



Instituto Politécnico Nacional

Centro de Innovación y Desarrollo
Tecnológico en Cómputo

REDUCCIÓN DEL MARGEN DE ERROR DE
POSICIÓN EN SISTEMAS BASADOS EN GPS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN TECNOLOGÍA DE CÓMPUTO

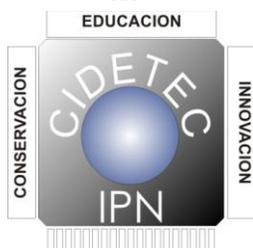
PRESENTA:

Ing. César Adrian Martínez Pérez

DIRECTORES DE TESIS:

M. en C. Eduardo Vega Alvarado
Dr. Marco Antonio Ramírez Salinas

MEXICO, D.F. 2011





INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 12:15 horas del día 8 del mes de diciembre del 2011 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del CIDETEC para examinar la tesis titulada:

"REDUCCIÓN DEL MARGEN DE ERROR DE POSICIÓN EN SISTEMAS BASADOS EN GPS"

Presentada por el alumno:

MARTÍNEZ
Apellido paterno

PÉREZ
Apellido materno

CÉSAR ADRIAN
Nombre(s)

Con registro:

B	0	9	1	3	6	6
---	---	---	---	---	---	---

aspirante de:

Maestría en Tecnología de Computo

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISIÓN REVISORA
Directores de tesis

M. EN C. EDUARDO VEGA ALVARADO
Primer Vocal

DR. MARCO ANTONIO RAMÍREZ SALINAS
Segundo Vocal

M. EN C. EDUARDO RODRÍGUEZ ESCOBAR
Presidente

M. EN C. JUAN CARLOS GONZÁLEZ ROBLES
Secretario

M. EN C. MARLON DAVID GONZÁLEZ RAMÍREZ
Tercer Vocal

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

DR. VÍCTOR MANUEL SILVA GARCÍA



SEP
INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
 CENTRO DE INNOVACION Y DESARROLLO
 TECNOLÓGICO EN COMPUTO



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL
SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

CARTA CESIÓN DE DERECHOS

En la Ciudad de México, D.F. el día 8 del mes Diciembre del año 2011, el (la) que suscribe César Adrian Martínez Pérez alumno (a) del Programa de Maestría en Tecnología de Cómputo con número de registro B091366, adscrito a CIDETEC, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de M. en C. Eduardo Vega Alvarado y Dr. Marco Antonio Ramírez Salinas y cede los derechos del trabajo intitulado “Reducción del margen de error de posición en sistemas basados en GPS”, al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección cesar-jr23@hotmail.com. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'César Adrian Martínez Pérez', written over a horizontal line.

César Adrian Martínez Pérez

Nombre y firma

AGRADECIMIENTOS

A MIS PADRES, EDUARDO JAVIER MARTINEZ NAVARRETE Y EDITH PEREZ SANCHEZ, por el impulso, apoyo, orientación y valores que me han brindado con su gran experiencia, por ese gran cariño que siempre me han proporcionado y por el cual les estaré eternamente agradecido. Porque gracias a sus consejos y reprimendas he alcanzado las metas que me he propuesto.

A MI HERMANO, EDUARDO DAVID MARTINEZ PEREZ, porque siempre he podido contar contigo, y has sido un amigo que me ha reprimendido cuando ha sido necesario.

A EVELIN ZOE ARROYO MELGAREJO, por estar siempre a mi lado impulsándome y apoyándome, por tu gran cariño y sabiduría sobre la vida, porque eres un gran ejemplo de lo que significa responsabilidad y dedicación.

A MI DIRECTOR, M. en C. EDUARDO VEGA ALVARADO, por su paciencia y comprensión, por el impulso que siempre me brindó para con mi trabajo de tesis y durante toda la Maestría.

A MI DIRECTOR, Dr. MARCO ANTONIO RAMIREZ SALINAS, por su gran apoyo y dedicación, por la ayuda y orientación que siempre me brindó durante todo este tiempo en el desarrollo de mi tesis.

AL CIDETEC, por darme la oportunidad de realizar mi maestría y crecer académicamente.

AL CIC, por las herramientas y apoyos proporcionados para el desarrollo de este proyecto.

A MI FAMILIA, por ser el ejemplo a seguir en el desarrollo de mi carrera profesional. Por la gran unión que tenemos y que representa para mí el principio de la educación, la base de este grupo.

INDICE

I.	ANTECEDENTES.....	12
II.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
III.	JUSTIFICACIÓN.....	14
IV.	OBJETIVOS.....	15
V.	ALCANCES DEL TRABAJO.....	15
1	OPERACIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL.....	17
1.1	INTRODUCCIÓN AL GPS.....	17
1.2	OTROS SISTEMAS	19
1.3	SEGMENTOS DEL SISTEMA GPS.....	20
1.3.1	Segmento Espacio	20
1.3.2	Segmento de Control.....	21
1.3.3	Segmento Usuario.....	23
1.4	PRINCIPIO DE POSICIÓN VIA SATÉLITE	24
1.4.1	Determinación de Posición en 3 Dimensiones Intersectando 3 Esferas....	24
1.5	CÁLCULO DE PSEUDODISTANCIAS UTILIZANDO CÓDIGOS PRN.....	26
1.5.1	Distancia Entre el Satélite y el Usuario.....	27
1.6	TIEMPO GPS.....	28
1.6.1	Tiempo Universal Coordinado (UTC).....	28
1.6.2	Sistema de Tiempo GPS	29
2	TIPOS DE ERRORES Y PRECISIÓN DE POSICIONAMIENTO	30
2.1	INTERFERENCIAS DE RADIOFRECUENCIA.....	30
2.2	ERROR POR MULTITRAYECTORIA Y EFECTOS SOMBRA.....	32
2.3	ERRORES IONOSFÉRICOS	35
2.4	ERROR EN RELOJES ATÓMICOS	35
2.5	ERRORES TROPOSFÉRICOS	36
2.6	ERROR DE EFEMÉRIDES	36

2.7	ERRORES RELATIVÍSTICOS.....	37
2.8	DILUCIÓN DE PRECISIÓN GEOMÉTRICA.....	38
3	SISTEMAS GPS DIFERENCIALES	40
3.1	TÉCNICAS DE CÓDIGO	41
3.1.1	Técnica de Código de Área Local.....	41
3.1.2	Técnica de Código de Área Regional	43
3.1.3	Técnica de Código de Área Amplia	44
3.2	TÉCNICA DE PORTADORA	44
3.2.1	Aplicaciones de Vuelo	46
3.3	SBAS	47
3.4	ESTADO DEL ARTE	47
4	ARQUITECTURA DEL SISTEMA.....	50
4.1	ESTACIÓN DE REFERENCIA	50
4.1.1	CPU Wireless WAVECOM	51
4.2	DISEÑO DE BASE DE DATOS EN POSTGRESQL	55
4.3	DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA GPS SERVIDOR	57
4.3.1	Diseño de Interfaz de Usuario	58
4.3.2	Lectura e Interpretación de Datos del Puerto Serie.....	60
4.3.3	Conexión con Base de Datos y Almacenamiento de Información	62
4.3.4	Conexión Remota.....	64
4.3.5	Cálculo del Error de Distancia con Coordenadas Geodésicas	65
4.3.6	Ubicación de Posición	66
4.4	GPS MÓVIL	67
4.5	DISEÑO DE PROGRAMA PARA GPS MOVIL	68
4.5.1	Diseño de Interfaz de Usuario	68
4.5.2	Lectura del Puerto Serie	69
4.5.3	Conexión Remota del GPS Móvil	70
4.6	PRUEBAS Y RESULTADOS.....	70
5	CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	72
5.1	CONCLUSIONES	72

5.2 TRABAJOS A FUTURO	74
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	78
APÉNDICE A. SISTEMA DE COORDENADAS REFERENCIADO.....	77
A.1. Sistema de coordenadas inercial centrado en la tierra.....	77
A.2. Sistema de coordenadas estático centrado en la tierra.....	77
A.3. Sistema geodésico mundial.....	78
APÉNDICE B. PROTOCOLO NMEA.....	79
B.1. GLL.....	79
B.2. GSV.....	79
B.3. ZDA.....	80
B.4. GGA.....	80
B.5. VTG.....	81
B.6. GSA.....	81
B.7. RMC.....	82
REFERENCIAS.....	83

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1	Constelación GPS	21
FIGURA 1-2	Distancia a la superficie de una esfera	25
FIGURA 1-3	Intersección entre 2 esferas	25
FIGURA 1-4	Posicionamiento por la intersección de 3 esferas.....	26
FIGURA 1-5	Ejemplo de código PRN.....	27
FIGURA 1-6	Réplica del código PRN por el receptor.....	28
FIGURA 2-1	Efecto sombra y multitrayectoria	33
FIGURA 2-2	Error de efemérides	36
FIGURA 2-3	Efecto Sagnac	38
FIGURA 2-4	Dilución de precisión a) Bajo DOP b)Alto DOP	39
FIGURA 3-1	Cálculo de pesos de acuerdo a la distancia del usuario con respecto a la estación	43
FIGURA 4-1	Kit de desarrollo WAVECOM.....	51
FIGURA 4-2	Tarjeta GPS.....	52
FIGURA 4-3	Tarjeta WAVECOM.....	53
FIGURA 4-4	Modelo Entidad Relación del GPS Servidor	56
FIGURA 4-5	Interfaz de Usuario	59
FIGURA 4-6	Configuración Puerto Serie.....	62
FIGURA 4-7	Distancia entre 2 puntos	65
FIGURA 4-8	Interfaz de usuario de ExtGPS	67
FIGURA 4-9	Interfaz de usuario para GPS Móvil.....	69

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1	Fuentes y tipos de interferencia	31
Tabla 2-2	Frecuencias asignadas cerca de la banda GPS	32
Tabla 3-1	Comparación de error entre el GPS y el DGPS de área local.....	43
Tabla 4-1	Configuración NMEA.....	53
Tabla 4-2	Configuración UART	54
Tabla 4-3	Configuración General	54
Tabla 4-4	Posiciones obtenidas	71
Tabla 4-5	Error de distancia	71

RESUMEN

El presente trabajo aborda los diferentes errores de posición asociados con los sistemas GPS, proponiendo un modelo de corrección de error donde los efectos multitrayectoria más importantes puedan ser mitigados; para dicho propósito se utiliza la información del mensaje de navegación de los satélites y el concepto de GPS Diferenciales (DGPS). En principio, se presenta el marco teórico referente al funcionamiento de los sistemas GPS; se estudian los diferentes segmentos en que se divide el sistema, así como el fundamento sobre el cual se basa el método de posicionamiento GPS. Posteriormente, se realiza un análisis sobre los diferentes errores GPS y la forma en que estos afectan al sistema.

