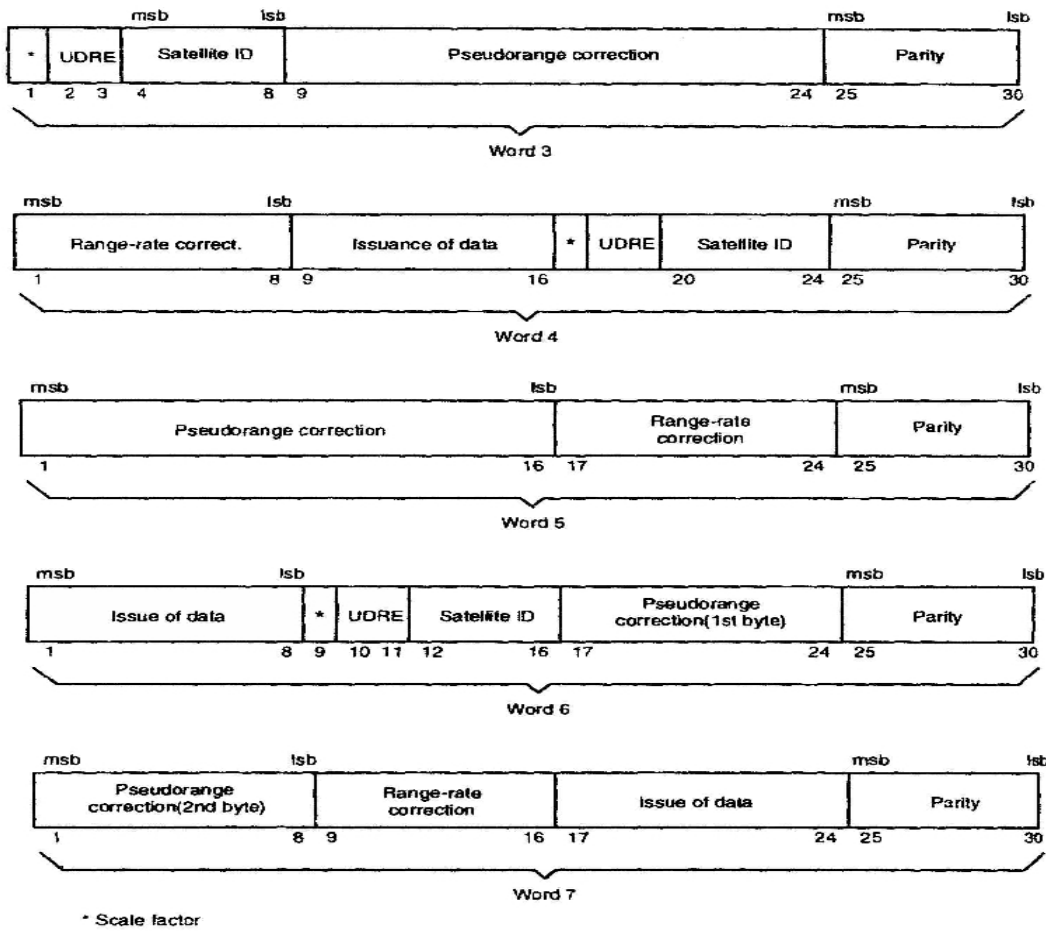
Formato de encabezado DGPS RTCM SC-104

Los primeros 13 bits de la segunda palabra, Cuenta-Modificada Z, comprende la referencia de tiempo para el mensaje. Los siguientes tres bits forman el número de secuencia, el cual se incrementa en cada trama y es usado para verificar la sincronización de la trama. La longitud de la trama es necesaria para identificar el comienzo de la siguiente trama, ya que la longitud de la trama es variable dependiendo del tipo de mensaje y el número de informes de satélites. Los tres bits de la estación *health* provee un estimado del error diferencial, y los últimos 8 bits proveen un chequeo de error.

5.6.1.1 Formato de mensaje 1 (Corrección Diferencial de Datos)

Siguiendo el estándar de encabezado de dos palabras, el primer bit de este formato de mensaje es usado como un factor de escala para el conjunto de datos. Este es seguido por el rango de error diferencial del usuario (UDRE), y luego se tienen 5 bits que identifican a cual satélite pertenecen los datos o los bits de paridad. Esta estructura de mensaje también proporciona la corrección de pseudo rango, corrección de razón de rango, y el tiempo (La cuenta-modificada Z). Las palabras 3 hasta 7 son repetidamente combinaciones de datos para todos los satélites a la vista de la estación de referencia.

El primer bit de la palabra 3 es un factor de escala, ya sea 0.02m para la corrección de pseudo rango y 0.002m/sec para la corrección de razón de rango, o 0.32m para la corrección de pseudo rango y 0.032m/sec para la corrección de razón de rango. El bit 2 UDRE (ver tabla) da un estimado de la incertidumbre en la corrección de pseudo rango determinada por la estación de referencia.



Formato de mensaje Tipo 1

| Code | Rango de la desviación estándar esperada |
|------|--|
| 11 | $8m < \sigma$ |
| 10 | $4m < \sigma \leq 8m$ |
| 01 | $1m < \sigma \leq 4m$ |
| 00 | $\sigma \leq 1m$ |

Rangos de desviación estándar estimada en UDRE

EL satélite ID identifica al satélite al que la subsecuente corrección de pseudo rango y razón de rango pertenece. La emisión de datos identifica el conjunto de parámetros orbitales y de reloj que la estación de referencia utiliza para calcular las correcciones. Si el usuario receptor esta usando parámetros orbitales y de reloj obsoletos que la estación de referencia, este puede hacer uso de los

datos disponibles en el mensaje tipo 2 para corregir la diferencia en estos parámetros.

5.6.1.2 Formato de mensaje 2 (Corrección Delta Diferencial de Datos)

Periódicamente, las actualizaciones del satélite y los parámetros orbitales y de reloj son transmitidos a los receptores. Si la estación de referencia transmite las correcciones de pseudo rango basado en este nuevo dato antes un usuario receptor ha actualizado su base de datos con esos nuevos parámetros, entonces el usuario receptor usa el mensaje tipo 2, el cual contiene las correcciones para ser aplicadas a las correcciones de pseudo rango y la razón de rango para proporcionar los ajustes apropiados cuando se utiliza lo parámetros orbitales y de reloj obsoleto. La siguiente tabla suma los 63 tipos de mensaje.

| Tipo de mensaje | Estado | Uso |
|------------------------|---------------|--|
| 1 | Fijado | Correcciones de pseudo rango (PR) del código C/A |
| 2 | Fijado | Corrección PR de diferencia de datos para el uso con parámetros orbitales y reloj obsoletos. |
| 3 | Fijado | Coordenadas de la estación de referencia |
| 4 | Retirado | Ya no es utilizado; reemplazado por los tipos 18 a 21 |
| 5 | Fijado | Información del estado de la constelación de satélites |
| 6 | Fijado | Mensaje de relleno (alternando 1's y 0's en el cuerpo del mensaje) |
| 7 | Fijado | Descripción de la señal de radio de la red |
| 8 | Tentativo | Información del almanaque pseudolito |
| 9 | Fijado | Correcciones PR del código C/A para subconjunto de satélites |
| 10 | Reservado | Correcciones del código P diferencial |
| 11 | Reservado | Correcciones del código C/A para L2 |
| 12 | Reservado | Parámetros de la estación pseudolito |
| 13 | Tentativo | Parámetros del transmisor en tierra |
| 14 | Reservado | Mensaje auxiliar para inspección |
| 15 | Reservado | Corrección de mediciones de la ionosfera y troposfera |
| 16 | Fijado | Mensajes en código ASCII para visualización |
| 17 | Tentativo | Almanaque efemérides |
| 18 | Tentativo | Mediciones de fase de portadora no correlacionadas |
| 19 | Tentativo | Mediciones PR incorrectas |
| 20 | Tentativo | Correcciones para las mediciones de fase de portadora |
| 21 | Tentativo | Correcciones para las mediciones PR |
| 22 a 58 | – | Indefinido |
| 59 | Tentativo | Propiedad del mensaje |
| 60 a 63 | Reservado | Mensaje de múltiples propósitos |

Sumario de los tipos de mensaje RTCM SC-104

5.7 Limites espaciales para la exactitud de LADGPS.

Cuando un usuario receptor se mueve más allá de la estación de referencia, los errores comunes que son espacialmente correlacionados llegan a ser cada vez más de-correlacionados. Se hará uso de expresiones que permitan estimar los errores introducidos por la de-correlación espacial. Para los retrasos de la troposfera y la ionosfera, se utilizarán modelos para su determinación, los cuales dependen de parámetros variables que cambian con el espacio y tiempo. Por ejemplo, en el modelo de la ionosfera, el retardo depende directamente del contenido electrónico total (TEC), el cual puede variar en más de dos órdenes de magnitud, tanto así que se tienen que calcular límites en los retrasos o retrasos típicos. No obstante, estas expresiones pueden darnos una idea de las magnitudes de los varios componentes de error que pueden esperarse cuando el usuario se mueve más allá de la estación de referencia.

5.7.1 Errores de retardo de la ionosfera

La relación para el retardo debido a la ionosfera, $\varepsilon^{\text{iono}}$, expresado en unidades de longitud; la frecuencia f de la señal; el ángulo de elevación ϕ' en el punto de perforación; y el contenido total de electrones (TEC) a lo largo del camino de la señal:

$$\varepsilon^{\text{iono}} = \frac{1}{\text{sen}\phi'} \cdot \frac{40.3}{f^2} \cdot \text{TEC}$$

El término $\text{sen}\phi'$ está asociado a la dirección del satélite con respecto a la vertical. El punto de perforación de la ionosfera, es ese punto en el vector de desplazamiento de la posición del usuario a la posición del satélite en la mitad del camino a través de la ionosfera, típicamente tomado de 300 km a 400 km en altitud. El ángulo ϕ' difiere del ángulo ϕ debido a la refracción de la ionosfera.

5.7.2 Retardos en la propagación atmosférica

Los retardos de propagación en la troposfera y la ionosfera afectan las mediciones de posición del satélite realizada por la red de monitoreo en tierra y las mediciones de pseudo rango del usuario. La compensación para ello, es necesario si se quiere una mayor precisión en la posición del usuario. La dependencia del retardo en la troposfera de la presión, temperatura, y la presión del vapor de agua es reflejada en varios modelos para el retardo de la troposfera. Estas mediciones se correlacionan rápidamente y son esencialmente incorrelacionadas a los

100 km, lo que propone un dilema para WADGPS, lo cual es la esencia para el uso en estaciones ampliamente esparcidas.

El retardo debido a la ionosfera depende de la densidad de electrones, el cual puede variar significativamente en el espacio y tiempo. Aquí también es necesario realizar mediciones para poder completar el modelo, en el que deben de tomarse en consideración las variaciones espaciales y temporales del retardo. Los retardos por la ionosfera son mayores que los retardos en la troposfera, tanto así que virtualmente todos los sistema WADGPS se hacen grandes esfuerzos para obtener acertadas correcciones en el retardo por la ionosfera.

5.7.3 Retardo de Propagación por la Ionosfera

Como un ejemplo de un modelo de retardo por la ionosfera, las correcciones por la ionosfera en el FAA's WAAS son hechas a partir de datos que se toman de los retardos verticales en el subconjunto de un conjunto predefinido de una cuadrícula de 929 puntos, distribuidos casi uniformemente en latitud y longitud. Los retardos en algún subconjunto de cuadrículas son transmitidas a los usuarios. Cada usuario receptor calcula la latitud y longitud de un punto de perforación en la ionosfera (IPP) por cada satélite y calcula su retardo por la interpolación de los retardos de los cuatro puntos más cercanos de la cuadrícula. Usando la ley de los senos, el usuario calcula primero el ángulo ψ_{pp} :

$$\psi_{pp} = \frac{\pi}{2} - \phi_m - \text{sen}^{-1} \left(\frac{R_E}{R_R + b} \cdot \cos \phi_m \right)$$

Donde R_E es el radio de la tierra. Esta ecuación es una aplicación de la ley de los senos. El usuario calcula entonces la latitud, ϕ_{pp} , y la longitud, λ_{pp} , de la IPP:

$$\phi_{pp} = \text{sen}^{-1} (\text{sen} \phi \cdot \cos \psi_{pp} + \cos \phi \cdot \text{sen} \psi_{pp} \cdot \cos \theta)$$

$$\lambda_{pp} = \lambda + \text{sen}^{-1} \left(\frac{\text{sen} \psi_{pp} \cdot \text{sen} \theta}{\cos \phi_{pp}} \right)$$

Donde el ángulo θ es el ángulo azimut del satélite hasta la posición del usuario.

5.8 Tecnicas de portacion.

El constante movimiento de la constelación de satélites GPS demanda que los receptores, en general, sean capaces de considerar el cambiante desplazamiento de la frecuencia Doppler en L1. Donde los receptores de doble frecuencia son usados, y son rastreados L1 y L2. El desplazamiento en frecuencia se eleva debido a la relativa movilidad entre los satélites y el (los) receptor(es).

La típica movilidad de un satélite con respecto a un observador fijo en tierra puede resultar en frecuencias Doppler de entre $\pm 5,000$ Hz con respecto a las portadoras L1 y L2. La integración de la compensación de frecuencia Doppler resulta en una medición extremadamente precisa del adelanto en la fase de la señal portadora entre cada lapso de tiempo. Mientras que los cambios en la fase de la señal de lapso a lapso pueden ser medidos con extrema precisión, el número de ciclos de portadora a lo largo del trayecto de propagación del satélite al receptor permanece ambiguo. Este obstáculo puede ser superado por la formación de un pseudo rango DD (código) observable y entonces “centralizar” una correspondiente portadora de fase DD observable en el valor medio del código DD. El resultado es un código DD “smoothed” observable que no es ambiguo. Esta técnica ha sido aplicada con éxito para el código C/A y fase observable utilizando un filtro Kalman complementario. La precisión del código DD esta dentro de $\pm 5\lambda$, o cerca de 1m en L1, ha sido demostrado en bajos ambientes multitrayectoria.

5.8.1 Determinación precisa de línea base en tiempo real

La determinación de las ambigüedades del ciclo de portadora es clave para cualquier aplicación donde se requiere precisión en el posicionamiento a nivel de centímetro en tiempo real. Tales técnicas han sido aplicadas con éxito en acercamiento preciso de aviones y en aterrizaje automático por acercamiento de línea base extendiéndose hasta 50 km en algunos casos.

Ellos son igualmente aplicables, sin embargo, en aplicaciones en tierra base o en mar. En contraste, en aplicaciones de inspección en tierra, frecuentemente involucra muchas líneas base, y que tienen la ventaja de un entorno de post-procesamiento y como resultado se obtiene precisión a nivel milimétrico hoy en día. Las técnicas aplicadas en tales casos involucra la resolución de ambigüedades de ciclo de portadora en el conjunto de datos recolectados sobre grandes periodos de tiempo (generalmente de una hora o más). En adición, el post-procesamiento de los datos se presta para el reconocimiento y reparación de ciclos dañados. La precisión puede mejorarse aún más con el uso de precisos efemérides en el satélite.

5.8.2 Medicion de fase de portadora

Una vez que el receptor está enganchado a un satélite en particular, este no realiza únicamente mediciones de C/A y de código de pseudo rango P(Y) en L1 y L2 (si es capaz de L2), este también mantiene un ciclo de conteo de desplazamiento de frecuencia Doppler presente en las frecuencias portadora L1 y L2 (un ciclo representa un avance de 2π radianes de fase de portadora o una longitud de onda). Cada lapso, esta en un ciclo de conteo (el valor del lapso anterior se añade al adelanto en fase durante el presente lapso) disponible desde el receptor. Más específicamente, el avance en fase de portadora durante un lapso es determinado por la integración del desplazamiento de frecuencia Doppler de la portadora (f_D) en todo el intervalo del lapso. La frecuencia f_D es la razón de tiempo de cambio de la fase de portadora. Entonces, en la conclusión de cada lapso, una fracción de la medida de fase es realizada por el receptor. Esta medición es derivada del lazo de rastreo de fase de portadora del receptor, Matemáticamente, la relación es como sigue:

$$\phi_{L1_n} = \phi_{L1_{n-1}} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{D,L1}(\tau) d\tau + \phi_{r,L1_n} \quad \text{donde } \phi_{L1_0} = 0$$

$$\phi_{L2_n} = \phi_{L2_{n-1}} + \int_{t_{n-1}}^{t_n} f_{D,L2}(\tau) d\tau + \phi_{r,L2_n} \quad \text{donde } \phi_{L2_0} = 0$$

donde:

ϕ es la fase acumulada en cada lapso mostrado.

n y $n-1$ son el actual e inmediatamente pasado lapsos.

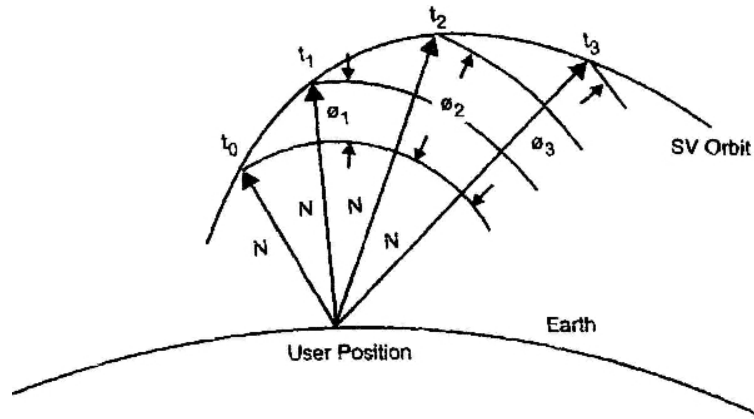
f_D es la frecuencia Doppler como una función del tiempo.

ϕ_r es la medida de fase fraccionaria en cada lapso mostrado.

Aún cuando la medición de fase de portadora del receptor pueda realizarse con cierta precisión y cualquier avance en ciclos de portadora desde la adquisición del satélite por el receptor pueda ser exactamente contado, la medida total de la fase contiene un desconocido número de ciclos de portadora. Esto es llamado la ambigüedad entera de ciclos de portadora (N). Esta ambigüedad existe debido a que el receptor comienza a contar inmediatamente cuando un satélite activa el rastreo. En donde es posible relacionar N al problema de geometría, la longitud del camino entre el satélite y el usuario receptor, en términos de ciclos de portadora o longitudes de onda.

La figura describe tal situación y además ilustra el efecto del cálculo del avance de fase de portadora como función del tiempo (ϕ_1, ϕ_2). Claramente, la determinación de N por cada satélite usado para generar la posición del usuario es de máximo interés cuando se utilizan técnicas de interferometría. Como los términos de interferometría implican, que las mediciones de fase tomadas en dos o más localidades son combinadas. Normalmente, las líneas base entre las

antenas son conocidas y el único problema llega a ser la reducción de la combinación de diferencia de fase para determinar la localización precisa de la fuente de la señal. En el caso del DGPS relativo, la línea base es desconocida, pero la ubicación de las fuentes de señal pueden ser precisamente determinadas por la utilización de efemérides disponibles de los datos de navegación en la transmisión del satélite.



Carrier-phase geometric relationships.

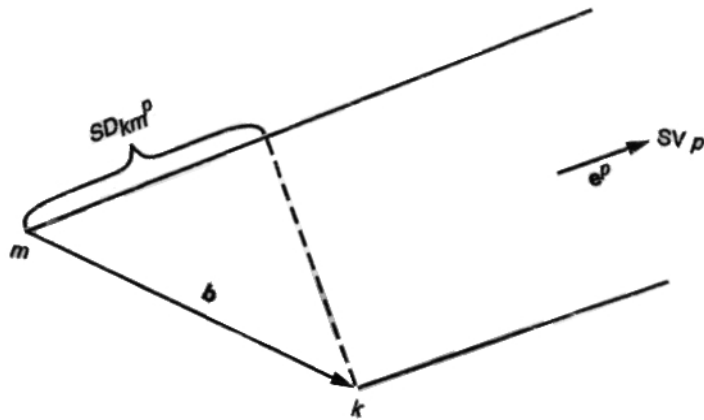
5.8.3 Formación de doble diferencia

La generación de la fase portadora y pseudorange (código) DD's es clave para la determinación del vector de línea base entre la tierra y las plataforma de antenas aéreas. En tanto que las efemérides del satélite deben ser manipuladas apropiadamente para asegurar que las mediciones de fase de portadora y de código realizadas en dos localidades receptoras sean ajustadas para una medida común de la base de tiempo con respecto al tiempo del sistema GPS. La formación del DD ofrece grande ventajas debido a la cancelación del reloj del receptor y del satélite así como la mayoría del retardo de propagación de la ionosfera. Si las dos antenas son localizadas en la misma altitud, el retardo de propagación de la troposfera será cancelada.

5.8.3.1 Doble diferencia fase de portadora

La siguiente figura describe esquemáticamente un simple interferómetro GPS interactuando con

un solo satélite. Los centro de fase de dos antenas son localizadas en k y m , y \mathbf{b} representa la línea base desconocida entre ellos. El SV p es una distancia media de 20,200 km.



Interferometro GPS – Un sólo satélite

Las longitudes de la ruta de propagación entre SV p y k (Φ_k^p) o SV p y m (Φ_m^p), en términos de fracción y entero ciclos de portadora es como sigue:

$$\Phi_k^p(t) = \phi_k^p(t) - \phi^p(t) + N_k^p + S_k + f\tau_p + f\tau_k - \beta_{\text{iono}} + \delta_{\text{tropo}}$$

$$\Phi_m^p(t) = \phi_m^p(t) - \phi^p(t) + N_m^p + S_m + f\tau_p + f\tau_m - \beta_{\text{iono}} + \delta_{\text{tropo}}$$

donde:

k y m se refieren a los centros de fase de antenas receptor/receptor

p es la fuente de la señal de satélite

ϕ^p es la fase de la señal transmitida por el satélite como función del tiempo

N es el número entero desconocido de ciclos de portadora de p a k o de p a m

S es la fase de ruido debido a todas las fuentes

f es la frecuencia de portadora

τ es el reloj asociado al satélite o receptor

β_{iono} es el avance de la portadora (ciclos) debido a la ionosfera

δ_{tropo} es el retardo de la portadora (ciclos) debido a la troposfera

La variable interferometrica, la diferencia simple (SD), es creada ahora por la diferenciación de

las longitudes de la ruta de propagación de los ciclos de portadora (SV p a k y m):

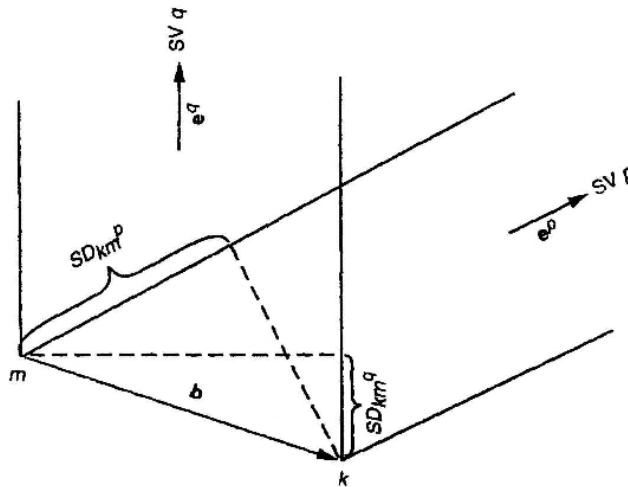
$$SD_{km}^p = \phi_{km}^p + N_{km}^p + S_{km}^p + f\tau_{km}$$

Ciertas ventajas ocurren en la formación de la métrica SD. Entre ellos esta la cancelación de la transmisión de fase de señal y reloj del satélite, y la formación de un combinado término entera-ambigüedad que representa el número entero de ciclos de portadora a lo largo de la ruta de m a la proyección de k dentro de la línea de vista mp .

La siguiente figura extiende el interferómetro GPS ha dos satélites. Para q , el SV adicional, una segunda métrica SD puede er formada:

$$SD_{km}^q = \phi_{km}^q + N_{km}^q + S_{km}^q + f\tau_{km}$$

Como la relación anterior, la esperada cancelación de la señal de fase y reloj transmitida del satélite ocurre, y una corta línea de base se asumirá tal que los retardos de propagación de la ionosfera y troposfera se cancelaran entre si.



GPS interferometer—two satellites.

Interfometro de dos satelites

La interferometria DD es ahora formada usando los dos SD's. Involucarado en esta metrica son dos satélites separados y los dos receptores, uno en cualquier extremo de la línea base, b . Diferenciando las dos ecuaciones anteriores se tiene:

$$DD_{km}^{pq} = \phi_{km}^{pq} + N_{km}^{pq} + S_{km}^{pq}$$

Donde los exponentes p y q refieren los satélites individuales, y k y m son las antenas individuales. Con la formación del DD, el término reloj del receptor es ahora cancelado. Permaneciendo un término de fase representando las mediciones combinadas de fase-portadora realizadas en k y m por los receptores usando SV's p y q , un término entero obtenido de la combinación de ambigüedades enteras desconocidas y un término de ruido-fase de sistema, consistiendo principalmente de los efectos combinados de multitrayectoria y receptor.

5.8.4 Doble diferencia pseudorange (código)

Como en el caso de la medición de fase de portadora, el receptor realiza una medición de pseudorange en cada lapso para todos los satélites siendo activamente rastreados. El pseudorange sufre de similares efectos de propagación y de tiempo como en el caso de la fase de portadora. La única diferencia básica es donde la ionosfera adelanta la fase de portadora, la información de pseudorange experimenta un retraso de grupo. De este los efectos de retraso de la ionosfera son añadidos. La formulación del código DD comienza con la ecuación de pseudorange, como sigue:

$$P_k^p(t) = t_k^p(t) - t^p(t) + Q_k + \tau_p + \tau_k + \gamma_{\text{iono}} + \delta_{\text{tropo}}$$

$$P_m^p(t) = t_m^p(t) - t^p(t) + Q_m + \tau_p + \tau_m + \gamma_{\text{iono}} + \delta_{\text{tropo}}$$

donde:

P es la medición de pseudorange recibida equivalente en el tiempo (segundos)

k, m refieren a los centros de fase de antenas receptor/receptor

p es la fuente de la señal del satélite

t_k^p o t_m^p es la señal de recepción de tiempo medido por relojes de recepción

t_p es la señal de tiempo de transmisión determinado del reloj SV

Q es el ruido debido a todas las fuentes

τ es el satélite asociado o reloj del receptor

γ_{iono} representa el grupo de retraso (segundo) de la modulación debido a la ionosfera

δ_{tropo} representa el retraso (segundo) de la modulación debido a la troposfera

Donde no existe la ambigüedad entera de ciclo de portadora (N), la medición de pseudorange es inambigua. En otras palabras, el código DD observable formado de las mediciones de pseudorange de los receptores son precisas.

Los pseudorange SD's son formados ahora:

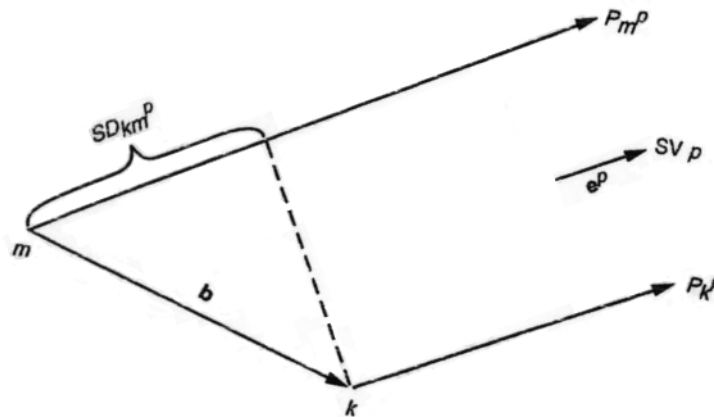
$$SD_{km_{pr}}^p = t_{km}^p + Q_{km}^p + \tau_{km}$$

$$SD_{km_{pr}}^q = \rho_{km}^p + Q_{km}^p + \tau_{km}$$

Finalmente el pseudorange DD, en metro es formado como sigue:

$$DD_{km_{pr}}^{pq} = t_{km}^{pq} + Q_{km}^{pq}$$

Paralelamente el desarrollo de las fase DD's de portadora, los mismo cinco satélite son usados para formar cuatro códigos DD's independientes.