Para la parte práctica se instaló un GPS en un punto conocido, para simular una estación de corrección diferencial. El GPS calcula su posición y la resta de la original para obtener el error presentado en la zona. Para esto se desarrolló una aplicación que pudiera leer e interpretar las sentencias NMEA entregadas por el GPS. También se implementó una base de datos para el registro de toda la información.

Para las pruebas en campo fue necesario otro GPS, que pudiera comunicarse con la estación de referencia para obtener una corrección diferencial. Se utilizó el GPS interno de un celular que envía sentencias NMEA a una laptop mediante conexión USB. Un programa similar a la estación de referencia fue implementado para la comunicación entre estos. Finalmente la información referente a la dirección y los niveles señal a ruido (SNR, *Random Signal Noise*) de los satélites GPS es analizada para determinar las señales con efectos multitrayectoria.

ABSTRACT

This paper is referred to the different positional errors associated with GPS systems, and it suggests an error correction model where the most significant multipath effects can be mitigated; the navigation message information from satellites and the concept of Differential GPS (DGPS) is used for this purpose. At first, the theoretical framework concerning to the operation of GPS systems is presented; then, the different segments of the system as well as the foundation upon which is based on GPS positioning method are studied. Subsequently, an analysis of the different GPS errors and how they affect the entire system is included.

For the practical stage, a GPS was installed at a known point, in order to simulate a differential correction station. This GPS calculates its position and subtracts it from the original one, for calculating the error introduced in the area. For this point, an application that could read and interpret NMEA sentences delivered by the GPS was developed. A database for recording all information also was implemented.

For field testing, another GPS that could communicate with the reference station for differential correction was needed. A GPS on a cell phone, which sends NMEA sentences to a laptop via a USB connection, was implemented; a program similar to the reference station was implemented for communication between them. Finally, the information concerning to the direction and signal-to-noise levels (SNR) of the GPS satellites is analyzed, in order to determine which signals have multipath effects.

ANTECEDENTES

En 1936 se desarrolló el primer sistema de navegación basado en la llegada diferenciada de señales de radio, en el laboratorio de Radiación del MIT llamado LORAN. Este sistema de posicionamiento era capaz de funcionar bajo cualquier condición climatológica, aunque solamente era bidimensional (latitud y longitud). A principios de los años 60 varias organizaciones del gobierno de los EE.UU. estaban interesadas en crear un sistema de satélites para determinar una posición tridimensional; el sistema debería tener cobertura global y operar de forma continua. En 1964 surgió TRANSIT, un sistema operacional basado en satélites, utilizado en diversas plataformas de bajo dinamismo; sin embargo, debido a sus grandes limitaciones, la Armada de los Estados Unidos trató de corregirlo desarrollando un sistema que superara esos problemas [1].

Al mismo tiempo que se mejora TRANSIT, surge otro programa llamado Timation (desarrollado por el NRL, *Naval Research Laboratory*), y comienza el uso de la modulación PRN (*PseudoRandom Noise*) para el cálculo de distancias. Por otro lado, se conceptualiza un sistema llamado 621B, provisto de órbitas elípticas en ángulos de 0°, 30° y 60°, y cuyo objetivo era proporcionar ubicaciones de tres dimensiones y servicio en todo el mundo de manera continua [2]. Para 1969 el Departamento de Defensa de los EU establece el DNSS (*Defense Navegation Satellite System*) para coordinar los esfuerzos de diversos grupos de navegación satelital y crear un sólo sistema de navegación, lo que dió como resultado el sistema NAVSTAR GPS (*NAVigation System Time And Ranging – Global Position System*).

En los siguientes 20 años se lanzaron un total de 11 satélites prototipo del programa NAVSTAR-GPS, a los que siguieron otras generaciones de satélites hasta completar la constelación actual, misma que se declaró con capacidad operacional inicial en diciembre de 1993 y con capacidad operacional total en abril de 1995. Así se creó el actual Sistema de Posicionamiento Global (*Global Position System*, GPS) diseñado para la obtención de ubicaciones por medio de satélites. Este sistema fue desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, originalmente con fines militares, sin embargo actualmente está disponible y se utiliza ampliamente en el ámbito civil.

El sistema GPS cuenta con una constelación de 24 satélites distribuidos en seis planos orbitales, teniendo así 4 por plano. También se tienen sistemas de control de tierra que monitorean la trayectoria de los satélites; cada uno de estos tarda 11 horas 58 minutos en recorrer su órbita y transmite un código diferente para poder ser

identificado, utilizando dos bandas de frecuencias llamadas L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.6 MHz).

En 1972 se realizaron pruebas al sistema GPS, y se encontró que en el peor de los casos la precisión podía tener una fiabilidad de 15 metros y en el mejor de los casos de 3 metros. Esto provocó preocupación en el gobierno de los Estados Unidos, ya que algún enemigo podría utilizar el sistema contra sus propias instalaciones, así que se desarrollaron dos tipos de servicios, el SPS (*Standard Positioning Service*) para uso civil y el PPS (*Precise Positioning Service*) para uso militar, además de la llamada disponibilidad selectiva la cual limitaba la precisión del uso civil, misma que fue retirada en el 2000.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A pesar de la eliminación de la disponibilidad selectiva, los relojes atómicos de alta precisión y los sistemas de control en tierra para la corrección de trayectorias de los satélites, el GPS tiene diferentes problemas que afectan su exactitud, ya que presenta errores de tipo troposféricos, ionosféricos, de reloj, de efemérides, por ruido en el receptor, multitrayectoria, etc.

Para algunas aplicaciones es indispensable contar con niveles de precisión y exactitud altos, por esto se han desarrollado diferentes modelos que tratan de corregir o minimizar el efecto de estos errores. Entre los más importantes y que han arrojado mejores resultados se encuentran los DGPS y la tecnología WAAS. Los DGPS están basados principalmente en un modelo que utiliza una estación de referencia con su ubicación conocida y al menos un receptor GPS. Las estaciones de referencia transmiten a cada receptor GPS una serie de datos que pueden incluir:

- Corrección de pseudodistancias de los satélites al usuario
- Corrección de los relojes de los satélites
- Corrección de efemérides
- Datos de la estación de referencia como la ubicación y los datos meteorológicos
- Datos auxiliares como el tiempo de vida de los satélites

Estos datos varían de acuerdo a la técnica DGPS utilizada, ya que no todas pueden corregir los errores atmosféricos; el mayor inconveniente en general es que ninguna de ellas puede corregir los errores multitrayectoria, problema principalmente presentado en las zonas urbanas.

Por otro lado, WAAS está basada también en los DGPS, solo que está diseñado para abarcar grandes áreas, además de contar con varias estaciones terrenas; dos de estas actúan como master, se encargan de recoger toda la información de las demás y enviarla a dos satélites geoestacionarios, estos a su vez la distribuyen a todos los receptores GPS.

WAAS es la técnica que mejor resultados a ofrecido, sin embargo sigue teniendo el mismo problema que los DGPS comunes, no puede corregir los errores multitrayectoria que como se mencionó anteriormente, pueden llegar a ser considerablemente altos en zonas urbanas, además se requiere una gran inversión económica debido a los satélites geoestacionarios. En algunos países del primer mundo ya se trabaja con versiones similares a WAAS, pero en los países subdesarrollados es todavía muy difícil pensar en este tipo de tecnologías. Por estas razones se continúan las investigaciones acerca de diferentes métodos que puedan corregir los errores del GPS, o modelos que puedan mejorar los métodos ya existentes.

El presente trabajo propone un modelo para mejorar o complementar los sistemas DGPS, utilizando diferentes métodos y técnicas para el mejoramiento en la precisión y exactitud de los GPS.

JUSTIFICACIÓN

Las investigaciones entorno a la reducción del margen de error en los sistemas GPS inciden de manera importante en una infinidad de aplicaciones, donde la precisión es fundamental, ya que el GPS aún no alcanza los niveles de exactitud requeridos. Algunas de estas aplicaciones son los modelos geológicos y topográficos, en los que se estudian los movimientos de las placas tectónicas para la posible predicción de temblores y terremotos, sistemas de monitoreo de mercancías costosas, contaminantes de alto riesgo, navegación y control de flotas de vehículos para la planificación de trayectorias y control de flotas, policía, servicios de socorro (bomberos, ambulancias), empresas de reparto, etc.

Desde el punto de vista económico es esencial investigar nuevos modelos con diferentes métodos, que permitan ayudar en la corrección de los errores que presenta el GPS, ya que los sistemas que mejores resultados ofrecen como WAAS requieren una gran inversión económica, instalaciones complejas y receptores de mayor costo, además de no poder corregir algunos errores como los efectos multitrayectoria. El surgimiento de nuevos modelos que puedan proponer nuevos métodos para los diferentes errores

del GPS puede ayudar a complementar los ya existentes o mejor aún, para reemplazarlos, ya sea por presentar mejores resultados o por ser de menor costo. Los receptores GPS con soporte diferencial son muy grandes y de difícil manejo; por ejemplo, para personas que practican el montañismo, el descubrimiento de un nuevo modelo que pueda ofrecer mejores resultados o los mismos pero utilizando receptores más prácticos beneficiaría a este sector y a muchos otros.

OBJETIVOS

Objetivo general: Proponer una metodología para reducir el margen de error en la posición de sistemas móviles basados en tecnología GPS.

Objetivos específicos:

- Investigar las diversas causas de error y sus rangos en los sistemas de posicionamiento global, GPS.
- Realizar un estudio del estado del arte en el tema de corrección de error en sistemas basados en GPS.
- Desarrollar un modelo que reduzca el margen de error de posición utilizando combinaciones de las técnicas desarrolladas.

ALCANCES DEL TRABAJO

En esta investigación se pretende identificar a los errores que tienen mayor impacto en el GPS, así como las diversas soluciones que se han dado a estos problemas, los resultados que ofrecen y cuáles son los inconvenientes de utilizarlas. Se propone un nuevo modelo para la corrección de algunos de estos errores, presentando una alternativa o complemento a las soluciones ya existentes.

Para el desarrollo de este modelo, se implementará una interfaz que proporcione los datos de ubicación, el error geométrico y el error en metros obtenido en las mediciones. Esta interfaz también tendrá la capacidad de mostrar la ubicación obtenida y la posición real en un sistema de mapas; de igual manera tendrá soporte para recibir y mandar información de otros receptores GPS por medio de una dirección IP.