Interferómetro GPS código equivalente

5.9 Aplicaciones y Futuro del DGPS.

5.9.1 Navegación marítima.

Su implantación ha sido muy rápida (antes las embarcaciones empleaban el sistema "TRANSIT"). Se piensa que en poco tiempo toda la navegación marítima se basará en GPS. Actualmente también se emplean sistemas hiperbólicos, pero estos sistemas tienden a desaparecer.

El costo del sistema GPS es bajo (además los barcos no requieren receptores de gran calidad) y lo puede usar cualquier embarcación.

5.9.2 Navegación terrestre.

En este caso hay dos mercados principales:

- Automóviles.
- Integran el GPS y sistemas gráficos avanzados para proporcionar un sistema de guiado desde un punto de una ciudad a otro evitando congestionamientos de tránsito.
- Receptores personales.
- Excursiones en 4x4, como sistema de guiado para invidentes.

La gran penetración de este sistema se debe al bajo coste de los receptores. En la actualidad se emplea en aplicaciones profesionales:

- Transportes internacionales.
- Redes de autobuses.
- Policía.
- Ambulancias.

También estamos viendo su aparición en pruebas deportivas como en el caso del ciclismo, donde permite conocer en cada instante y en tiempo real el tiempo que saca un corredor a otro, la pendiente de una rampa de un puerto.

5.9.3 Navegación aérea.

Debido a su mayor complejidad técnica su proceso de instalación ha sido más lento. Se están desarrollando sistemas GNSS que pretenden mejorar los actuales sistemas de gestión de vuelos. Se están instalando en áreas de bajo tráfico, ya que su uso no está justificado si tenemos en cuenta que ya existe el RADAR.

La idea original del GPS, que aún hoy día se mantiene, era usarlo para navegación. Esto es, conocer la posición del observador en cualquier momento del día dentro de un sistema de referencia creado para tal fin. Esto es conocido como posicionamiento absoluto.

La posición del receptor es conocida a partir de las coordenadas de los satélites y las distancias medidas a por lo menos cuatro satélites, mediante una intersección espacial. La distancia a cada satélite es determinada haciendo uso de la fórmula $d = c \cdot t$; en donde c corresponde a la velocidad de la luz en el vacío y t el tiempo de recorrido de la señal desde el satélite hasta el receptor. Evidentemente se necesita proveer al sistema de un mecanismo de medida de tiempo.

Tanto los satélites como los receptores son provistos de relojes para tal efecto. Debido a que no se puede tener un reloj perfecto, tanto los relojes en el receptor y satélite poseen un error que afectará la distancia medida, más si se considera la magnitud de las distancias involucradas. Debido a que el intervalo de tiempo es calculado a partir de dos relojes distintos, con errores diferentes, es que se usa el término de pseudo-distancias para hacer referencia a las distancias medidas.

La determinación de coordenadas en forma absoluta presenta varios problemas. Además de los errores de reloj, se debe considerar que en la medición de pseudo-distancias la señal proveniente del satélite cambiará su velocidad de propagación al atravesar capas atmosféricas de distinta densidad, lo que introduce otro error en la posición. También, debe recordarse que la posición de observación es determinada a partir de las coordenadas de los satélites, la distancia medida, por lo tanto, también se encuentra afectada por las distintas perturbaciones orbitales, que sacan a los satélites de las órbitas teóricas. La exactitud en la determinación de coordenadas absolutas con respecto al sistema de referencia es entre 100 y 150 m en las tres coordenadas.

5.9.4 Usos en topografía y geodesia.

La posibilidad de usar el sistema para tareas de precisión se ha estudiado desde hace mucho tiempo. En la actualidad se han desarrollado técnicas para lograr exactitud topográfica y geodésica. Estas son conocidas como técnicas diferenciales o métodos de posicionamiento relativo. Esto es, que es posible conocer con gran exactitud la diferencias de coordenadas entre dos o más receptores. El principio se basa en la asunción de que en ambos extremos de una línea los errores de las órbitas de los satélites son iguales. En este caso, los mismos satélites tienen que ser usados en los extremos de la línea a medir. Además, mediante el uso de receptores que captan las dos frecuencias de transmisión de las señales, los errores debidos a la ionosfera pueden eliminarse. En cuanto a la troposfera esta es considerada mediante el uso de modelos atmosféricos adecuados.

Mediante el uso de estas técnicas, se pueden lograr precisiones menores a 1 m, y dependiendo del tipo de procesamiento y equipo se puede llegar a precisiones del cm, incluso de mm.

La posibilidad de usar el sistema para tareas de precisión se ha estudiado desde hace mucho tiempo. En la actualidad se han desarrollado técnicas para lograr exactitud topográfica y geodésica. Estas son conocidas como técnicas diferenciales o métodos de posicionamiento relativo. Esto es, que es posible conocer con gran exactitud la diferencias de coordenadas entre dos o más receptores. El principio se basa en la asunción de que en ambos extremos de una línea los errores de las órbitas de los satélites son iguales. En este caso, los mismos satélites tienen que ser usados en los extremos de la línea a medir. Además, mediante el uso de receptores que captan las dos frecuencias de transmisión de las señales, los errores debidos a la ionosfera pueden eliminarse.

En cuanto a la troposfera esta es considerada mediante el uso de modelos atmosféricos adecuados. Mediante el uso de estas técnicas, se pueden lograr precisiones menores a 1 m, y dependiendo del tipo de procesamiento y equipo se puede llegar a precisiones del cm, incluso de mm.

- Aplicaciones Geográficas.
- Permite situar puntos con gran precisión.
- Se pueden construir mapas geográficos mucho más precisos, mejorando los que había hasta ahora

5.9.5 Otras aplicaciones.

Sincronización, debido a que GPS ofrece una referencia temporal muy exacta. Lo usan algunos sistemas de transmisión.

Para conseguir la referencia temporal sólo se necesita un satélite, es muy barato Defensa civil, para la localización y delimitación de zonas afectadas por grandes catástrofes y guiado de vehículos de auxilio. El GPS está causando un gran impacto tanto en aspectos tecnológicos como económicos.

CAPITULO VI

Aplicaciones.

6.1 introducción

Hasta este momento del desarrollo de la tesis sistemas de posicionamiento global GPS-DGPS se han estudiado los aspectos electrónicos del sistema en cuanto a su funcionamiento a nivel de comunicación (Transmisión-Recepción) y el aspecto electrónicos de cada una de sus etapas.

En la segunda parte de la tesis se pretende abrir la mente de los usuarios de tal manera que cada uno de ellos pueda generar aplicaciones con todo lo antes visto, para tal motivo nosotros generaremos dos aplicaciones las cuales fueron :

- **Optimización del sistema de rutas de autobús de la Universidad Don Bosco.**
- **Demarcación de una zona de pesca.**

Para tal propósito se adquirieron dos receptores del tipo Magellan(Sportrack y serie 300) y sus respectivos interfases, a fin de realizar las mediciones pertinentes para dichas pruebas. Además se adquirió un software libre para Linux, el cual se llama GPS Manager el cual permite la descarga de los landmark o Waypoint(datos de geoposicionamiento) correspondientes a las mediciones y situarlos sobre un mapa electrónico ya sea para establecimiento de rutas o cualquier otra aplicación.

Además se realizaron dos entrevistas con personas expertas en el manejo del sistema para expandir la visión del proyecto y para tratar de determinar el uso del sistema GPS en las diferentes actividades del país y así poder establecer un porcentaje de uso real, las personas que amablemente colaboraron con el proyecto fueron:

- **Coronel Hernandez Díaz, Jefe de División Aérea, Ilopango.**
- **Ingeniero Cesar Urbina, Jefe proyectos MAG.**

Ademas se incluirán los manuales de los receptores y consideraciones prácticas a la hora de escoger un receptor contra una aplicación determinada .En el vídeo se mostrará brevemente el uso del software para la aplicación marítima.

6.2 Aplicaciones

6.2.1 Sistema de rastreo y sincronismo de rutas del sistema de autobuses de la Universidad Don Bosco.

Objetivo.

A través del uso de receptores GPS marcar los diferentes puntos donde el sistema de autobuses de la UDB presta servicio, en el area de la capital y ciudades cercanas. Además de establecer una referencia de hora para que cada alumno situado en el area metropolitana pueda acceder a una hora específica según sea su ubicación.

Desarrollo.

El procedimiento que se siguió es el siguiente:

1) Establecimiento de las rutas.

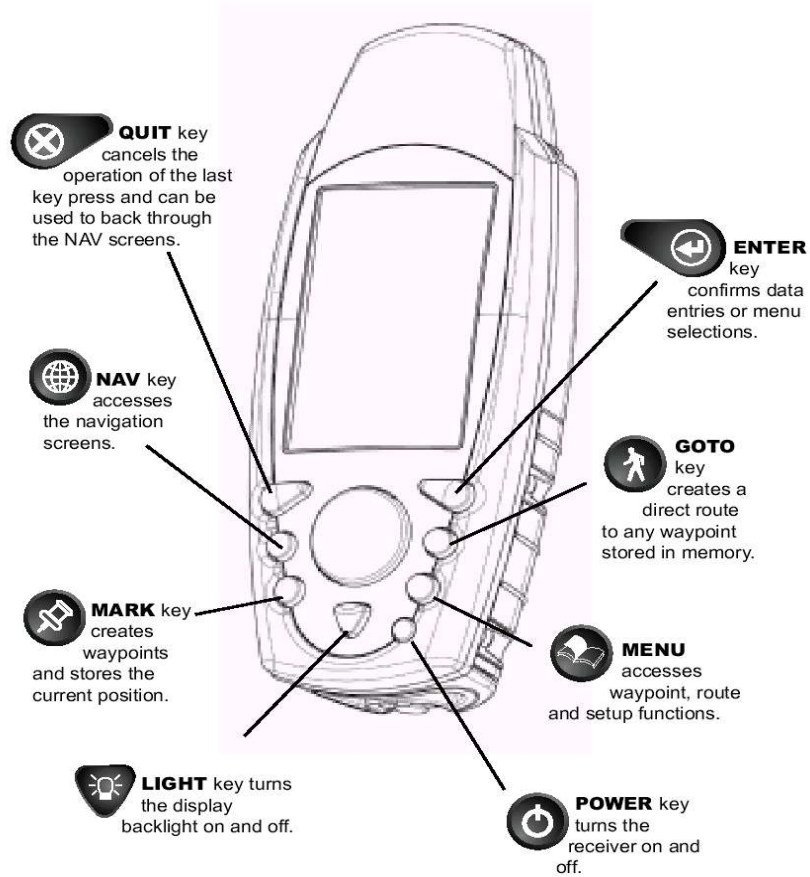
Se establecieron los recorridos de cada uno de los buses que prestan su servicio a la universidad Don Bosco, se establecieron cuatro rutas principales las cuales son:

- a) Universidad Don Bosco a Santa Tecla (5 p.m)
- b) Universidad Don Bosco a Santa Tecla (7:50 p.m)
- c) Apopa a Universidad Don Bosco (7 a.m)
- d) 75 av. sur (prolongación Juan Pablo II) a Universidad Don Bosco (6 a.m).

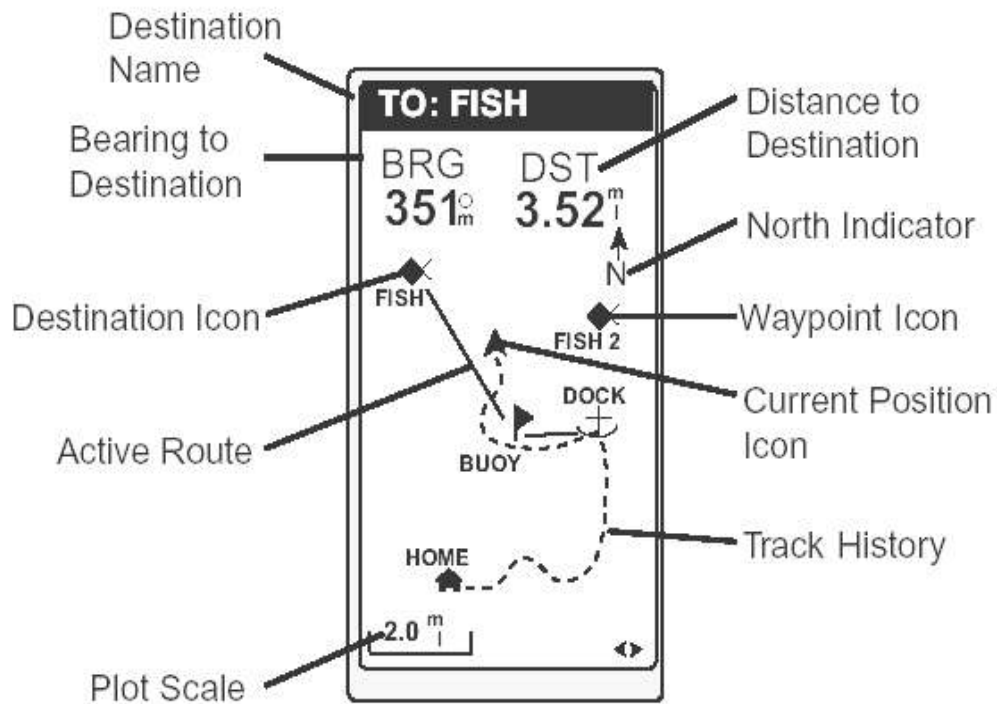
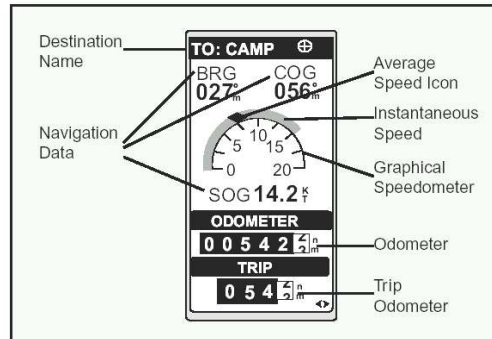
2) Preparación de equipo y toma de datos.

Como primer paso a cada una de las tomas de datos se siguió un protocolo de iniciación del equipo el cual fue el siguiente:

- a) Poner a cero los medidores del receptor utilizado (Magellan Sportrack **Ver anexos de manuales**) poner el receptor en 3D y ajustar para modo de navegación de tierra.



El sistema cuenta con varios modos de navegación tanto terrestre y marítimo. Se selecciono navegación Terrestre, este a su vez cuenta con varias pantallas los cuales proveen datos de velocidad, tiempo, distancia y orientación con respecto a los polos.



b) Se decidió marcar los puntos donde el autobús realizaba una parada o algún punto estratégico como centros comerciales, gasolineras etc.(landmark #)

c) Con la opción toma de LandMark(Marca en tierra) del receptor se puede marcar cada punto que se menciona anteriormente. Con este, el receptor toma un punto, el cual quedará guardado en el receptor, para poder ser posteriormente descargado a una PC con un software adecuado(GPS

Manager)



d) Se empezó la toma de datos en cada inicio de ruta de cada unidad se marco como LandMark# ahí se tomo los datos de tiempo y posición utilizando el receptor Magellan de ahí en adelante en cada punto de importancia se hicieron las tomas de posición, tiempo y distancia así se pudo establecer cada una de las rutas y tiempo que se muestran a continuación:

a) Ruta zacamil- UDB

| LandMark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|-----------|---------------------------|---------------------------------|----------|-----------|-------------|
| | N=Norte W=Oeste . | | Segundos | Millas | Millas/Hora |
| 1 | 13-42-46 N 089-08-16 w | San Antonio Abad y Bernal | 5:54 | - | 52 |
| 2 | 13-42-55N 089-13-03W | semáforo | 5:56 | - | 10.80 |
| 3 | 13-42-59N 089-13-00W | Hospital Militar | 5:56 | | 11.2 |
| 4 | 13-43-14N 089-13-01W | semáforo Bernal | 5:58 | - | 28.2 |
| 5 | 13-43-42N 089-12-53W | Final av. Bernal | 5:59 | | 30 |
| 6 | 13-43-44N 089-12-46W | Parada 1 | 6:00 | | 24.7 |

| LandMark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|-------------------------|--------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 7 | 13-43-49N 089-12-30W | Redondel Zacamil | 6:01 | | 22.1 |
| 8 | 13-43-49N 089-12-22W | Zacamil Parada 1 | 6:02 | | 19.3 |
| 9 | 13-43-41N 089-12-10W | Centro Comercial Zacamil | 6:03-6:09 | | 19.7 |
| 10 | 13-43-22N 089-12-13W | Ricaldone | 6:10 | | 7.1 |
| 11 | 13-43-14N 089-12-16W | Parque Ricaldone | 6:11 | | 8.5 |
| 12 | 13-43-01N 089-12-22W | Cruce Ricaldone | 6:12 | | 22.7 |
| 13 | 13-43-01N 089-12-35W | Pizza Nova | 6:12 | | 22.5 |
| 14 | 13-42-57N 089-12-37W | Parque Arpa | 6:13 | | 22.7 |
| 15 | 13-42-53N 089-12-39W | Redondel Cinemark | 6:14 | | 21 |
| 16 | 13-42-52N 089-12-36W | Cristobal colon | 6:14 | | 20 |
| 17 | 13-42-55N 089-12-16W | Inframen | 6:15 | | 31.5 |
| 18 | 13-42-56N 089-12-11W | Biggest U. Nacional | 6:16 | | 25 |
| 19 | 13-42-58N 089-12-02W | U.Nacional y 29 calle pte | 6:17 | | 37.1 |
| 20 | 13-42-43N 089-11-58W | B.Sal Juan Pablo II | 6:19 | | 28 |

| LandMark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|--------------------------|--------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 21 | 13-42-21N 089-11-47W | INDES | 6:20 | | 49 |
| 22 | 13-42-12N 089-11-47W | Juan Pablo II y II norte | 6:21 | | 27 |
| 23 | 13-42-11N 089-11-44W | Cruce P.I | 6:22 | | 44.3 |
| 24 | 13-41-11N 089-11-44W | Biblioteca Chapultepeq | 6:23 | | 10.1 |
| 25 | 13-42-10N 089-11-30W | UNIREFRI | 6:24 | | 7.1 |
| 26 | 13-42-09N 089-11-24W | Colegio Ruben Dario | 6:24 | | 11.9 |
| 27 | 13-42-10N 089-11-23W | Mercado San Miguelito | 6:25 | | 9.2 |
| 28 | 13-42-29N 089-11-22W | San Miguelito y 5 de noviembre | 6:26 | | 11 |
| 29 | 13-42-34N 089-11-21W | BAC San Miguelito | 6:26 | | 11.5 |
| 30 | 13-42-35N 089-11-16W | Muebles el artesano | 6:28 | | 22.6 |
| 31 | 13-42-34N 089-11-08W | Concheria 5 de noviembre | 6:29 | | 26.7 |
| 32 | 13-42-33N 089-10-41W | La Garita | 6:31 | | 21.5 |
| 33 | 13-42-35N 089-10-24W | intersección ciudad delgado | 6:33 | | 54.6 |
| 34 | 113-42-54N 089-10-13W | Calle a ba. San Sebastian | 6;33 | | 16.9 |

| LandMark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|-------------------------|-----------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 35 | 13-43-00N 089-10-08W | Salida Ba. San Sebastian | 6:34 | | 27.1 |
| 36 | 13-43-05N 089-10-03W | Dobles 2 | 6:35 | | 30.5 |
| 37 | 13-43-05N 089-09-52W | Dobles 3 | 6:36 | | 25.6 |
| 38 | 13-43-07N 089-09-48W | Dobles 4 | 6:36 | | 36.8 |
| 39 | 13-43-06N 089-09-44W | Dobles 5 | 6:36 | | 39.6 |
| 40 | 13-43-00N 089-09-41W | Cancha | 6:37 | | 64.3 |
| 41 | 13-43-03N 089-09-37W | Puente | 6:37 | | 38.3 |
| 42 | 13-43-09N 089-09-31W | Paso a desnivel | 6:37 | | 27.4 |
| 43 | 13-43-14N 089-09-26W | Colegio Arrupe | 6:39 | | 24.3 |
| 44 | 13-43-08N 089-09-22W | Entrada UDB | 6:40 | | 27.8 |
| 45 | 13-43-02N 089-09-22W | Caseta UDB | 6:40 | | 45.5 |

b) Ruta Apopa -UDB

| Landmark# | waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|---------------------|--------------|---------------|------------------|------------------|
| | N=Norte W=Oeste. | | Segundos | Millas | Millas/Hora |

| Landmark# | waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 1 | 13-48-08N 089-10-43W | Pque Apopa | 7:00 | 0 | 0 |
| 2 | 13-48-04N 089-10-37W | Salida a carretera | 7:05 | 0.1 | 0.9 |
| 3 | 13-47-39N 089-10-37W | Impresa | 7;09 | 0.25 | 2 |
| 4 | 13-47-35N 089-10-35W | Pericentro Apopa | 7:09 | 0.4 | 8.7 |
| 5 | 13-47-15N 089-10-26W | Paso a desnivel | 7:13 | 1.2 | 5.3 |
| 6 | 13-46-23N 089-10-00W | Primer retorno | 7:16 | 2 | 19.8 |
| 7 | 13-45-47N 089-09-56W | refinerías | 7:17 | 3 | 27 |
| 8 | 13-45-06N 089-10-06W | Col. Conte | 7:19 | 3.7 | 31.5 |
| 9 | 13-44-15N 089-10-02W | Cronos discoteca | 7:21 | 4.8 | 34.9 |
| 10 | 13-43-42N 089-10-12W | Repuestos Urquilla | 7:22 | 5 | 30.5 |
| 11 | 13-42-55N 089-10-32W | Texaco | 7:25 | 6.5 | 30 |
| 12 | 13-42-34N 089-10-37W | Shell | 7:27 | 7 | 20 |
| 13 | 13-43-02N 089-10-11W | Esso(garita) | 7:32 | 7.5 | 21.5 |
| 14 | 13-43-06N 089-09-50W | Esquina ciudad delgado | 7:34 | 7.9 | 23 |

| Landmark# | waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 15 | 13-43-09N 089-09-46W | Iglesia ciudad delgado | 7:35 | 8.1 | 21.3 |
| 16 | 13-43-15N 089-09-34W | Ba San Sebastian | 7:37 | 8.3 | 18 |
| 17 | 13-42-59N 089-09-21W | Calle a ciudadela | 7:38 | 8.4 | 20.3 |
| 18 | 13-42-57N 089-09-14W | Puente a ciudadela | 7:39 | 9 | 22.1 |
| 19 | 13-41-29N 089-07-47W | Entrada a ciudadela | 7:43 | 9.5 | 24.3 |
| 20 | 13-41-29N 089-07-47W | Parqueo Ciudadela | 7:45 | 9.7 | 23.2 |

c) Ruta UDB - Sta. Tecla.

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|------------------------------|------------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| | N=Norte S=Sur . | | Segundos | Millas | Millas/Hora |
| 1 | 13-42-56 89-09-14 | UDB Parqueo | 5:00 | 0 | 0 |
| 2 | 13-42-58 89-09-19 | Caseta UDB | 5:01:25 | 0.2 | 5 |
| 3 | 13-43-01 89-09-21 | Salida UDB | 5:02:44 | 0.3 | 3 |
| 4 | 13-43-05 89-09-09 | Parada UDB | 5:05:47 | 0.33 | 3 |
| 5 | 13-43-03 89-08-59 | Colegio Don Bosco | 5:09:12 | 0.4 | 4.5 |

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|-------------------------------|--|----------------|------------------|------------------|
| 6 | 13-43-02 89-08-30 | Estadio Don Bosco | 5:11:10 | 1.1 | 20 |
| 7 | 13-42-53 89-08-30 | Entrada Col. Santos | 5:12:24 | 1.5 | 26 |
| 8 | 13-42-37 89-08-33 | Triangulo Soyapango | 5:13:24 | 2.1 | 13 |
| 9 | 13-42-22 89-08-50 | semáforo Prado almacén | 5:15:02 | 2.3 | 7.3 |
| 10 | 13-42-14 089-08-55 | Biggest Soyapango | 5:19:10 | 2.4 | 3.5 |
| 11 | 13-42-13 89-09-01 | Plaza Soyapango | 5:20:29 | 2.5 | 13.7 |
| 12 | 13-42-03 89-09-04 | Salida Boulevard Ejercito | 5:21:00 | 2.65 | 13.67 |
| 13 | 13-42-03 89-09-19 | Entrada Lamatepeq | 5:21:40 | 3.4 | 39 |
| 14 | 13-42-05 89-09-46 | Molsa | 5:22:36 | 3.5 | 18 |
| 15 | 13-42-03 89-10-05 | Paso a desnivel | 5:23:30 | 3.6 | 12 |
| 16 | 13-42-00 89-10-20 | Terminal de buses | 5:24:28 | 3.8 | 22 |
| 17 | 13-42-00 89-10-34 | Reloj de flores | 5:26:20 | 4.5 | 23.31 |
| 18 | 13-42-03 89-10-46 | Esso Juan Pablo II | 5:27:00 | 4.7 | 25.9 |
| 19 | 13-42-05 089-10-59 | Pque. Centenario | 5:28:10 | 5.0 | 39.9 |

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|----------------------|---------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 20 | 13-42-06 89-11-09 | alcaldía San Salvador | 5:29:10 | 5.1 | 13.7 |
| 21 | 13-42-07 89-11-16 | Iglesia Juan pabloII | 5:30:10 | 5.3 | 17.8 |
| 22 | 13-42-09 89-11-24 | Pque. Infantil | 5:32:00 | 5.4 | 31.01 |
| 23 | 13-42-10 89-11-32 | Centro de Gobierno | 5:34:00 | 5.9 | 12.5 |
| 24 | 13-42-13 89-11-57 | Buses de Guatemala | 5:36:25 | 6.1 | 40.4 |
| 25 | 13-42-11 89-12-07 | Hospital Medico quirúrgico | 5:37:10 | 6.4 | 42.1 |
| 26 | 13-42-10 89-12-22 | Liceo salvadoreño | 5:39:10 | 6.5 | 28.6 |
| 27 | 13-42-14 89-12-38 | Parada Metrosur | 5:41:00 | 6.9 | 30.3 |
| 28 | 13-42-14 89-12-51 | TOYOTA | 5:41:30 | 7.1 | 25.8 |
| 29 | 13-42-17 89-13-01 | Pueblo viejo metrosur | 5:42:15 | 7.2 | 6.7 |
| 30 | 13-24-17 89-12-56 | Estadio Flor Blanca | 5:42:50 | 7.7 | 8.0 |
| 31 | 13-41-54 89-12-59 | Cesar' Nighth Club | 5:44:39 | 7.85 | 9.9 |
| 32 | 13-41-43 89-13-00 | Paso a desnivel Terminal de occidente | 5:45:36 | 8 | 9.6 |