En esta investigación se pretende utilizar como mínimo dos receptores, el primero de los cuales se encontrará fijo, actuando como estación terrena y haciendo las funciones de un GPS diferencial, utilizando la interfaz antes mencionada. El segundo receptor actuará como un GPS móvil, el cual se encargará de mandar su ubicación al GPS estacionario para que este a su vez responda con la ubicación corregida. Los datos enviados y recibidos serán almacenados y analizados para determinar la eficiencia del sistema.

Este nuevo modelo propondrá alternativas de comunicación entre receptores, así como un nuevo método que permita atacar otro tipo de errores que no tratan los GPS diferenciales en general.

Capítulo 1

OPERACIÓN DEL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

1.1 INTRODUCCIÓN AL GPS

Con la necesidad del ser humano de trasladarse a diferentes lugares han surgido diversos medios de transporte, apareciendo así una serie de variables a tomar en cuenta, tales como el tiempo de viaje, la distancia recorrida, la velocidad del medio, etc.; sin embargo, se encontró un reto de mayor complejidad durante este proceso, cuando no se sabía con certeza la posición del lugar al cual se quería llegar o peor aun cuando no se conocía la propia ubicación. Entonces surgió la necesidad de implementar un sistema que determinara ubicaciones, ya fueran las propias o las de un destino en particular, lo que propició la aparición del Sistema de Posicionamiento Global (GPS).

El sistema GPS es un Sistema de Posicionamiento Global de Navegación por Satélite (GNSS), diseñado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos para determinar ubicaciones, al principio con fines militares pero que posteriormente se liberaría para el uso civil. Actualmente el sistema se utiliza en topografía, seguridad pública, medio ambiente, cartografía, redes de transporte, navegación, entre muchas otras; algunas de esas aplicaciones demandan mucha exactitud y precisión, siendo este el problema principal por el cual el GPS no ha sustituido a todos los sistemas de posicionamiento. Por ejemplo, en áreas pequeñas es más conveniente utilizar un teodolito debido a que el GPS solo puede alcanzar exactitudes de entre 5 y 15 metros en promedio, a causa de los diferentes errores inherentes que presenta el sistema.

Se han implementado diferentes soluciones para corregir los errores del sistema; sin embargo, las de mejores resultados presentan una gran complejidad tecnológica y alto costo. Los principales avances son el DGPS (*Differential GPS*) y WAAS (*Wide Area Application System*), aunque ninguno de ellos ha sido implementado en México debido a la gran infraestructura que conllevan; los DGPS están implementados en Estados Unidos y Europa, mientras que WAAS solo está disponible en los Estados Unidos.

El GPS consiste básicamente en una constelación de 24 satélites girando ininterrumpidamente alrededor de la tierra, distribuidos en 6 planos orbitales, teniendo así 4 por órbita. Cada plano está centrado en la Tierra, siendo casi esféricos y equidistantes alrededor del ecuador. El radio de cada órbita (distancia nominal del centro de masa de la tierra al satélite) es de 26,600km. Se cuenta con estaciones de control que monitorean los satélites constantemente, para obtener información tal como el tiempo de vida del satélite, sus archivos de navegación, posición orbital de los satélites (efemérides) y otros datos. Se utiliza el principio de TOA (*Time of Arrive*) el cual consiste en determinar una distancia mediante el tiempo que tarda en llegar una señal de un dispositivo a otro. Debido a los diferentes errores que presenta el GPS, el cálculo de las distancias no es exacto y por esto son comúnmente llamadas *Pseudodistancias*.

Cada satélite emite constantemente señales con diferente codificación, difundiendo códigos de distancia y datos de navegación. La señales se transmiten en 2 frecuencias, L1 (1,575.2 MHz) y L2 (1,227.6 MHz) utilizando la técnica Acceso Múltiple por División de Código (CDMA), y la única diferencia en la información entre ellas es el código con el que se modulan; para el uso civil se desarrolló el *Coarse/Acquisition* o *C/A*, que es un código corto y para uso militar el *Precisión* o *P*, que es un código largo. Los datos de navegación se difunden para determinar la ubicación del satélite y el momento en el que se emitió la señal, mientras que el código de distancia permite determinar el tiempo que viaja la señal, determinando así la distancia entre el satélite y el usuario. Para poder obtener una ubicación serían necesarios tres satélites (latitud, longitud y altitud), pero se requiere un cuarto para la sincronización de relojes. Los receptores tienen relojes de cuarzo, mientras que los satélites cuentan con relojes atómicos mucho más precisos; por esta razón es necesario sincronizarlos utilizando un satélite adicional. El lapso de tiempo que tarda en llegar una señal de un transmisor a un receptor, se multiplica por la velocidad de propagación, dando así como resultado la distancia a la que se encuentran. Al obtener la distancia de múltiples emisores cuya ubicación es conocida, se puede fijar la posición del receptor.

El GPS proporciona 2 tipos de servicios, el primero llamado PPS, que utiliza el código P y es muy preciso, pero solo es de uso militar. El segundo, SPS, utiliza el código C/A que es un código menos preciso que P, pero es el único disponible para uso civil. El presente

trabajo está dedicado a la investigación y corrección de los diferentes tipos de errores que se presentan en el GPS, con la idea de desarrollar un nuevo modelo de corrección de error, basado en el modelo de los DGPS y agregando un algoritmo que permita optimizar la corrección de error, obteniendo de esta manera una ubicación más exacta.

1.2 OTROS SISTEMAS

Con la llegada del GPS a EU, surgió la necesidad en otras partes del mundo de crear sistemas propios de navegación satelital. La Unión Europea desarrollo GALILEO, un sistema diseñado para el uso civil, que cuenta con una constelación de 30 satélites y un sistema de control de tierra, siendo uno de sus objetivos principales la interoperabilidad con el GPS [3]. Galileo provee los siguientes servicios:

1. Servicio libre de cargos para los usuarios.
2. Servicio comercial que combine datos de valor agregado con un servicio de posicionamiento de alta precisión.
3. *Safety-of-life* (SOL), un servicio de seguridad para usuarios críticos.
4. Servicio público regulado estrictamente por usuarios autorizados del gobierno, que requieren un alto nivel de protección.
5. Apoyo para búsquedas y rescate.

Rusia desarrolló su propio sistema de navegación global, llamado GLONASS. El sistema tiene una constelación de satélites de órbita media, equipado con su segmento de control terrestre y usuario, y se prevé una generación de satélites llamados GLONASS-K, que transmitan el mismo tipo de señales que el GPS más una tercera de uso civil para las aplicaciones SOL, diseñados para transmitir con integridad de datos y correcciones diferenciales de área amplia, con interoperabilidad entre GLONASS/GPS/GALILEO [4].

China cuenta con el sistema de navegación Beidou, diseñado para proveer posicionamiento, administración de flotas y diseminación en precisión de tiempo para uso militar y civil. Actualmente, Beidou se encuentra en fase semioperativa con tres satélites geostacionarios sobre China, y ha sido designado como Sistema de Prueba de Navegación Beidou (BNTS). A diferencia de GLONASS, GALILEO y el GPS, que emplean mediciones de una distancia TOA, el BNTS requiere mediciones de 2 distancias. Esto es, debido a que un centro de operaciones manda una señal a través de uno de sus satélites a un subconjunto de usuarios, estos usuarios responden a la señal por medio de al

menos 2 de los 3 satélites, y el centro de operaciones es el encargado de realizar el cálculo de las posiciones del usuario. El BNTS tiene por objetivos proporcionar integridad y realizar correcciones diferenciales de área amplia utilizando satélites SBAS (*Satellite Based Augmentation System*). Actualmente el BNTS se encuentra en funcionamiento, pero la corrección diferencial con SBAS se encuentra en desarrollo y el área de cobertura solo es China. A largo plazo se tiene planeado ampliar el área de cobertura a nivel regional o mundial [5].

1.3 SEGMENTOS DEL SISTEMA GPS

El sistema GPS tiene tres componentes: el segmento espacio, el segmento control y el segmento de usuario. La constelación de satélites que difunden los mensajes de navegación a los equipos receptores de los usuarios conforma el segmento espacio. El segmento de control se encarga del seguimiento y mantenimiento de los satélites en el espacio, y está conformado por estaciones terrenas que monitorean constantemente el tiempo de vida y la integridad de las señales de los satélites; además, el segmento de control se encarga de realizar las correcciones de los relojes atómicos de los satélites, así como las efemérides que ayudan al usuario a determinar su posición, velocidad y tiempo (PVT). El segmento usuario lo conforman los equipos receptores de los usuarios.

1.3.1 Segmento Espacio

La constelación del sistema GPS consta de 24 satélites en 6 planos orbitales con centro en la tierra. El periodo orbital de un satélite es la mitad de un día sideral, 11 horas y 58 minutos [6]. Las órbitas son semicirculares y equidistantes alrededor del ecuador, con una inclinación de 55° sobre este. La distancia de cada satélite con respecto al centro de masa terrestre es de aproximadamente 26,600 km. Esta configuración proporciona al usuario un servicio ininterrumpido las 24 horas del día con visibilidad de al menos 4 satélites. La Figura 1.1 muestra de la configuración descrita.

Existen diferentes formas para poder identificar los satélites, una es de acuerdo al plano orbital en el que están ubicados, donde los planos orbitales se identifican como A, B, C, D, E y F, y los cuatro satélites por plano tienen un número, por ejemplo: A1, A2, A3, A4, B1, etc. Otra forma es por medio del código *C/A* o *P* que se difunde (para los usuarios que tienen acceso), todos los códigos son diferentes y principalmente de esta manera los receptores pueden identificar el satélite del cual reciben el mensaje de

navegación y calculan su posición. Actualmente se encuentran satélites con un código de identificación mayor a 24, ya que con el paso del tiempo algunos han dejado de operar y el reemplazo de estos implica un número de código diferente.

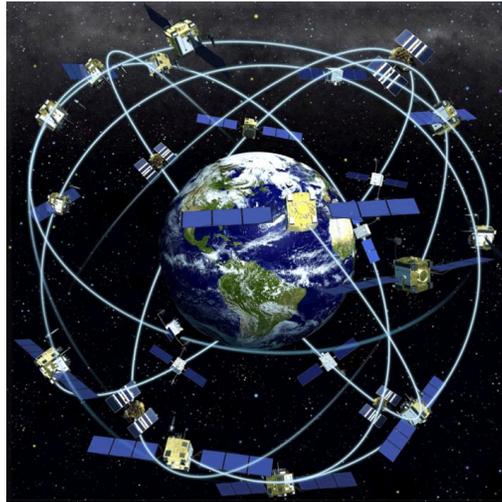


FIGURA 1-1 Constelación GPS

1.3.2 Segmento de Control

El segmento de control se encarga de la supervisión y control de la constelación de satélites GPS. Controla las señales de navegación de la banda L (1 a 2 GHz, banda por la que se transmiten las señales GPS), actualiza los mensajes de navegación, monitorea el tiempo de vida de los satélites y gestiona el tipo de maniobras necesarias para mantener su trayectoria de acuerdo a las especificaciones de las efemérides. Los principales elementos de este segmento son la estación de control maestro, las estaciones de monitoreo sobre la banda L (10) y las antenas en tierra (al menos 4).

1.3.2.1 Estación de Control Maestro

Acciones que se llevan a cabo por la estación de control maestro:

- Monitoreo de las órbitas de los satélites
- Monitoreo y mantenimiento del estado de salud del satélite
- Estimación y predicción del reloj del satélite y parámetros de las efemérides

- Sincronización del tiempo GPS con el UTC(USNO)
- Monitoreo de la integridad del servicio de navegación
- Control de maniobras del satélite para mantenerlo en la órbita GPS y reposicionamiento debido a fallas del vehículo satelital
- Programación y asignación de recursos
- Generación del mensaje de navegación
- Generación y carga de procesos
- Estado del sistema GPS/evaluación de desempeño y elaboración de informes.

El sistema de control maestro consiste en el procesamiento de datos, control, visualización y los equipos de comunicación que soportan estas funciones. Su tarea principal es generar y distribuir el mensaje de navegación, además de incluir, recoger y procesar las mediciones de las estaciones de monitoreo, generar las efemérides de los satélites y las estimaciones y predicciones de sus relojes atómicos. Las estaciones de monitoreo proporcionan una primera pseudodistancia, portadora de fase y mediciones meteorológicas que son refinadas por la estación de control maestro. Utilizando estas mediciones, un filtro Kalman genera las efemérides precisas de los satélites y las estimaciones de reloj [7]. La precisión del sistema de navegación se deriva de una escala de tiempo de referencia, conocido como tiempo GPS, el cual provee una referencia estable para el reloj satelital.

A través de toda la transmisión de datos entre la estación de control maestro al satélite y viceversa, la estación se asegura de que todos los parámetros de los datos del mensaje de navegación se carguen y transmitan correctamente. El segmento de control depende de varios datos externos para la coordinación del tiempo GPS con la UTC (USNO); la Agencia Nacional Geoespacial (*NGA, National Geospatial Agency*) y la USNO son los encargados de proveer estos datos.

1.3.2.2 Estaciones de Monitoreo

Acciones que se llevan a cabo por las estaciones de monitoreo

- Seguimiento de las señales de navegación
- Mediciones de la portadora
- Recolección de datos atmosféricos
- Recolección de los datos de navegación difundidos al usuario

Las estaciones de monitoreo operan bajo el control de la estación de control maestro y están equipadas con los equipos y programas necesarios para recolectar la

información que difunden los satélites. Estos datos son reenviados a la estación de control maestro para su procesamiento. Una estación de monitoreo consiste en un receptor de doble frecuencia, 2 relojes atómicos de cesio, sensores meteorológicos, una estación de trabajos locales y equipos de comunicación. La estación de monitoreo realiza mediciones continuas de fase con respecto a sus relojes y todos los resultados son proporcionados a la estación de control maestro. Los sensores meteorológicos proveen las mediciones de la presión en tierra, temperatura y punto de rocío para el filtro Kalman, para el modelo de retardo en la troposfera [8]. Las estaciones de trabajo proporcionan los comandos y la recopilación de datos entre las estaciones de monitoreo y la estación de control maestro.

Los receptores de las Estaciones de Monitoreo necesitan comandos externos para la adquisición de datos, para indicarles que recolecten y rastreen señales anormales de aquellos satélites que no estén funcionando correctamente. Los receptores del segmento de control proporcionan a la estación de control maestra mediciones internas sobre la relación señal a ruido (*SNR, Signal Noise Relation*), esta información es utilizada para descartar medidas cuestionables en el Segmento de Control.

1.3.2.3 Antenas en Tierra

Las antenas terrestres proporcionan la interfaz entre el segmento de control y el segmento espacial para cargar los datos de navegación. Las antenas son bidireccionales y permiten la comunicación en la banda S, dedicada a los comandos y sesiones de control con un solo satélite a la vez. Cada antena tiene el equipo y programas necesarios para transmitir comandos, cargar los datos de navegación y cargar los datos de control recibidos de la estación de control maestra, además de recibir datos de telemetría de los satélites. La banda S provee al segmento de control la capacidad de detectar de forma más rápida anomalías en las órbitas de los satélites [9].

1.3.3 Segmento Usuario

El equipo receptor del usuario procesa las señales de la banda L transmitidas por los satélites para obtener su Posición, Velocidad y Tiempo (PVT). Hoy en día es posible encontrar receptores GPS en celulares, PDA y automóviles; un receptor GPS consta principalmente de cinco componentes: antena, receptor, procesador, entrada/salida y fuente de alimentación. La Figura 1.2 muestra el diagrama a bloques de un equipo receptor de usuario.

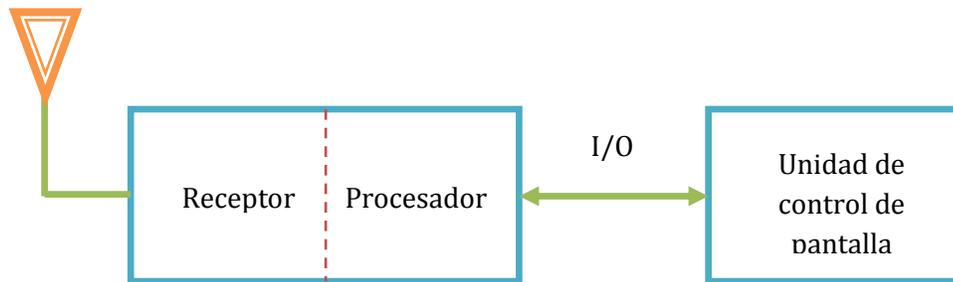


FIGURA 1-2 Diagrama a bloques de un receptor GPS

1.4 PRINCIPIO DE POSICIÓN VÍA SATÉLITE

Para poder determinar una posición, el GPS utiliza el concepto TOA (*Time Of Arrive*) de alineación de señales. Como se mencionó anteriormente, el TOA consiste en determinar una distancia basándose en el tiempo que tarda una señal en propagarse de un dispositivo a otro. El intervalo de tiempo que tarda en llegar al receptor se multiplica por la velocidad de la señal, dando como resultado la distancia entre emisor y receptor.

1.4.1 Determinación de Posición en 3 Dimensiones Intersectando 3 Esferas

Todos los satélites cuentan con un reloj atómico que sirve de referencia al mandar una señal, estos relojes son sincronizados con una escala de tiempo controlada por las estaciones terrenas, denominada tiempo GPS. Los receptores también cuentan con un reloj que debe estar sincronizado con el tiempo GPS; los satélites insertan este tiempo al momento de emitir la señal, permitiendo a los receptores conocer el momento en el que fue enviada.

Supóngase que se realiza el cálculo de la distancia utilizando un satélite, el receptor debe encontrarse en algún lugar sobre la superficie de una esfera siendo el satélite el centro, como se muestra en la Figura 1.3. Si la medición se efectuó simultáneamente con otro satélite, se trazaría una segunda esfera, la cual tiene como centro el segundo satélite, el receptor también se encontraría en algún lugar sobre la superficie de ésta, misma que se intersecta con la primer esfera. El resultado sería un perímetro de la intersección de las dos esferas, como se muestra en la Figura 1.4. Si el receptor estuviera perfectamente alineado con los satélites, las 2 esferas solo se intersectarían en un solo punto, pero esto difícilmente llega a ser un caso real.

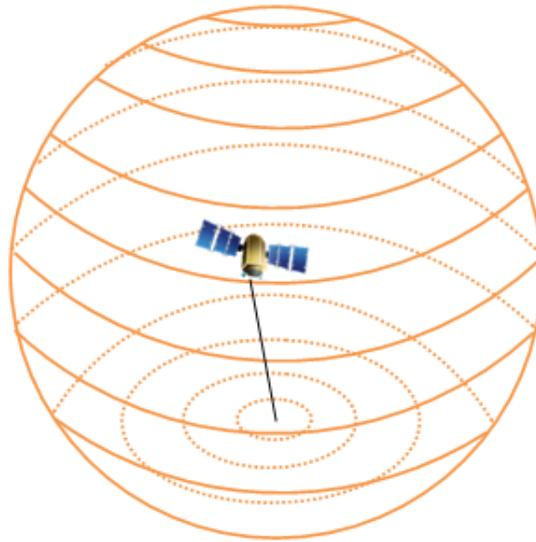


FIGURA 1-3 Distancia a la superficie de una esfera

Quando se realiza este mismo proceso utilizando 3 satélites, la tercera esfera interseca el perímetro creado con las últimas 2, esta intersección da como resultado el trazo de 2 puntos de los cuales uno se descarta por la lejanía respecto a la superficie terrestre; la Figura 1.5 muestra la intersección de las 3 esferas.