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|------------------------------|---|----------------|------------------|------------------|
| 33 | 13-41-32 89-13-01 | Paso a desnivel Montserrat | 5:47:20 | 8.3 | 16.9 |
| 34 | 13-41-14 89-13-04 | Hno lejano | 5:50:37 | 8.6 | 23.9 |
| 35 | 13-41-06 89-13-05 | árbol de la paz | 5:53:09 | 8.9 | 12.2 |
| 36 | 13-41-04 89-13-16 | GEVESA | 5:59:04 | 9.2 | 12.9 |
| 37 | 13-41-01 89-13-29 | Torre Democracia | 6:01:30 | 9.6 | 2.1 |
| 38 | 13-41-00 89-13-51 | UCA | 6:04:09 | 9.8 | 8.3 |
| 39 | 13-41-01 89-14-03 | Bodegon de la cerámica | 6:10:03 | 10.0 | 3 |
| 40 | 13-41-01 89-14-14 | Ceiba de Guadalupe | 6:15:15 | 10.3 | 2.2 |
| 41 | 13-40-59 89-14-29 | HiperMall Las Cascadas | 6:16:20 | 10.9 | 31 |
| 42 | 13-40-41 89-14-57 | U.Matias Delgado | 6:16:50 | 11.1 | 30 |
| 43 | 13-40-21 89-15-34 | Esso Puerto Libertad | 6:17:21 | 11.5 | 30.2 |
| 44 | 13-40-15 89-15-54 | B. Cuscatlan | 6:17:40 | 11.8 | 26.9 |
| 45 | 13-40-16 89-16-16 | ITCA | 6:18:44 | 12.3 | 21.8 |
| 46 | 13-40-21 89-16-39 | PQUE. Sta. Tecla. | 6:20:30 | 12.7 | 16.9 |

d) Ruta UDB- Sta Tecla II

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|------------------------------|---|-----------------|------------------|--------------------|
| | N=Norte W=Oeste . | | Segundos | Millas | Millas/Hora |
| 1 | 13-42-57 89-09-14 | Parqueo UDB | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 13-42-57 89-09-20 | Caseta UDB | 7:50 | 0.1 | 3.5 |
| 3 | 13-43-05 89-09-09 | Sala de Reuniones | 7:52 | 0.3 | 2.4 |
| 4 | 13-43-03 89-08-59 | Colegio | 7:56 | 0.4 | 2.4 |
| 5 | 13-43-02 89-08-30 | Polideportiv Don Bosco | 7:58 | 1.1 | 3.1 |
| 6 | 13-42-55 89-08-30 | Unicentro | 7:59 | 1.2 | 18.2 |
| 7 | 13-42-40 89-08-32 | Coruña | 8:00 | 1.5 | 26.4 |
| 8 | 13-42-27 89-08-38 | Maria Auxiliadora | 8:01 | 1.8 | 30.6 |
| 9 | 13-42-21 89-08-51 | Triangulo Soyapango | 8:02 | 2.1 | 35 |
| 10 | 13-42-13 89-08-56 | Semáforo Almacenes Prado | 8:03 | 2.3 | 11.1 |
| 11 | 13-42-13 89-09-01 | Biggest | | | |

| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|----------------------|-------------------------------------|---------------|------------------|------------------|
| 12 | 13-42-04 89-09-04 | Plaza Soyapango | 8:04 | 2.5 | 26.6 |
| 13 | 13-42-03 89-09-17 | Resortesa | 8:05 | 2.8 | 18 |
| 14 | 13-42-05 89-09-45 | Credisa | 8:06 | 3.4 | 14.5 |
| 15 | 13-42-01 89-10-15 | MOLSA | 8:07 | 3.5 | 34.7 |
| 16 | 13-42-03 89-10-46 | Tiendona | 8:09 | 4.5 | 14.8 |
| 17 | 13-42-04 89-10-57 | Gasolinera ESSO Juan Pablo II | 8:10 | 4.7 | 12.7 |
| 18 | 13-42-07 89-11-09 | Pque. Centenario | 8:10 | 5 | 15.7 |
| 19 | 13-42-08 89-11-18 | Alcaldía S.S | 8:11 | 5.1 | 15.7 |
| 20 | 13-42-10 89-11-25 | Iglesia Juan Pablo II. | 8:12 | 5.3 | 16 |
| 21 | 13-42-11 89-11-35 | Pque. Infantil | 8:14 | 5.4 | 1.6 |
| 22 | 13-42-13 89-12-02 | Centro de gobierno | 8:16 | 5.9 | 26.7 |
| 23 | 13-42-10 89-12-26 | Hospital Medico Quirúrgico | 8:17 | 6.4 | 32.7 |
| 24 | 13-42-14 89-12-50 | Metrosur | 8:19 | 6.9 | 25.1 |
| 25 | 13-42-15 89-12-59 | 75 av. Sur | 8:19 | 7.1 | 22.4 |

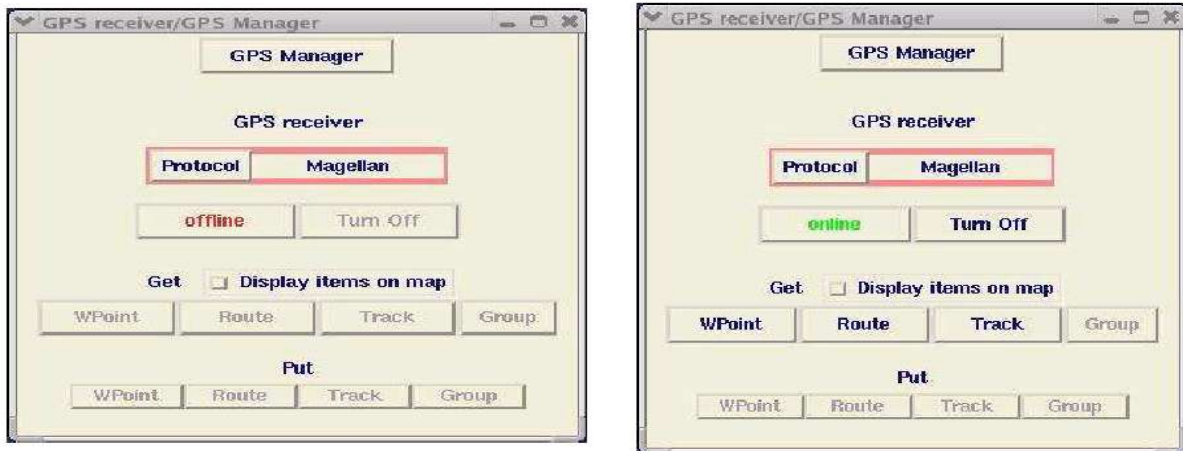
| Landmark# | Waypoint | Lugar | Tiempo | Distancia | Velocidad |
|------------------|----------------------|--|---------------|------------------|------------------|
| 26 | 13-42-20 89-12-56 | Toyota. | 8:20 | 7.2 | 22.5 |
| 27 | 13-41-56 89-12-59 | Estadio Magico Gonsalez | 8:21 | 7.7 | 32.6 |
| 28 | 13-41-38 89-13-01 | Paso a desnivel terminal de occidente | 8:22 | 8.0 | 32.6 |
| 29 | 13-41-22 89-13-03 | Paso a desnivel Montserrat | 8:23 | 8.3 | 9.3 |
| 30 | 13-41-06 89-13-06 | Hermano lejano | 8:24 | 8.6 | 20.1 |
| 31 | 13-41-00 89-13-54 | Torre democracia | 8:26 | 9.6 | 34.5 |
| 32 | 13-41-01 89-14-20 | Monumento al soldado | 8:27 | 10.1 | 29 |
| 33 | 13-40-55 89-14-33 | Ceiba de Guadalupe | 8:27 | 10.3 | 27.4 |
| 34 | 13-40-42 89-14-57 | Hiper Mall Las Cascadas. | 8:28 | 10.9 | 18.1 |

3) Descarga de los datos en la PC haciendo uso del GPS Manager

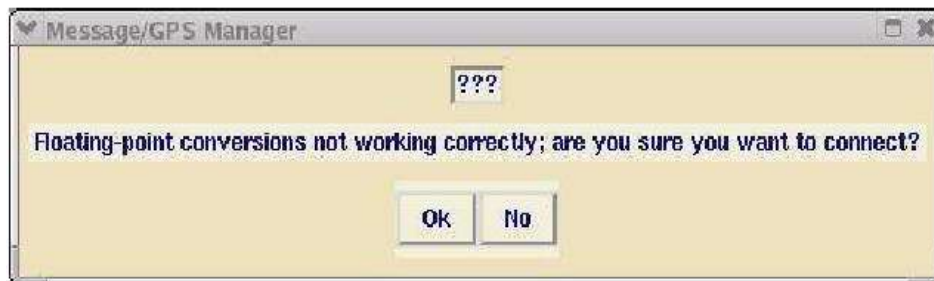
Se sigue siempre un protocolo para la descarga de los datos (waypoints), el programa ofrece varias facilidades para obtener datos de las mediciones según sea la aplicación a usar, a continuación se muestran las pantallas principales, los resultados pueden ser procesados a través del programa GPS Manager obteniendo los puntos sobre algún mapa electrónico y obteniendo curvaturas de nivel. (Ver sección de aplicación marítima o vídeo instruccional para idealizar sobre el uso del

programa)

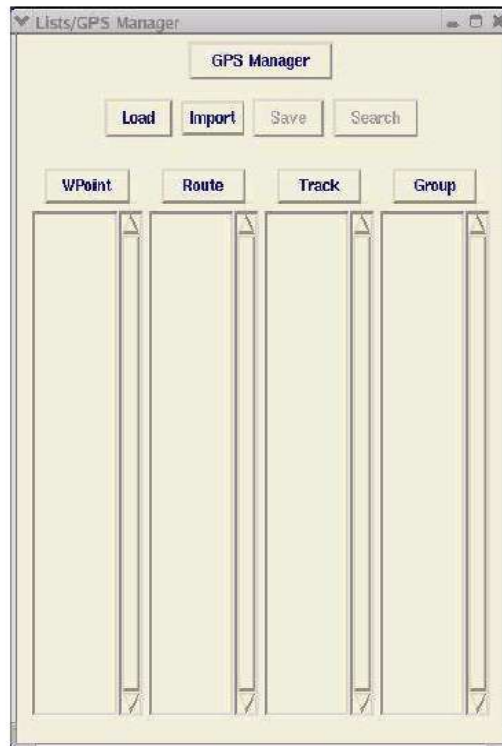
a) Descarga de los datos, esto implica la conexión del GPS al puerto paralelo de la PC haciendo uso de un cable interfaz (ver manuales en anexos) y el GPS manager empieza el reconocimiento de la unidad conectada en ese momento. Se le da click derecho sobre offline y el esta conectado ya en ese momento.



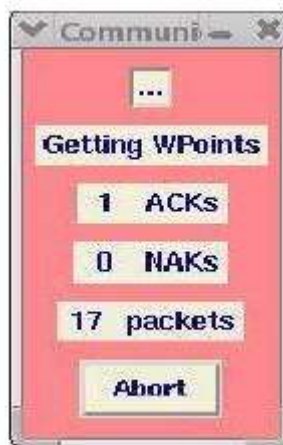
b) El pregunta en ese momento si se empieza la descarga de los datos, se le oprime OK y listo.



c)El programa ha identificado hasta el momento el tipo de receptor conectado a la PC y este da la opción de comenzar la descarga de los datos y pregunta que tipo de datos vamos a bajar del receptor, ya sean Waypoint, Track o Rutas.



d) El comienza a descargar los waypoints, dando información del progreso.



e) Al finalizar la descarga de datos el pone otra vez la ventana anterior para mostrar los datos obtenidos.



f) El siguiente paso fue, referenciar los puntos de marca obtenidos sobre un mapa digital.



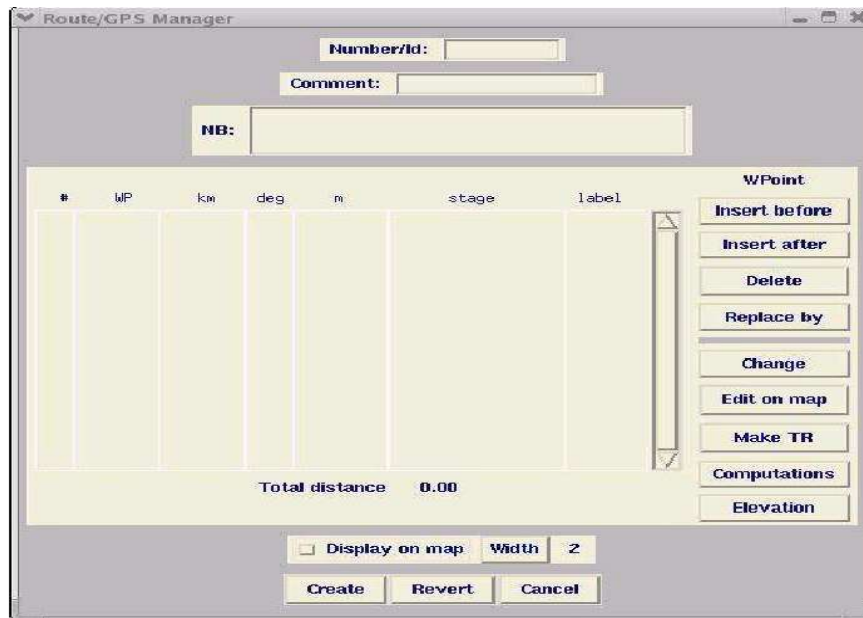
g) El siguiente paso fue Georeferenciar los puntos para eso se escogió la opción Affine.



h) Luego se escogieron tres puntos de marcas que habían sido tomados en algún lugar estratégico, esto es para establecer que los puntos están en un rango real con las mediciones realizadas y posteriormente se ubicaron sobre el mapa electrónico.



i) Luego con los tres puntos georeferenciados se estableció una ruta haciendo uso de los puntos de marca sobrantes. Primero ponemos un nombre a nuestra ruta y luego comenzamos la descarga esto se hace con la opción insert after.



j) Luego el desplegara el resultado final de nuestra ruta sobre el mapa haciendo uso de la opción **make it** de la ilustración anterior, además con las opciones de **computations** y **elevations** se desplegaran las curvas de nivel como se ilustra a continuación.