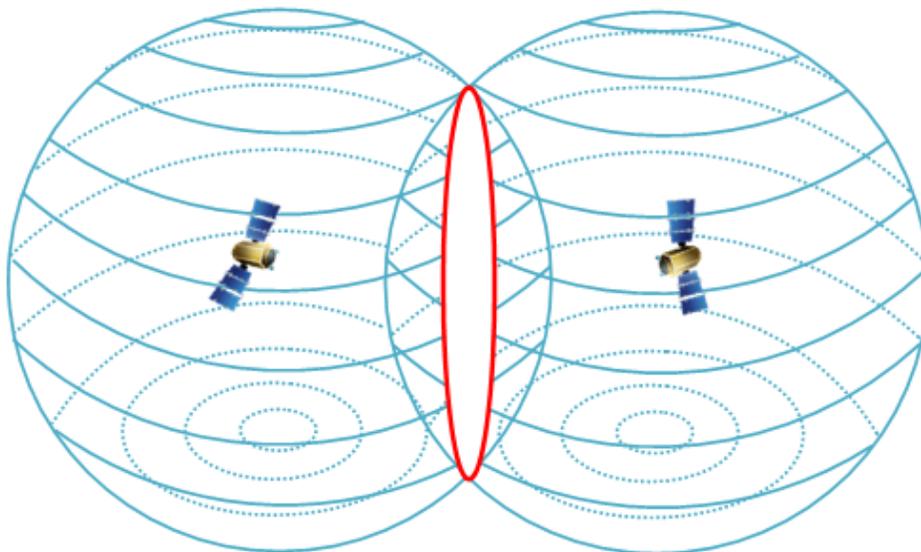


FIGURA 1-4 Intersección entre 2 esferas

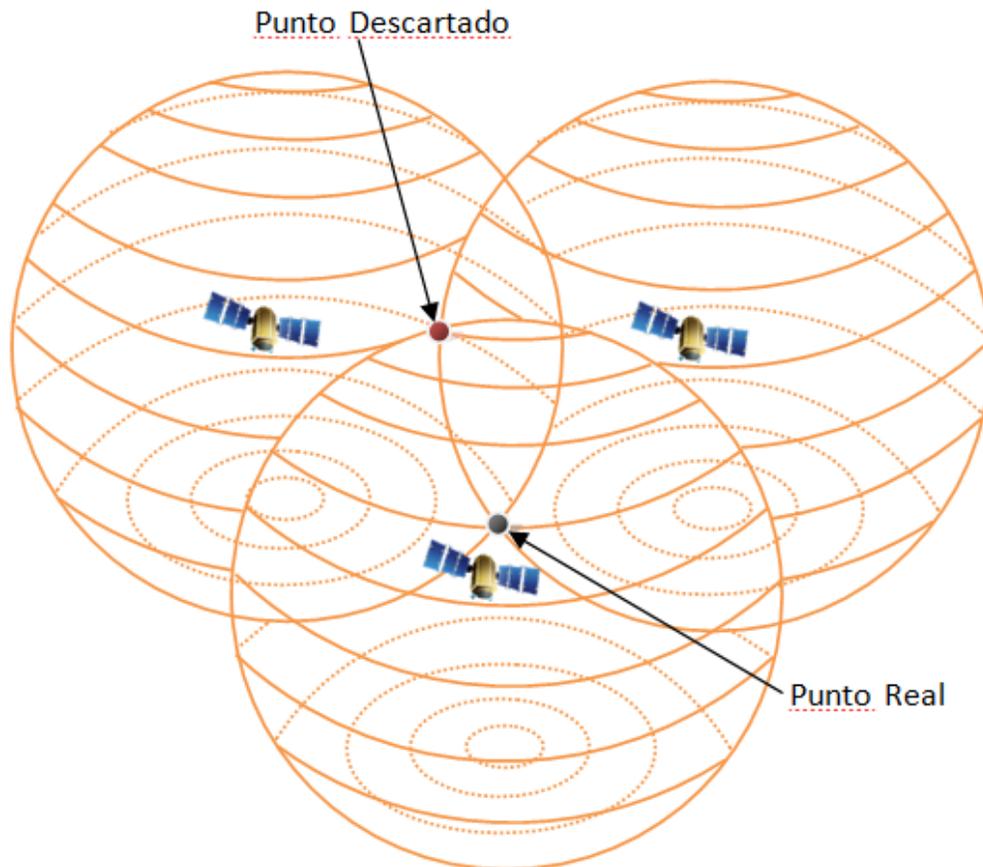


FIGURA 1-5 Posicionamiento por la intersección de 3 esferas

1.5 CÁLCULO DE PSEUDODISTANCIAS USANDO CÓDIGOS PRN

Los satélites GPS transmiten utilizando una modulación de secuencia directa de espectro ensanchado (*DSSS, Direct Sequence Spread Spectrum*). *DSSS* proporciona una estructura que puede difundir al mismo tiempo, las señales dedicadas a la obtención de distancia y los datos de navegación, como son las efemérides satelitales y el estado operativo de los mismos. Las señales que se utilizan para determinar la distancia entre el satélite y el receptor son códigos PRN con modulación binaria de desplazamiento de fase (*BPSK, Binary Phase-Shift Keying*). La Figura 1.6 muestra un ejemplo de código PRN.

Estos códigos aparentemente son aleatorios; sin embargo, después de un lapso de tiempo se repiten, por lo tanto son periódicos y pueden ser replicados con un receptor correctamente equipado. Los satélites emiten 2 tipos de código: el código corto C/A y el

código largo P. El código C/A tiene un periodo de 1 milisegundo mientras que el P es de 7 días, ambos códigos son repetidos constantemente. Por su periodo el código P es más preciso, aunque solo es de uso militar, ya que se encuentra encriptado y solo el personal autorizado puede hacer uso de este a través de criptografía.

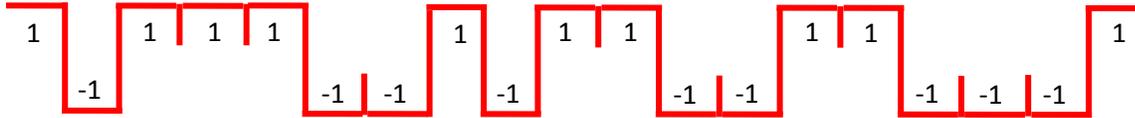


FIGURA 1-6 Ejemplo de código PRN

1.5.1 Distancia Entre el Satélite y el Usuario

Para calcular la distancia entre el satélite y el usuario se requiere medir el tiempo de propagación de la señal, hasta llegar al receptor GPS. Esto se logra utilizando los códigos PRN; por ejemplo, un satélite emite en el instante T1 una fase específica de su código, lo cual llegará en el instante T2 al receptor. Al mismo tiempo el receptor replica el código internamente con respecto a su reloj en T, ésta replica se desplaza en el tiempo hasta correlacionarse con la señal recibida del satélite; esta diferencia de tiempo es llamada Δt . Si el reloj del satélite y el reloj del receptor se sincronizaran perfectamente, se podría calcular la distancia perfectamente; sin embargo, debido a los agentes externos que retrasan la señal y a otros efectos ésta no siempre es la distancia exacta, por eso son llamadas pseudodistancias. Al multiplicar Δt por la velocidad de la luz, se puede calcular la pseudodistancia. La Figura 1.7 ilustra este ejemplo.

El reloj en el receptor normalmente presenta un sesgo con respecto a la hora del sistema. El ejemplo anterior sería el caso ideal, aunque los relojes no se encuentran perfectamente sincronizados, principalmente por la gran exactitud de los relojes atómicos de rubidio o cesio con los que cuentan los satélites en comparación con los de cuarzo de los receptores. Además de estos errores de sincronización normalmente hay una compensación por parte de ambos relojes (reloj del satélite y del receptor) para sincronizarse con el tiempo GPS, aunque las compensaciones en los satélites corresponden al control en tierra, quien lo transmite hacia los usuarios a través del mensaje de navegación, mientras que el receptor se encarga de hacer su propia compensación.

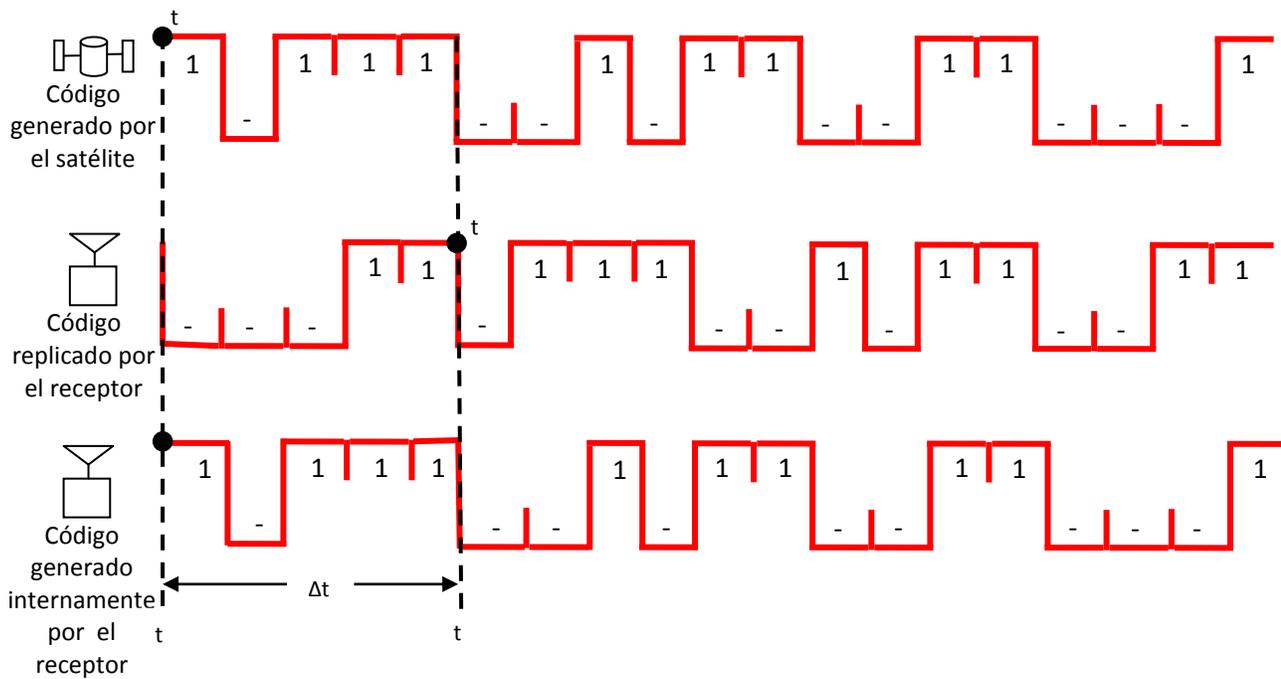


FIGURA 1-7 Replica del código PRN por el receptor

1.6 TIEMPO GPS

A través de su mensaje de navegación, el GPS incluye el tiempo universal coordinado (*UTC, Universal Time Coordinate*), con la finalidad de tener capacidad de sincronización en tiempo con usuarios de todo el mundo.

1.6.1 Tiempo Universal Coordinado (UTC)

El tiempo universal coordinado es una escala de tiempo compuesto obtenido de la información de relojes atómicos y la tasa de rotación de la tierra. La escala de tiempo basada en estándares atómicos se llama Tiempo Atómico Internacional (IAT), y es generada sobre el segundo atómico, que es la unidad de tiempo en el Sistema Internacional de Unidades, y equivale a la duración de 9,192,631,770 periodos de radiación correspondientes a la transición entre dos niveles hiperfinos del estado fundamental del átomo de cesio 133 [10]. La Oficina Internacional de Pesos y Medidas (*BIPM, Bureau International des Poids et Mesures*) es el organismo internacional encargado del cálculo de IAT.

La otra escala de tiempo utilizada para conformar el UTC es el Tiempo Universal 1 (UT1), que es la medida del ángulo de rotación de la tierra con respecto al sol, la cual es una escala de tiempo no uniforme debido a las variaciones de la rotación de la tierra. La coordinación entre el IAT y UTC se obtiene por adición y sustracción de segundos (segundos «bisiestos» que se colocan el 30/06 o 31/12 de cada año). El UTC se obtiene de los estándares entregados por el USNO (*US Naval Observatory*), a partir de 50 relojes atómicos de cesio (Cs) independientes [11].

1.6.2 Sistema de Tiempo GPS

El origen de la escala de tiempo GPS se fijó coincidente con el UTC (Tiempo Universal Coordinado), a las 0 horas del 6 de enero de 1980. Como se mencionó anteriormente el segundo atómico es la unidad fundamental del UTC, pero está sometido a periódicos reajustes a causa del movimiento irregular de la Tierra, razón por la cual, la diferencia entre el tiempo GPS y el UTC, que se fijó en cero segundos en 1980, se fue modificando siendo el 1 de enero de 2005 de 13 segundos.

Otra unidad de tiempo utilizada por el sistema es el número de semana GPS, equivalente a 604800 segundos. La cuenta de la semana GPS comenzó con el origen de la escala de tiempo GPS, y cuando se completó la semana 1023 la NSGPS se reinició, es decir, la medianoche de 21 de agosto de 1999 se comenzó a contar nuevamente desde cero [12].

Capítulo 2

TIPOS DE ERRORES Y PRECISIÓN DE POSICIONAMIENTO

La precisión con que un receptor puede sincronizar su posición, velocidad y tiempo depende de la interacción de varios factores, entre los que destacan la exactitud de la pseudodistancia, las medidas de la fase de la portadora, los datos de navegación e incluso el modelo físico que relaciona estos parámetros. Para analizar el efecto de los errores de precisión, se considera que las fuentes de error son individuales por cada satélite; de esta manera se puede calcular con mayor eficacia el error equivalente en los valores de pseudodistancia. La precisión del resultado de la posición con respecto al tiempo, depende fundamentalmente del producto de un factor geométrico y un factor de error en la pseudodistancia. El factor por pseudodistancia implica a todos los errores asociados entre el receptor y un satélite, al determinar la distancia entre los mismos. El factor geométrico depende de la posición de los satélites que el GPS utilice para calcular su posición; esto es, la distancia y el ángulo que tengan entre sí. A continuación se detallan los diferentes tipos de errores que se presentan en el GPS.

2.1 INTERFERENCIAS DE RADIOFRECUENCIA

Las interferencias de RF pueden producir degradación de la señal de navegación o la pérdida de la señal del satélite que se está siguiendo. Estas interferencias pueden ser involuntarias o intencionales, y se clasifican como de bandas grandes o estrechas; la clasificación depende de si el ancho de banda es más grande o más estrecho que el

ancho de banda de la señal GNSS esperado. La Tabla 2.1 muestra diversas interferencias por radiofrecuencia.

Tabla 2-1 Fuentes y tipos de interferencia

Clase	Tipo	Fuentes
Banda Ancha	Banda límite gaussiana	Ruido intencional con bloqueadores
Banda Ancha	Modulación de frecuencia/fase	Armónicos de los transmisores de televisión
Banda Ancha	Espectro emparejado	Teodolitos cercanos
Banda Estrecha	Modulación en frecuencia/fase	Armónicos de estaciones de radio de Amplitud Modulada (AM)
Banda Estrecha	Barrido de onda continua	Armónicos de estaciones de radio de Frecuencia Modulada (FM)
Banda Estrecha	Onda continua	Banda de la portadora sin modular de transmisores cercanos

Existe un nivel de interferencia entre las señales de los satélites, conocido como interferencia intra-sistema, así como una afectación producida por satélites externos (por ejemplo, la producida entre GALILEO y el GPS), denominada interferencia entre sistemas. Otro tipo de interferencia se genera cuando se utiliza el mismo tipo de modulación en la misma frecuencia de la portadora; ésta no solo interfiere con la señal GPS, sino que también puede producir una falsa ubicación del receptor, en un efecto conocido como *spoofing*.

Casi cualquier dispositivo que trabaje en una frecuencia cercana a la banda L puede producir algunos niveles bajos de interferencia. La banda L1 del GPS está diseñada para ser utilizada por cualquier señal de navegación en todo el mundo. En la banda L2 operan todos los servicios de radiolocalización, los cuales se utilizan en un gran número de radares para el control de tráfico aéreo y vigilancia militar. La Tabla 2.2 muestra un resumen de los servicios que utilizan estas bandas.

Debido a la baja potencia con que son recibidas las señales y la cantidad de interferencias que se pueden presentar, los receptores requieren amplificadores para poder obtener una mejor ganancia. Es recomendable utilizar en el receptor filtros pasa

banda pasivos con baja pérdida antes del preamplificador. El filtrado previene interferencias no deseadas fuera de la banda de uso. La mayoría de los receptores comerciales no están diseñados para mitigar los problemas de interferencia, sino para proporcionar una ganancia suficiente. La interferencia de RF solo puede tener un efecto significativo cuando está en la línea de vista del receptor, sin alguna obstrucción.

Tabla 2-2 Frecuencias asignadas cerca de la banda GPS

SERVICIOS INTERNACIONALES	USO
960-1,215 MHz: Radionavegación, radionavegación satelital y aeronáutica.	Se usa en todo el mundo para la navegación aérea, incluyendo equipos de medición a distancia, tácticas de navegación aérea y radares secundarios de vigilancia.
1,215-1,350 MHz: Exploración satelital de la tierra, radiolocalización, radionavegación satelital, investigación del espacio y aeronáutica.	La utilizan los radares primarios para el control de tráfico aéreo y vigilancia militar. También se usa en sensores de vehículos satelitales y en el área de telefonía celular.
1,350-1,400 MHz: Servicios móviles y radiolocalización.	En todos los países se divide en diversas bandas para servicios fijos.
1,535-1,559 MHz: Satélites-móviles.	Se utiliza en enlaces de frecuencias a satélites de servicios de comunicación.
1,559-1,610 MHz: Aeronáutica, radionavegación, radionavegación satelital.	Las señales L1 del GPS, GLONASS y GALILEO se encuentran en esta banda.

2.2 ERROR POR MULTITRAYECTORIA Y EFECTOS SOMBRA

El error de multitrayectoria es la recepción de réplicas reflejadas o difractadas de la señal deseada. La distancia recorrida por una reflexión siempre es más larga que la ruta directa, por esto las recepciones multitrayectoria siempre tienen un retraso con respecto a la señal que sigue una ruta libre de obstáculos. Cuando el retraso es muy grande, el receptor puede fácilmente descartar esta señal, siempre y cuando el receptor siga la trayectoria directa. Las reflexiones multitrayectoria de objetos cercanos o incluso las ocasionadas por objetos distantes pueden provocar retardos cortos después de la llegada de la ruta directa, lo cual distorsiona la función de correlación entre las señales recibidas (señal de trayectoria directa y señales de multitrayectoria) y la referencia generada localmente en el receptor. También se distorsiona la fase compuesta por la

señal del receptor, introduciendo errores en la pseudodistancia y en las mediciones de la fase de la portadora, que producen errores de posición, velocidad y tiempo [13]. Los efectos de sombra producen atenuación excesiva en la trayectoria directa; estos efectos se dan cuando la señal pasa a través de un follaje o una estructura. Cuando las señales multitrayectoria no presentan este grado de atenuación, pueden presentar mayor potencia en el receptor, incluso que la señal de trayectoria directa. Estas situaciones se presentan comúnmente en el exterior, tal como se muestra en la Figura 2.1.

En el interior también se puede presentar este efecto, el efecto de sombra podría ser ocasionado por el techo de una casa o edificio y la multitrayectoria sería la reflexión en un edificio próximo al del receptor, donde la señal pudiera entrar por una ventana o apertura. En algunos casos, la atenuación ocasionada por el efecto sombra puede ser tan severo que el receptor solo pueda llevar un seguimiento de la señal que recibe por multitrayectoria. El error producido por la multitrayectoria no solo depende del retraso, sino también la potencia y la fase de la portadora con respecto a la de ruta directa.

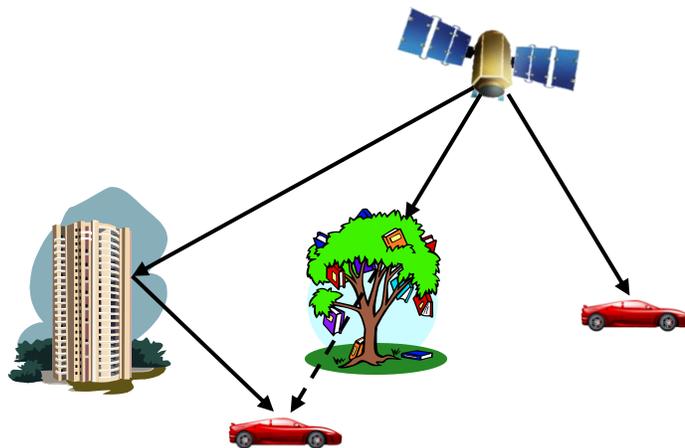


FIGURA 2-1 Efecto sombra y multitrayectoria

En exteriores, los árboles y edificios pueden bloquear las señales por debajo de un determinado ángulo de elevación. Por ejemplo en ambientes urbanos, se puede llegar a bloquear hasta un 97% de las señales. En estas circunstancias es muy posible que el receptor realice el seguimiento de una señal reflejada en lugar de la de ruta directa, causando grandes errores de pseudodistancia. En interiores, la multitrayectoria tiene características muy diferentes dependiendo de la ubicación del edificio con respecto a otros edificios, la profundidad a la que se encuentre, si se está cerca de una ventana, los materiales de construcción, etc.

Aunque se han investigado diferentes modelos matemáticos para solucionar los efectos multitrayectoria, es muy difícil generalizar estos fenómenos ya que son muy variables. Además, las sombras agravan los efectos multitrayectoria y sombras severas pueden ocasionar que el receptor realice el seguimiento de una señal reflejada provocando errores potencialmente grandes. No todas las señales recibidas presentan efectos multitrayectoria; generalmente los satélites con mayor altitud no tienen este efecto, y curiosamente los satélites de menor altitud y con mayores efectos multitrayectoria, ayudan a mejorar la dilución de precisión.

Se han desarrollado diversas técnicas para disminuir la recepción de señales multitrayectoria, reduciendo así la necesidad de discriminar las señales por medio del procesamiento del receptor. En entornos propicios como el campo abierto, es recomendable ubicar la antena lo más cerca posible del suelo. La razón es que los efectos multitrayectoria que se experimentan con respecto al suelo sufren pequeños retardos, caso contrario de los obstáculos que se encuentran ubicados cerca del horizonte. Las antenas también pueden diseñarse para atenuar señales multitrayectoria; por ejemplo, todas aquellas señales que se reciben a ángulos de elevación cerca o debajo del horizonte, sobre todo donde se espera que lleguen señales no deseadas. En sistemas diferenciales de línea de base pequeña, también se pueden reducir los efectos multitrayectoria, por medio de calibraciones y medidas de error multitrayectoria basadas en satélites.