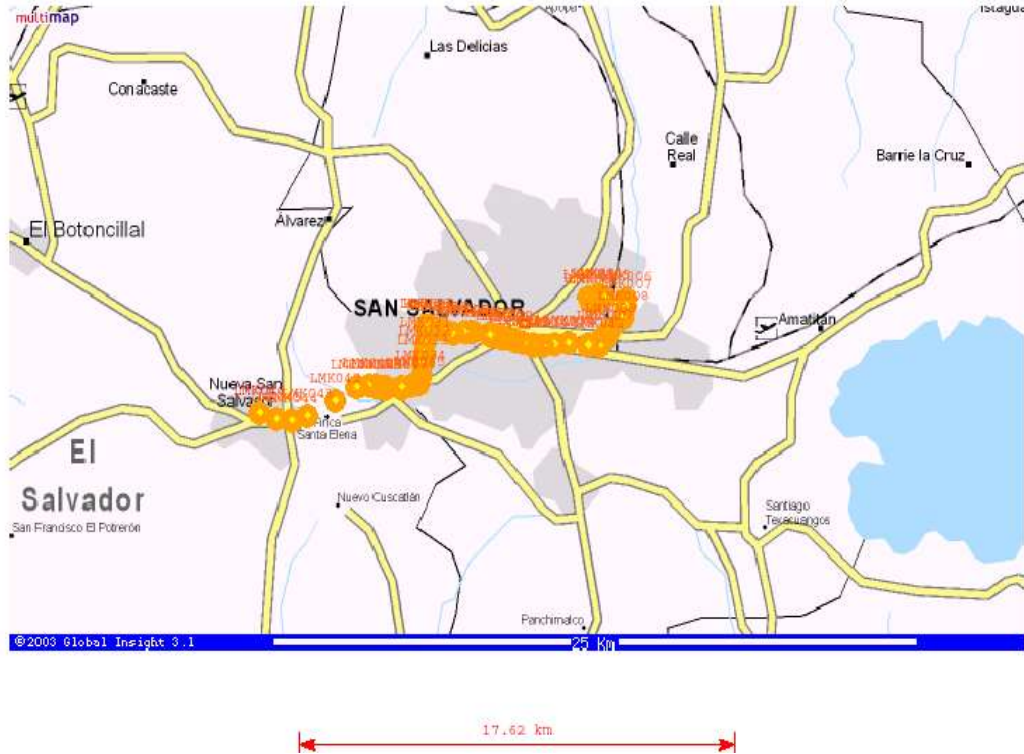
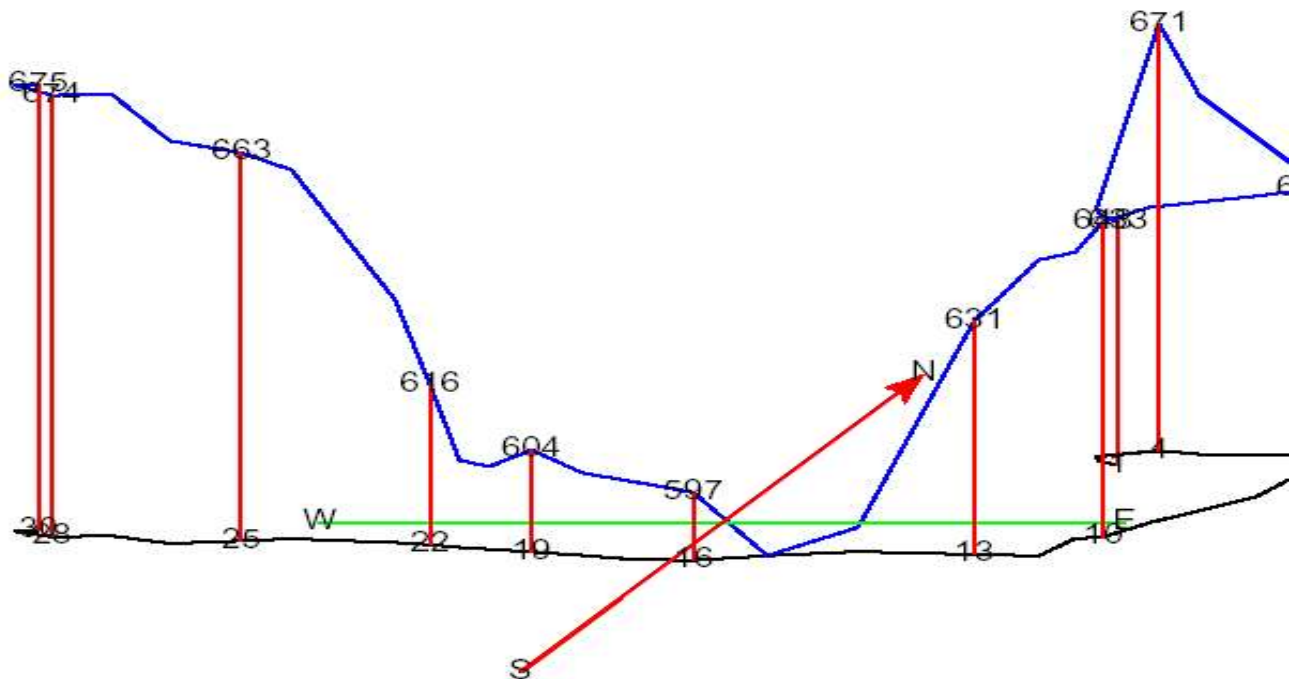


Figura 6.1 Puntos descargados del GPS usando el GPS manager dando como resultado la ruta de UDB a Sta Tecla.



ruta de autobuses UDB CDB-Santa Tecla 1pm

Figura 6.2 Curvas de nivel de la ruta UDB a Sta Tecla
Las curvas de nivel proveen el dato de altura con respecto al mar de cada punto

Resultados.

Con los datos obtenidos tiempo, velocidad, distancia y posición nosotros podemos establecer un marco de referencia muy preciso sobre cada punto donde cada unidad presta sus servicios, es decir con estos datos se pueden conseguir varios propósitos:

- 1) Cada alumno podrá estar seguro de la hora exacta que la unidad que el utilice estará en un marco de tiempo exacto, este tipo de sistema y estudio es utilizado por las compañías de buses americanos en USA donde a través de una pantalla el usuario sabe exactamente el horario de cada unidad.
- 2) Establecimiento de una ruta fija es decir el conductor de cada autobús estaría limitado a cumplir una ruta fija, es decir habrá economía de combustible.
- 3) Establecimiento de horarios contra horas picos debido, a que el estudio y los datos se tomaron con base en las estadísticas.

6.2.2 Simulación marítima de un área de pesca artesanal en el lago de Ilopango.

Objetivo

Por medio de esta prueba se pretenden demostrar:

Que con el uso de receptores GPS se pueden demarcar áreas triangulares con el fin de optimizar la pesca artesanal de una flota dada de lanchas pesqueras, es decir demarcar en el agua, un área para una embarcación determinada.

Que a través de receptores GPS se pueden establecer rutas de navegación de un punto origen a un punto destino la utilidad de esto es, obtener rutas más cortas con esto se logrará optimizar tiempos de trabajo, ahorro de combustible así como también la navegación sobre rutas previamente establecidas.

Desarrollo.

- 1) Se calibro el equipo de forma similar a la prueba anterior con la única diferencia que en este caso se utilizo el receptor en modo de navegación marítima(ver manuales).
- 2) Luego se considero la porción del lago donde se tomarían los puntos de marca, esto se hizo de tal forma que la porción tomada se asemejara al area de pesca que toman los pescadores artesanales en alta mar. Esta porción se eligió de forma triangular debido a que los países que usan GPS para pesca artesanal toman porciones triangulares para optimizar rutas.
- 3) Luego de elegir la ruta nos embarcamos y comenzamos a tomar los puntos de marca de mar de una forma periódica hasta realizar la ruta triangular que nosotros establecimos.

- 4) Para comprobar la eficiencia en tiempo de la ruta establecida, nos embarcamos en una segunda lancha pero esta vez utilizando el GPS para la navegación y se pudo comprobar la mejoría en en tiempo de recorrido, es de notar que las lanchas siempre navegaron a una velocidad similar y constante.

Los datos obtenidos con el receptor para el establecimiento de la ruta son los siguientes:

| Landmark | waypoint | Lugar | Velocidad | Tiempo |
|-----------------|------------------------------|-----------------------------------|------------------|---------------|
| 1 | 13-24-04 89-04-35 | Turicentro Apulo | 0 | 8:46 |
| 2 | 13-42-03 89-04-36 | Embarcadero Turicentro | 0 | 8:46 |
| 3 | 13-42-03 89-04-31 | Area Turicentro | 7.2 | 8:47 |
| 4 | 13-42-03 89-04-23 | Final Turicentro | 7.4 | 8:49 |
| 5 | 13-42-02 89-04-16 | Casa 2 Plantas | 7.4 | 8:50 |
| 6 | 13-42-03 89-04-07 | Isleta | 7.4 | 8:51 |
| 7 | 13-42-07 89-04-00 | Salida Isleta | 7.5 | 8:52 |
| 8 | 13-42-03 89-03-53 | Vista arenera | 7.7 | 8:52 |
| 9 | 13-42-02 89-03-46 | Entrada Arenera | 7.4 | 8:54 |
| 10 | 13-42-01 89-03-38 | Llegada 2 penasco | 7.5 | 8:55 |

| Landmark | waypoint | Lugar | Velocidad | Tiempo |
|-----------------|----------------------|-------------------------------|------------------|---------------|
| 11 | 13-41-59 89-03-29 | Referencia segundo penasco | 7.4 | 8:57 |
| 12 | 13-41-59 89-03-24 | Salida Penasco | 7.5 | 8:57 |
| 13 | 13-42-04 89-03-21 | Entrada a Pista de Remos | 7.30 | 8:58 |
| 14 | 13-42-06 89-03-15 | Pistas de Remos | 4.7 | 9:00 |
| 15 | 13-41-57 89-03-14 | Salida Pista de remos | 7.4 | 9:02 |
| 16 | 13-41-47 89-03-13 | Hacia Islas los quemados | 7.5 | 9:03 |
| 17 | 13-41-35 89-03-11 | “ | 7.4 | 9:05 |
| 18 | 13-41-20 89-03-10 | “ | 7.4 | 9:07 |
| 19 | 13-41-10 89-03-09 | “ | 7.4 | 9:09 |
| 20 | 13-40-56 89-03-07 | “ | 7.4 | 9:11 |
| 21 | 13-40-31 89-03-04 | Llegando a Islas los quemados | 7.4 | 9:15 |
| 22 | 13-40-21 89-03-42 | “ | 7.5 | 9:17 |
| 23 | 13-40-16 89-03-01 | Islas los quemados | 7.4 | 9:18 |
| 24 | 13-40-12 89-03-02 | Isleta #2 los quemados | 6.9 | 9:19 |

| Landmark | waypoint | Lugar | Velocidad | Tiempo |
|-----------------|------------------------------------|---|------------------|---------------|
| 25 | 13-40-12 89-03-10 | Hacia Isla los Patos | 7.3 | 9:20 |
| 26 | 13-40-13 89-03-28 | “ | 7.2 | 9:23 |
| 27 | 13-40-15 89-03-52 | “ | 7.4 | 9:27 |
| 28 | 13-40-15 89-04-05 | “ | 7.2 | 9:29 |
| 29 | 13-40-16 89-04-21 | Isla los Patos | 7.9 | 9:31 |
| 30 | 13-40-21 89-04-29 | Salida isla los patos a turicentro | 7.4 | 9:33 |
| 31 | 13-40-31 89-04-29 | Hacia Turicentro | 7.34 | 9:34 |
| 32 | 13-40-46 89-04-31 | “ | 7.3 | 9:37 |
| 33 | 13-40-57 89-04-32 | “ | 7.5 | 9:38 |
| 34 | 13-41-09 89-04-33 | “ | 7.40 | 9:40 |
| 35 | 13-41-26 89-04-34 | “ | 7.1 | 9:43 |
| 36 | 13-41-35 89-04-35 | “ | 7.3 | 9:44 |
| 37 | 13-41-42 89-04-35 | “ | 6.9 | 9:45 |
| 38 | 13-41-53 89-04-36 | Llegando a Turicento | 7.2 | 9:47 |

| Landmark | waypoint | Lugar | Velocidad | Tiempo |
|-----------------|------------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------|
| 39 | 13-41-59 89-04-36 | Llegando a Turicento | 6.4 | 9:48 |
| 40 | 13-42-03 89-04-36 | Turicento | 0 | 9:49 |