Las técnicas para mitigar la multitrayectoria en el procesamiento del receptor se pueden dividir en paramétricas y no paramétricas. Los procesamientos no paramétricos utilizan diseños discriminadores que son menos sensibles a los efectos multitrayectoria, mientras que los de procesamiento paramétrico intentan asociar parámetros a los efectos multitrayectoria para posteriormente corregir su efecto en la estimación de la distancia del camino directo. Estas técnicas ofrecen una gran mejora para retardos por multitrayectoria grandes; sin embargo, el efecto en los pequeños retardos no es significativo, además de tener un menor rendimiento con el ruido y las interferencias, ya que el tiempo de procesamiento es muy grande y se requieren las características del efecto multitrayectoria recibido. Solo se han publicado evaluaciones limitadas para describir el efecto del ruido y la interferencia en el rendimiento de las técnicas de mitigación de la multitrayectoria.

Los errores multitrayectoria varían considerablemente en magnitud, en función del entorno en el que se encuentra el receptor, el ángulo de elevación del satélite, el procesamiento de señales en el receptor, el patrón de ganancia de la antena y las características de las señales. Actualmente los efectos multitrayectoria siguen siendo un área de investigación en progreso [14].

2.3 ERRORES IONOSFÉRICOS

Algunas irregularidades en la ionósfera debidas a la radiación solar pueden degradar rápidamente la potencia de la señal recibida en el receptor. Este fenómeno, conocido como centello ionosférico, puede dejar al receptor sin el seguimiento de algunos satélites por periodos cortos de tiempo. En esta capa de la atmósfera, sus electrones libres producen un retardo en la transmisión de las señales. Este tipo de irregularidades son más comunes y graves después del atardecer, en la región ecuatorial.

El centello causa una perturbación en la señal del receptor tanto en amplitud como en fase. Afortunadamente el centello rara vez causa una intermitencia en todos los satélites visibles simultáneamente. Las irregularidades que causan el centello no se encuentran presentes en todos los puntos por los que cruzan las señales de los satélites visibles, por lo tanto solo se ven afectados uno o a lo mucho algunos satélites de forma simultánea. Para una señal de incidencia vertical los rangos de retardo son de 10ns (3m) durante la noche y 50ns (15m) durante el día. En ángulos de elevación bajos (menores a 10 grados) el retraso puede ser de 30ns (9m) durante la noche y hasta 150ns (15m) durante el día [15]. Cabe señalar que los efectos de la ionosfera afectan por igual las mediciones de la pseudodistancia y de la fase de la portadora.

2.4 ERROR EN RELOJES ATÓMICOS

Como se mencionó, los satélites tienen relojes atómicos que controlan sus operaciones de temporización interna, incluso la generación del código PRN. A pesar de que estos relojes son altamente estables, se puede tener una diferencia en tiempo con respecto al tiempo GPS de hasta 1 ms, equivalente a un error en pseudodistancia de 300 km. La estación de control maestra es la encargada de enviar los parámetros de corrección del reloj de los satélites, y estos a su vez los difunden a través de los datos del mensaje de navegación. Como estos parámetros utilizan un ajuste de curva para predecir estimación de los relojes satelitales, existe un error residual que afecta directamente la pseudodistancia entre 0.3m y 4m, dependiendo del tipo de satélite y el tiempo en que fueron emitidos los datos. La corrección de los relojes satelitales por parte de la estación de control maestro se efectúa diario; en el momento exacto en el que se realiza la corrección el error puede ser de 0.3 m aproximadamente. Conforme pasa el tiempo el error residual se va incrementando de tal manera que a las 24 horas, unos instantes antes de la próxima corrección, se tiene un error de aproximadamente 4 m (considerando únicamente el error causado por el reloj satelital) [16].

2.5 ERRORES TROPOSFÉRICOS

Los retrasos troposféricos que presentan las señales GPS están en función del índice de refracción, que a su vez depende de la temperatura, presión y humedad relativa en el área local. El error por el retardo de esta capa de la atmósfera va desde los 2.4 m en un satélite cercano al cenit, hasta 25 metros en un satélite con un ángulo de elevación cercano a los 5° [17]. Para modelar este tipo de retrasos se divide la tropósfera en 2 partes: seca y húmeda. La parte seca produce el 90% del retraso troposférico y se puede predecir con mucha precisión; la parte húmeda, que surge del vapor de agua, es más difícil de predecir debido a las incertidumbres de la distribución de la atmósfera.

2.6 ERROR DE EFEMÉRIDES

La predicción de las efemérides es calculada y cargada a los satélites junto con otros parámetros en el mensaje de navegación, para posteriormente ser retransmitidos al usuario. Al igual que los errores de reloj, los errores de efemérides se pueden calcular mediante un ajuste de curva, y de igual manera presentan un error residual; este error puede calcularse mediante la proyección de un vector de error de posición en el satélite, entre la posición real y la posición prevista, como se muestra en la Figura 2.2. Este tipo de errores son más difíciles de calcular; el error total en la pseudodistancia o en la fase de la portadora en la predicción de efemérides es de aproximadamente 0.8m.

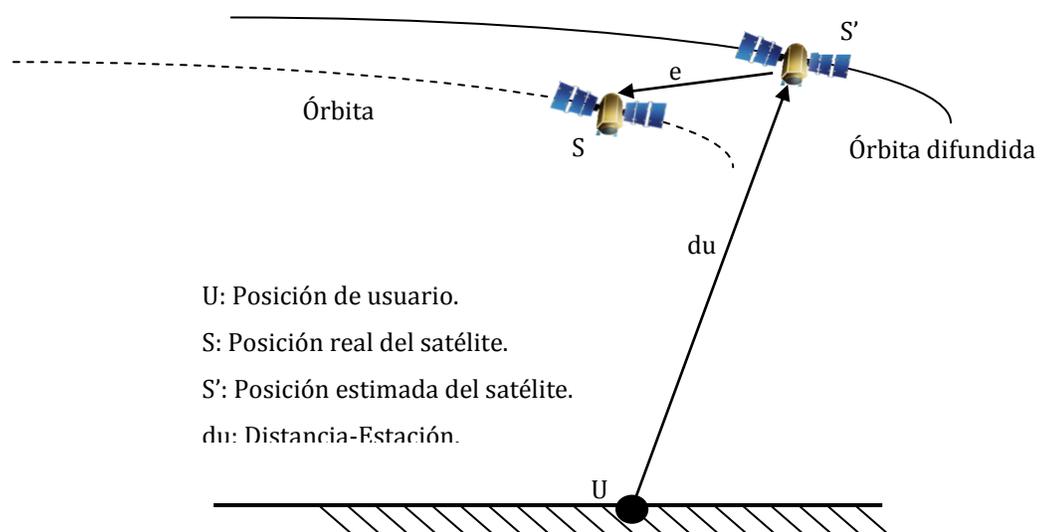


FIGURA 2-2 Error de efemérides

2.7 ERRORES RELATIVÍSTICOS

El usuario debe hacer una corrección para un efecto periódico relativista, que surge por una pequeña excentricidad en la órbita del satélite. La mitad de este efecto es causada por el cambio periódico de la velocidad del satélite en relación al marco ECI, y la otra mitad se origina por el cambio periódico del satélite en su potencial gravitatorio.

Cuando el satélite está en el perigeo (punto de la órbita más cercano a la Tierra), su velocidad es mayor y el potencial gravitatorio menor, lo que provoca que la velocidad del reloj sea menor. Cuando el satélite se encuentra en el apogeo (punto más lejano a la Tierra), la velocidad del satélite es menor y el potencial gravitatorio mayor, lo que ocasiona que la velocidad del reloj sea más alta. La corrección del reloj del satélite para este efecto relativista dará como resultado una estimación más precisa del tiempo de recepción por el usuario.

Debido a la rotación de la tierra durante la transmisión de la señal, se presenta otro error relativista, conocido como efecto Sagnac, cuando el cálculo de las coordenadas de los satélites se realiza en un sistema ECEF. Durante el tiempo de propagación de la señal por parte del satélite, el receptor en la superficie terrestre experimenta el movimiento de rotación producido por la tierra con respecto a un sistema ECI; esto claramente ocasionará un incremento en tiempo de la propagación de la señal al receptor. Si el efecto Sagnac no se corrige se pueden tener errores en la pseudodistancia de hasta 30m [18]. La figura 2.3 muestra este efecto.

Una forma de corregir el efecto Sagnac es trabajar solamente con el sistema ECI (Sistema Coordinado Inercial con Centro en la Tierra), calculando la posición del satélite y del usuario en este sistema. Este cálculo se puede realizar obteniendo las coordenadas en el sistema ECEF (Sistema Coordinado Fijo con Centro en la Tierra) en el instante de tiempo en el que se hacen los cálculos de pseudodistancias de los satélites visibles; posteriormente se calcula la posición de los satélites también en términos del sistema ECEF, en el momento de la transmisión de la señal utilizando los datos de las efemérides; de esta manera, cada posición satelital se puede transformar en un marco ECI.

Por último la señal GPS presenta una curvatura en el espacio-tiempo debido al campo gravitatorio de la tierra, aunque este efecto provoca errores muy pequeños, de alrededor de 18 mm [17].