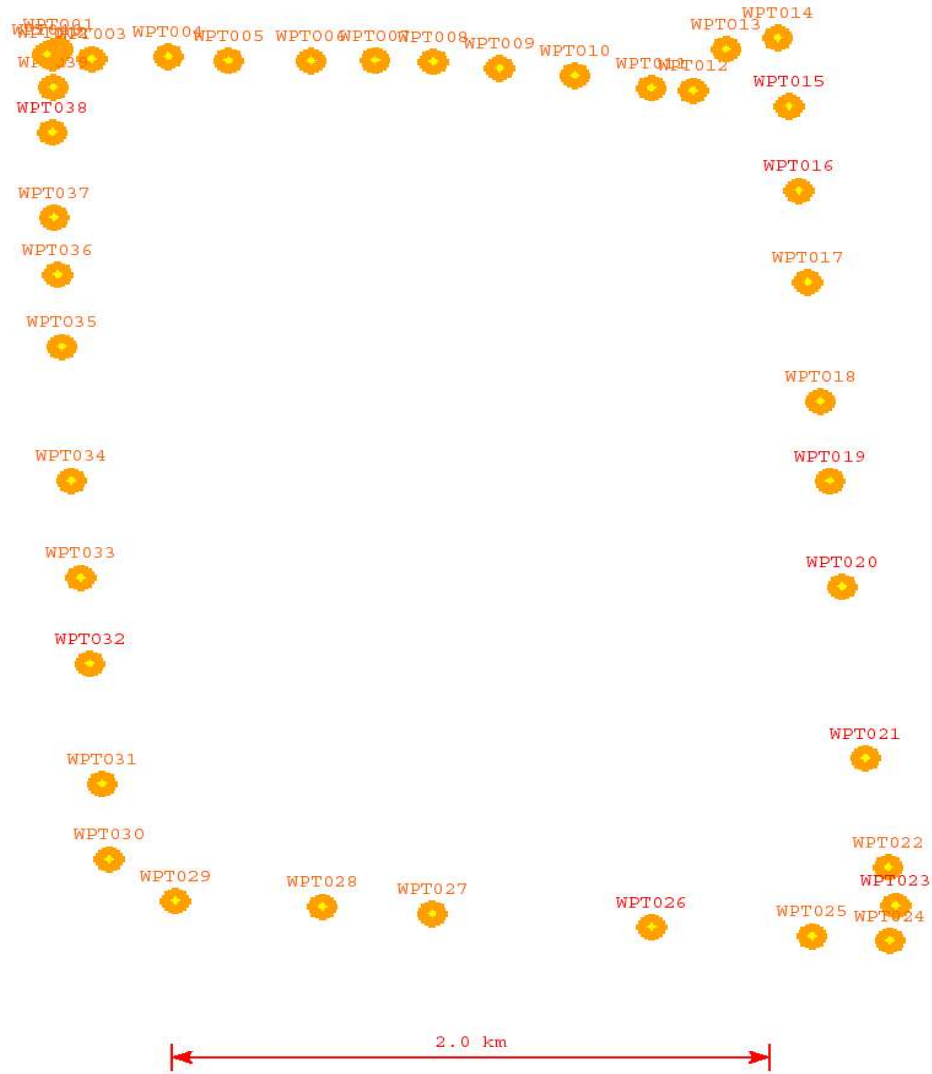
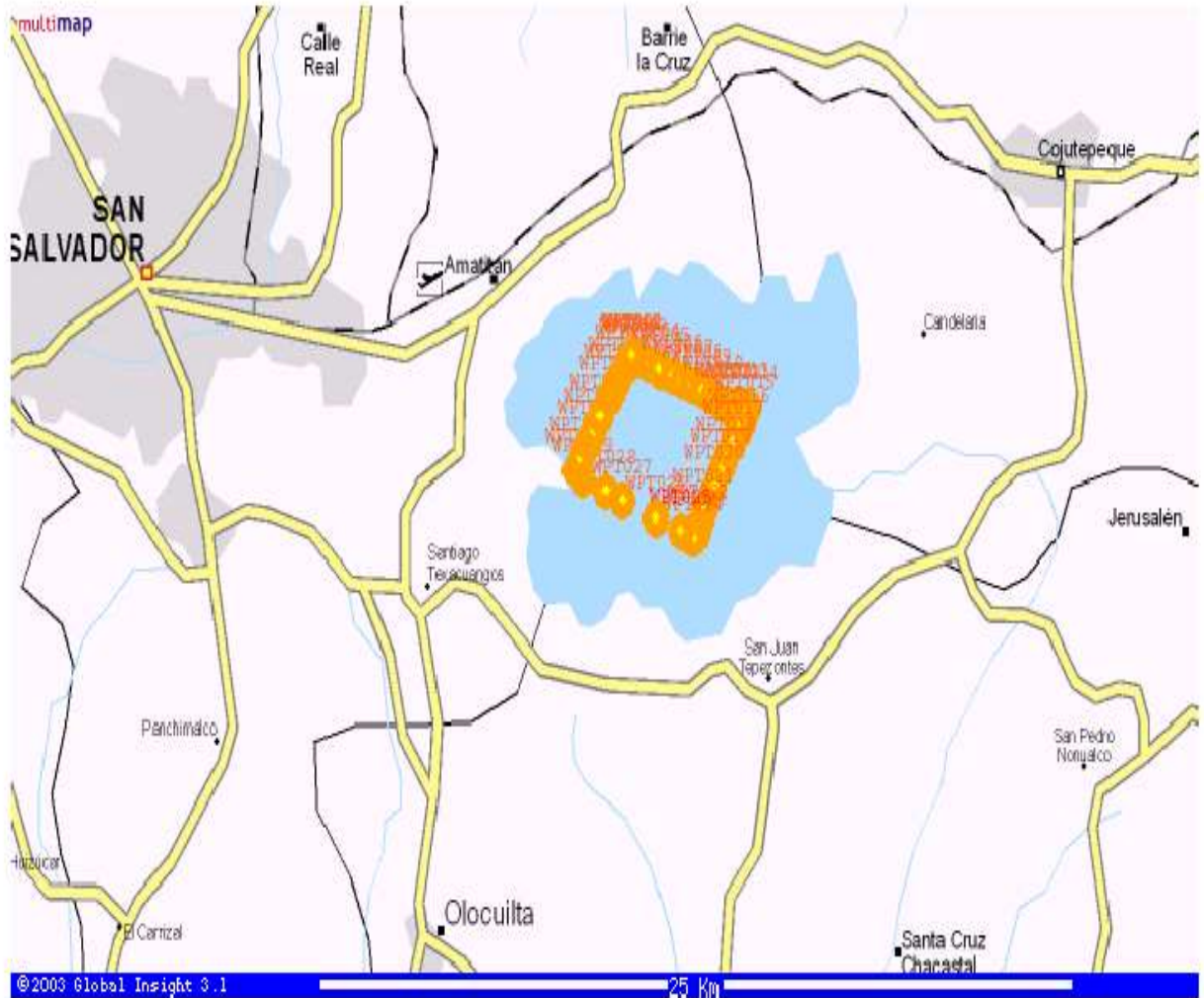


Figura 6.3 Estructura de Waypoints tomadas de una porción del lago de Ilopango



Mapa GIS Aplicacion 2

Figura 6.4 Mapa de lago con la ruta establecida

6.3 Recomendaciones de compra de equipo según aplicación.

Existen diferentes tipos de receptores GPS en el mercado actual cada uno con diferentes características de precisión, interfases y costos; la precisión y el costo son dos características relacionadas una de la otra es decir no se puede obtener máxima precisión a un costo bajo.

Existen fabricantes internacionales como por ejemplo Magellan, Trimble, etc. Cada uno de estos fabricantes ofrece diferentes modelos según la aplicación a realizar,

1) cada modelo poseen características diferentes de precisión por esta razón se dividen en :

a)Receptores milimetricos(PPS), estos proveen precisión en milímetros

b)Receptores centimetricos , proveen precisión de centímetros.

c)Receptores de Pseudorange, proveen precisión métrica

2) Además los receptores que se encuentran en el mercado se pueden clasificar según el número de canales que el receptor posee para la recepción de información del satélite estos son:

a)Unicanal: Cuentan con un único canal físico para la recepción de datos, su ventaja es su bajo costo, y que puede ser utilizado para aplicaciones que no requieren mucha precisión ni buena respuesta en tiempo.

b)Multiplexado:Este cuenta con un canal físico y varios canales lógicos es decir desarrolla el proceso de multiplexación por medio de software pero la adquisición se hace por un solo canal, su precisión es buena pero con la respuesta en tiempo es lenta similar al unicanal.

c)Multicanal: Cuenta con varios canales físicos para la adquisición de datos es el tipo de receptor que posee mejor respuesta en precisión y tiempo.

3) Otra características a la hora de comprar un receptor GPS es el soporte para sistemas de aumentación entre ellos tenemos,WAAS(Wide Area Aumentation System), LAAS(Local Area Aumentation System) y Pseudolitos(epiteliales terrestres). Cada sistema de aumentacion permite

usar satélites o estaciones terrestres las cuales reducen el porcentaje de error de las mediciones con nuestro receptor.

- 4) Además de las consideraciones aparte de la precisión y respuesta en tiempo de nuestros receptores de mano, es que debemos de considerar las características de configuración y visualización estas características se asocian con la facilidad de uso y visualización de datos en el panel display.
- 5) Otra característica importante de nuestros receptores es la cantidad de memoria que estos poseen para almacenar datos del sistemas tales como rutas, Waypoints y Tracks, el receptor deberá tener la capacidad de almacenar una cantidad considerable de datos según sea la aplicación para luego ser descargadas a nuestro sistema de computo.
- 5) Otra característica importante es el tipo de interfases que soporta nuestro receptor para poderse interfazar con un centro de procesamiento ,además de el formato en que el receptor almacena los datos.
- 6) Las características físicas como el peso, las temperaturas de operación tanto en extremos fríos como cálidos.
- 7) El consumo de energía del receptor según sea la aplicación, el tiempo de operación es de alrededor de 20 a 30 horas.
- 8) Otra característica importante es la altura máxima y la velocidad máxima a que el receptor es capaz de trabajar.
- 9) Otra característica importante a tener en cuenta son los software de comunicación entre los receptores y la computadora, cada compañía desarrolla sus propios softwares y es recomendable que puedan realizar GPS diferencial.

CONCLUSIONES.

CONCLUSIONES

- 1) En el desarrollo de la tesis sistemas de posicionamiento global GPS-DGPS se hizo un estudio de esta tecnología en cuanto a sus aspectos electrónicos, sistemas de comunicación y software.
- 2) Se Estudiaron los diagramas en bloques así como los diagramas electrónicos de los receptores, además se hizo lo mismo con los generadores de códigos C/A y P(y). Con esto se pretende que cualquier estudiante de ingeniería tenga un conocimiento amplio de la tecnología a fin de realizar aplicaciones posteriores.
- 3) Al investigar sobre la tecnología GPS-DGPS se pudo constatar, que esta , no esta siendo explotada en nuestro país por un sin número de razones entre las cuales se pueden mencionar:
 - a)El desconocimiento total de la tecnología de posicionamiento global a niveles de ingeniería.
 - b)La falta de recursos, tanto técnico como económico por parte de las instituciones.
 - c)La confianza en el desarrollo de tareas tradicionales contra la automatización de estas.
- 4) Se desarrollaron aplicaciones practicas con dos GPS diferentes para lograr determinar rangos de precisión, los receptores utilizados fueron:
 - a)Magellan Sportrack.
 - b)Magellan Serie 300
- 5) En nuestro país pueden automatizarse varias tareas haciendo uso de la tecnología GPS-DGPS, según la experiencia al desarrollar esta tesis, se encontró un amplio campo de explotación, teniendo el apoyo tanto técnico como económico, se destacan los siguientes campos:
 - a) Medición de terrenos y calidad de suelos para tener una base concreta en cualquier área de nuestro país, para futuros proyectos arquitectónicos.
 - b) Explotación de la pesca artesanal, con ayuda de sonar demarcar zonas de pesca de una determinada especie marina, con esto se evita realizar la pesca utilizando como variable la suerte.
 - c) Con ayuda de los receptores GPS realizar triangulaciones de zonas para mejorar eficiencia en tiempo de cada embarcación pesquera.

- d)** Establecimiento de rutas para vendedores(automotores) haciendo un estudio de horas picos, y eficiencias de rutas con esto se puede mejorar enormemente los servicios y obtener beneficios en cuanto a economía de combustible, esto se esta desarrollando en muchas ciudades del mundo.
- 6) La tecnología de posicionamiento global es el futuro para el desarrollo de muchas aplicaciones.
 - 7) Los receptores GPS pueden tener diferentes rangos de precisión y costo económico, el receptor a utilizar para una aplicación especifica, depende generalmente, de los rangos de precisión requeridos y la velocidad de respuesta del receptor.
 - 8) La información recabada es valida para la constelación de satélites hasta el 2006.

ALCANCES Y LIMITANTES.

ALCANCES

1. En el desarrollo de la tesis sistemas de posicionamiento global GPS-DGPS se realizo un estudio en cuanto a los aspectos electrónicos de los transmisores, receptores y tratamiento de las señales, que esta tecnología utiliza para realizar sus tareas, llevando esta investigación a un nivel muy específico lo que dara lugar a cualquier persona con conocimiento de ingeniería a abrir su mente para el desarrollo de aplicaciones, para automatizar procesos o mejorar tiempos en el desarrollo de tareas.
2. Se desarrollaron dos aplicaciones practicas utilizando GPS, las cuales pretendían experimentar en el uso de los receptores GPS, y automatizar dos procesos dados los cuales fueron discutidos anteriormente.

LIMITANTES.

La única limitante en el desarrollo de esta tesis fue el aspecto económico, ya que debido al alto costo de un receptor **DGPS**, el cual puede oscilar entre los \$9000 y \$60000, esto es algo que impidió realizar una prueba de esta tecnología, además de que las instituciones que poseen este tipo de receptor no están abiertas a colaborar en cuanto a un préstamo o ellos realizar una demostración para los fines didácticos de esta tesis

Los receptores Magellan utilizados para desarrollar aplicaciones tienen un rango de error de entre 10 a 25mts por lo que es imposible realizar aplicaciones PPS es decir no son capaces de generar **DGPS**.

APENDICE.

ANEXO A

APÉNDICE**PARÁMETROS DE TRANSFORMACIÓN DE DATUM****Reference Ellipsoids****and****Geodetic Datum Transformation Parameters (Local to WGS-84)****From****NIMA 8350.2 4 July 1977****and****MADTRAN 1 October 1996****• Reference Ellipsoids**

| Ellipsoid | Semi-major axis | 1/flattening |
|-------------------------|------------------------|---------------------|
| Airy 1830, | 6377563.396 | 299.3249646 |
| Modified Airy | 6377340.189 | 299.3249646 |
| Australian National | 6378160 | 298.25 |
| Bessel 1841 (Namibia) | 6377483.865 | 299.1528128 |
| Bessel 1841 | 6377397.155 | 299.1528128 |
| Clarke 1866, | 6378206.4 | 294.9786982 |
| Clarke 1880, | 6378249.145 | 293.465 |
| Everest (India 1830)" | 6377276.345 | 300.8017 |
| Everest (Sabah Sarawak) | 6377298.556 | 300.8017 |
| Everest (India 1956) | 6377301.243 | 300.8017 |
| Everest (Malaysia 1969) | 6377295.664 | 300.8017 |
| Everest (Malay. & Sing) | 6377304.063 | 300.8017 |
| Everest (Pakistan) | 6377309.613 | 300.8017 |
| Modified Fischer 1960 | 6378155 | 298.3 |
| Helmert 1906 | 6378200 | 298.3 |
| Hough 1960 | 6378270 | 297 |

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------|------|------|---|----|----|----|-----|
| | | | | | Louisiana; Minnesota; Missouri) | | | | |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -12 | 130 | 190 | Mexico | 8 | 6 | 6 | 22 |
| North American 1983 | GRS 80 | 0 | 0 | 0 | Alaska (Excluding Aleutian Ids) | 2 | 2 | 2 | 42 |
| North American 1983 | GRS 80 | -2 | 0 | 4 | Aleutian Ids | 5 | 2 | 5 | 4 |
| North American 1983 | GRS 80 | 0 | 0 | 0 | Canada | 2 | 2 | 2 | 96 |
| North American 1983 | GRS 80 | 0 | 0 | 0 | CONUS | 2 | 2 | 2 | 216 |
| North American 1983 | GRS 80 | 1 | 1 | -1 | Hawaii | 2 | 2 | 2 | 6 |
| North American 1983 | GRS 80 | 0 | 0 | 0 | Mexico; Central America | 2 | 2 | 2 | 25 |
| North Sahara 1959 | Clarke 1880 | -186 | -93 | 310 | Algeria | 25 | 25 | 25 | 3 |
| Observatorio Meteorologico 1939 | International 1924 | -425 | -169 | 81 | Azores (Corvo & Flores Islands) | 20 | 20 | 20 | 3 |
| Old Egyptian 1907 | Helmert 1906 | -130 | 110 | -13 | Egypt | 3 | 5 | 8 | 14 |
| Old Hawaiian | Clarke 1866 | 89 | -279 | -183 | Hawaii | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Old Hawaiian | Clarke 1866 | 45 | -290 | -172 | Kauai | 20 | 20 | 20 | 3 |
| Old Hawaiian | Clarke 1866 | 65 | -290 | -190 | Maui | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Old Hawaiian | Clarke 1866 | 61 | -285 | -181 | MEAN FOR Hawaii; Kauai; Maui; Oahu | 25 | 20 | 20 | 15 |
| Old Hawaiian | Clarke 1866 | 58 | -283 | -182 | Oahu | 10 | 5 | 5 | 8 |
| Oman | Clarke 1880 | -346 | -1 | 224 | Oman | 3 | 3 | 9 | 7 |
| Ordnance Survey Great Britain 1936 | Airy 1830 | 371 | -112 | 434 | England | 5 | 5 | 6 | 21 |
| Ordnance Survey Great Britain 1936 | Airy 1830 | 371 | -111 | 434 | England; Isle of Man; Wales | 10 | 10 | 15 | 25 |

| | | |
|---------------------|---------|---------------|
| Indonesian 1974 | 6378160 | 298.247 |
| International 1924 | 6378388 | 297 |
| Krassovsky 1940 | 6378245 | 298.3 |
| GRS 80 | 6378137 | 298.257222101 |
| South American 1969 | 6378160 | 298.25 |
| WGS 72 | 6378135 | 298.26 |
| WGS 84 | 6378137 | 298.257223563 |

• Geodetic Datum Transformation Parameters (Local to WGS-84)

d = delta in meters; e = error estimate in meters; #S = number of satellite measurement stations

| Datum | Ellipsoid | dX | dY | dZ | Region of use | eX | eY | eZ | #S |
|---------------------------|---------------------|------|------|-----|---------------------------|----|----|----|----|
| Adindan | Clarke 1880 | -118 | -14 | 218 | Burkina Faso | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Adindan | Clarke 1880 | -134 | -2 | 210 | Cameroon | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Adindan | Clarke 1880 | -165 | -11 | 206 | Ethiopia | 3 | 3 | 3 | 8 |
| Adindan | Clarke 1880 | -123 | -20 | 220 | Mali | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Adindan | Clarke 1880 | -166 | -15 | 204 | MEAN FOR Ethiopia; Sudan | 5 | 5 | 3 | 22 |
| Adindan | Clarke 1880 | -128 | -18 | 224 | Senegal | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Adindan | Clarke 1880 | -161 | -14 | 205 | Sudan | 3 | 5 | 3 | 14 |
| Afgooye | Krassovsky 1940 | -43 | -163 | 45 | Somalia | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Ain el Abd 1970 | International 1924 | -150 | -250 | -1 | Bahrain | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Ain el Abd 1970 | International 1924 | -143 | -236 | 7 | Saudi Arabia | 10 | 10 | 10 | 9 |
| American Samoa 1962 | Clarke 1866 | -115 | 118 | 426 | American Samoa Islands | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Anna I Astro 1965 | Australian National | -491 | -22 | 435 | Cocos Islands | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Antigua Island Astro 1943 | Clarke 1880 | -270 | 13 | 62 | Antigua (Leeward Islands) | 25 | 25 | 25 | 1 |

| | | | | | | | | | |
|--|-----------------------|------|------|------|--|----|----|----|----|
| Ordnance Survey Great Britain 1936 | Airy 1830 | 375 | -111 | 431 | MEAN FOR England; Isle of Man; Scotland; Shetland Islands; Wales | 10 | 10 | 15 | 38 |
| Ordnance Survey Great Britain 1936 | Airy 1830 | 384 | -111 | 425 | Scotland; Shetland Islands | 10 | 10 | 10 | 13 |
| Ordnance Survey Great Britain 1936 | Airy 1830 | 370 | -108 | 434 | Wales | 20 | 20 | 20 | 3 |
| Pico de las Nieves | International 1924 | -307 | -92 | 127 | Canary Islands | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Pitcairn Astro 1967 | International 1924 | 185 | 165 | 42 | Pitcairn Island | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Point 58 | Clarke 1880 | -106 | -129 | 165 | MEAN FOR Burkina Faso & Niger | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Pointe Noire 1948 | Clarke 1880 | -148 | 51 | -291 | Congo | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Porto Santo 1936 | International 1924 | -499 | -249 | 314 | Porto Santo; Madeira Islands | 25 | 25 | 25 | 2 |
| Provisional South American 1956 | International 1924 | -270 | 188 | -388 | Bolivia | 5 | 11 | 14 | 5 |
| Provisional South American 1956 | International 1924 | -270 | 183 | -390 | Chile (Northern; Near 19oS) | 25 | 25 | 25 | 1 |
| Provisional South American 1956 | International 1924 | -305 | 243 | -442 | Chile (Southern; Near 43oS) | 20 | 20 | 20 | 3 |
| Provisional South American 1956 | International 1924 | -282 | 169 | -371 | Colombia | 15 | 15 | 15 | 4 |
| Provisional South American 1956 | International 1924 | -278 | 171 | -367 | Ecuador | 3 | 5 | 3 | 11 |

| | | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-----|-----|-----|--|----|----|----|-----|
| North American 1927 | Clarke 1866 | 11 | 114 | 195 | Greenland (Hayes Peninsula) | 25 | 25 | 25 | 2 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -3 | 142 | 183 | MEAN FOR Antigua; Barbados; Barbuda; Caiicos Islands; Cuba; Dominican Republic; Grand Cayman; Jamaica; Turks Islands | 3 | 9 | 12 | 15 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | 0 | 125 | 194 | MEAN FOR Belize; Costa Rica; El Salvador; Guatemala; Honduras; Nicaragua | 8 | 3 | 5 | 19 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -10 | 158 | 187 | MEAN FOR Canada | 15 | 11 | 6 | 112 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -8 | 160 | 176 | MEAN FOR CONUS | 5 | 5 | 6 | 405 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -9 | 161 | 179 | MEAN FOR CONUS (East of Mississippi; River Including Louisiana; Missouri; Minnesota) | 5 | 5 | 8 | 129 |
| North American 1927 | Clarke 1866 | -8 | 159 | 175 | MEAN FOR CONUS (West of Mississippi; River Excluding | 5 | 3 | 3 | 276 |

POLARIZACIÓN DE ANTENAS.

La polarización de una antena es la polarización de la onda radiada por dicha antena en una dirección dada.

La polarización de una onda es la figura geométrica determinada por el extremo del vector que representa al campo eléctrico en función del tiempo, en una posición dada. Para ondas con variación sinusoidal dicha figura es en general una elipse. Hay una serie de casos particulares.

Si la figura trazada es una recta, la onda se denomina linealmente polarizada, si es un círculo circularmente polarizada.

El sentido de giro del campo eléctrico, para una onda que se aleja del observador, determina si la onda está polarizada circularmente a derechas o a izquierdas. Si el sentido de giro coincide con las agujas del reloj, la polarización es circular a derechas. Si el sentido de giro es contrario a las agujas del reloj, la polarización es circular a izquierdas. El mismo convenio aplica a las ondas con polarización elíptica.

Se define la relación axial de una onda polarizada elípticamente, como la relación entre los ejes mayor y menor de la elipse de polarización. La relación axial toma valores comprendidos entre 1 e infinito. Los campos se pueden representar en notación fasorial. Para determinar la variación temporal es suficiente con determinar el valor real de cada una de las componentes. Los ejemplos que se citan a continuación son para ondas planas que se propagan en la dirección del eje z.

Las expresiones siguientes representan campos con polarización lineal.

$$\vec{E} = \hat{x}e^{j(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E} = (\hat{x} + 0.5\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

Las expresiones siguientes representan campos con polarización circular, la primera a izquierdas y la segunda a derechas

$$\vec{E} = (\hat{x} + j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E} = (\hat{x} - j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

Finalmente los siguientes ejemplos corresponden a polarizaciones elípticas

$$\vec{E} = (2\hat{x} + j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

$$\vec{E} = ((1 + j)\hat{x} - j\hat{y})e^{j(\omega t - kz)}$$

Se produce una polarización lineal cuando las fases de dos componentes ortogonales del campo eléctrico difieren un múltiplo entero de π radianes. Se produce polarización circular cuando las amplitudes son iguales y la diferencia de fase entre las componentes es $\pi/2$ o $3\pi/2$. La polarización es elíptica en los demás casos.

Cualquier onda se puede descomponer en dos polarizaciones lineales ortogonales, sin más que proyectar el campo eléctrico sobre vectores unitarios orientados según dichas direcciones. Aplicando el mismo principio, cualquier onda se puede descomponer en dos ondas polarizadas circularmente a derechas o izquierdas. Por ejemplo la siguiente expresión representa una onda polarizada elípticamente a derechas, con relación axial 3.

ANEXO B

GLOSARIO

VOCABULARIO.

2D: Navegación en 2 dimensiones (latitud y longitud).

3D: Navegación en 3 dimensiones (latitud, longitud y altura).

Array: Un array es un conjunto de elementos. La antena que llevan los satélites son varias antenas helicoidales.

Banda S: Es un rango de frecuencias que se asigna para unos determinados sistemas.

BLK: Bloque de satélites.

bps: bits por segundo.

BPSK (Binary Phase Shift Keying): Es un esquema de modulación en fase.

Constelación : Es la flota de satélites que se encuentra en el espacio.

C/A: código de adquisición

C/No: Densidad señal a ruido

Demodulación: Es la técnica inversa de la modulación. A partir de la señal recibida por el receptor la demodulación obtiene la información contenida en la señal.

DOD: Departamento de defensa

DOP: Disolución de la precisión

Efemérides: Las efemérides dan las posiciones de los satélites.

FLL: Frecuencia de lazos cerrados

J/N: Relación de radiointerferencia a ruido

J/S: Relación e radiointerferencia a señal.

LNA (Low Noise Amplifier): Es un amplificador de bajo nivel de ruido para no degradar la calidad de la señal.

NAVSTAR-GPS (NAVigation System and Ranging - Global Position System): Es el sistema de posicionamiento global que estamos estudiando a lo largo de estas páginas.

Periodo: Es el tiempo que tarda el satélite en dar una vuelta completa a la tierra.

Polarización: Es una característica de la señal que se transmite.

PRN: Pseudo Ruido

Portadora: Es una señal cuyas características (frecuencia, fase...) varían según la información que se quiere transmitir (señal moduladora). Según cual de las características de la portadora cambie la modulación recibe un nombre u otro (frecuencia - FM, amplitud - AM).

Pseudodistancias: Cuando medimos la distancia entre un satélite y el receptor realmente lo que medimos es esa distancia más algo que se debe a la deriva existente entre el reloj del satélite y el del receptor S.

Secuencialmente: En esta técnica primero recibimos la señal procedente de un satélite y

luego la del resto (uno detrás de otro).

PNR(SNR): Es la relación señal a ruido. Es una medida de la calidad con la que llega la señal al receptor.

SV: Vehículo Espacial.

SNR: relación señal a ruido

TRANSIT: Es el primer sistema de navegación por satélite. Fue desarrollado por la marina de los EE.UU. y puede considerarse como el antecesor del NAVSTAR-GPS.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

UNDERSTANDING GPS PRINCIPLES AND APLICATIONS

ELLIOT D. KAPLAN

2002 ARTECH HOUSE INC

2o EDICION.

GYKIIUUEL-RABBANY, THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM, ARTECH HOUS

PUBLISHERS, EDICION No 1.,1999,

**BERNHARD HOFMAN-WELLENHOF, [GPS: THEORY AND PRACTICE](#), SPRINGER-
VERLAG, EDICION No 5,1998.**

**INSTITUTE OF NAVIGATION, GLOBAL POSITIONING SYSTEM MONOGRAPHS,
WASHINGTON, DC: THE INSTITUTE OF NAVIGATION,**

www.motorola.com

www.nokia.com

<http://www.nautigalia.com/gps/>

www.datumingenieria.com

www.aero.org/publications/GPSPRIMER/

www.tel.uva.es/~jpozdom/telecomunicaciones/portadagps.html