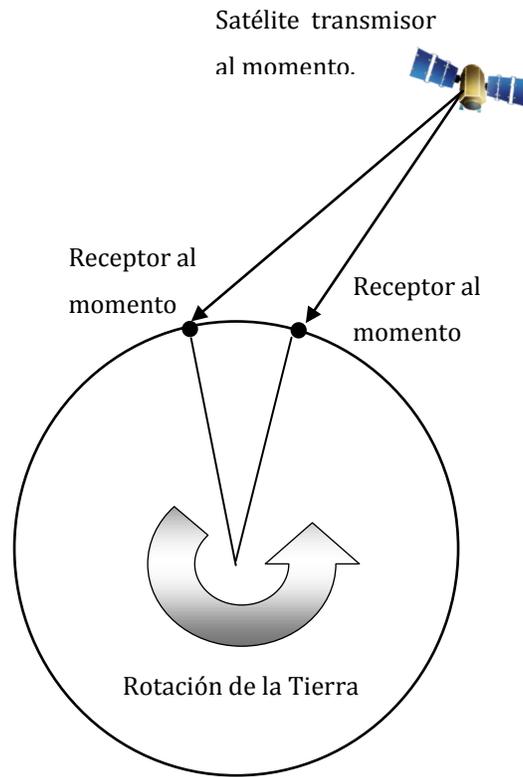


FIGURA 2-3 Efecto Sagnac

2.8 DILUCIÓN DE PRECISIÓN GEOMÉTRICA

El concepto de dilución de precisión (DOP) se deriva de los errores de medición geométricos entre el receptor y los satélites. El concepto se ilustra en la Figura 2.4; en la Figura 2.4a los satélites se encuentran en ángulo recto con respecto al usuario, mientras que en la Figura 2.4b el ángulo es mucho menor. El área rellena es la posible posición del usuario debido a los errores por pseudodistancia. La precisión de la posición es muy diferente para ambos casos; considerando que el error por pseudodistancia sea el mismo, la Figura 2.4b presenta un error mucho más grande debido a la geometría de los orbitales de los satélites por los diferentes errores. Por lo tanto, la Figura 2.4b tiene una dilución de precisión geométrica mayor.

Existen diferentes términos para expresar los errores geométricos: dilución de precisión geométrica (GDOP), dilución de precisión de posición (PDOP), dilución de precisión vertical (VDOP), dilución de precisión horizontal (HDOP) y dilución de precisión de tiempo (TDOP).

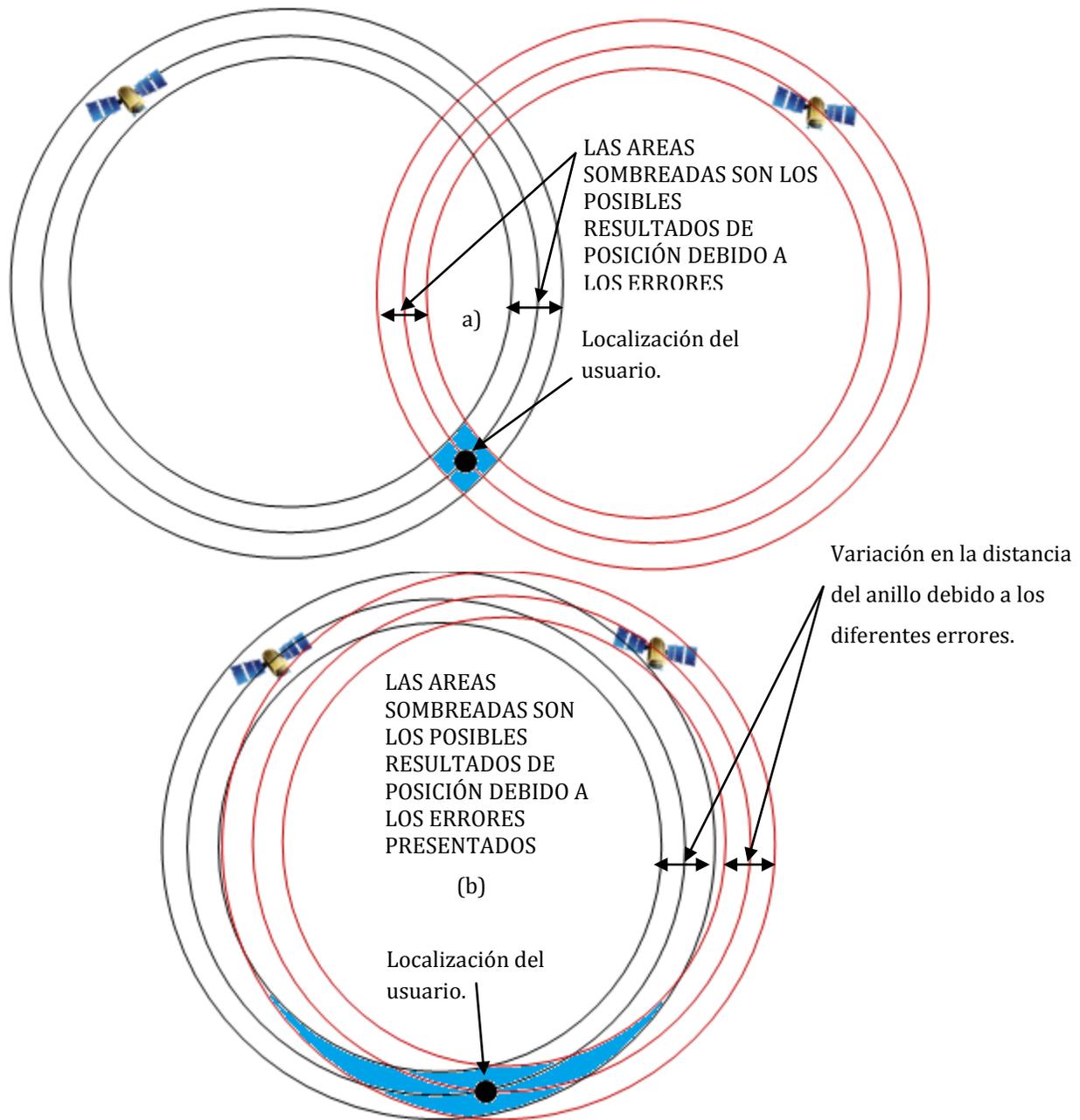


FIGURA 2-4 Dilución de precisión a) Bajo DOP b)Alto DOP

Capítulo 3

SISTEMAS GPS DIFERENCIALES

En muchas aplicaciones las demandas de exactitud, integridad, disponibilidad y continuidad son mayores incluso que las proporcionadas por un receptor PPS, por lo cual se diseñaron los sistemas GPS diferenciales (DGPS). Estos sistemas mejoran el posicionamiento o desempeño de la sincronización del receptor GPS, utilizando una o más estaciones de referencia en lugares conocidos, y cada estación está equipada con un receptor GPS. Las estaciones de referencia pueden proporcionar datos tales como:

- Correcciones al usuario en las mediciones de pseudodistancias inmediatas.
- Correcciones para la información acerca del reloj y las efemérides proporcionadas por los satélites.
- Mediciones de las estaciones de referencia; por ejemplo, pseudodistancias y fase de la portadora.
- Datos meteorológicos de las estaciones de referencia.
- Integridad de datos, tales como indicadores para usar o no cada uno de los satélites.
- Información auxiliar, como la localización y salud de los satélites.

Para estos sistemas se pueden utilizar varios tipos de enlaces de datos, desde enlaces de radio o incluso por medio de internet. En los DGPS se usan diferentes técnicas de corrección, basadas en el código o en la portadora, las cuales cambian también de acuerdo al área de cobertura: área local, área regional y área amplia. Las técnicas varían de acuerdo a su complejidad y sofisticación y van directamente relacionadas con la cantidad de área que abarcan, cada estación de referencia está diseñada para proveer datos a usuarios dentro de una distancia entre 10 y 100 km aproximadamente, así que para poder cubrir zonas mayores se utilizan varias estaciones

de referencia y, por lo tanto, diferentes algoritmos de corrección. Las técnicas basadas en el código se apoyan principalmente en las mediciones de pseudodistancias, mientras que las basadas en la portadora, utilizan la medición de la fase de la portadora. Las mediciones de portadora son más exactas que las de código; sin embargo, contienen componentes de longitudes de onda desconocidos que deben ser resueltos.

3.1 TÉCNICAS DE CÓDIGO

Los DGPS utilizan una o varias estaciones de referencia que calculan el error aproximado, en una zona con un radio de alrededor de 100 km por estación. Las condiciones climatológicas afectan directamente los errores ocasionados por la atmósfera; por lo tanto, a medida que aumenta la distancia entre la estación base y el receptor, el error de posición tendrá una mayor variante. Las técnicas de código mejoran notablemente la exactitud de los GPS autónomos y para abarcar áreas más amplias se incrementa el número de estaciones; sin embargo, las diferencias entre las técnicas de código de área local, de área regional y de área amplia van más allá del número de estaciones empleadas.

3.1.1 Técnica de Código de Área Local

Este sistema utiliza una estación de referencia equipada con un receptor GPS, de la cual se conoce perfectamente su ubicación. La estación obtiene los datos referentes a su posición mediante el receptor GPS y realiza una estimación del error para transmitirla posteriormente a los receptores de usuarios en los alrededores. En la mayoría de casos, el error presentado en la estación de referencia es el mismo que presenta el receptor del usuario, por lo que el usuario puede corregir la posición obtenida en su receptor.

El principal problema con esta técnica es que el receptor del usuario debe utilizar los mismos satélites que la estación de referencia para que el error en común sea similar. Una solución sería calcular el error para las combinaciones posibles de satélites visibles aunque para 8 o más satélites en vista el número de combinaciones (con 4 satélites por posición) se incrementa notablemente. Otro problema es que tanto el receptor de usuario como la estación deben utilizar la misma técnica de solución de posición (mínimos cuadrados, mínimos cuadrados ponderados o filtros Kalman), las mismas afinaciones del filtro, etc. La técnica de área local es de implementación simple pero con muchas limitantes, principalmente el número de combinaciones de satélites que deben ser transmitidas a los receptores de usuarios; por ello rara vez se utiliza en los DGPS.

Los DGPS realizan el cálculo y difunden las correcciones de pseudodistancias de cada satélite, en vez de realizar una corrección de las coordenadas de error de posición; de esta forma solo es necesario difundir como máximo 12 correcciones (número máximo de satélites en vista de acuerdo a la configuración de la constelación GPS) al receptor de usuario. Para realizar este cálculo, la estación de referencia debe conocer sus coordenadas (X_e, Y_e, Z_e) y la posición del satélite (X_n, Y_n, Z_n) por medio del mensaje de navegación. Teniendo las 2 posiciones en el sistema ECEF, el cálculo de la distancia real (D) entre la estación de referencia y el satélite se realiza con:

$$D_e^n = \sqrt{(X_n - X_e)^2 + (Y_n - Y_e)^2 + (Z_n - Z_e)^2} \quad \text{Ecuación 3-1}$$

Al mismo tiempo, la estación de referencia calcula su pseudodistancia (S) con respecto al mismo satélite que se utilizó en el cálculo anterior. Esta medida contiene los errores mencionados en el capítulo anterior, y la pseudodistancia calculada puede representarse por:

$$S_e^n = D_e^n + CR_e + E_e \quad \text{Ecuación 3-2}$$

Donde E_e son los errores de pseudodistancia y CR_e es la compensación entre el reloj de la estación de referencia y el tiempo GPS recibido en el mensaje de navegación. La diferencia entre las 2 distancias es la corrección diferencial y es difundida a todos los receptores de usuario para que puedan realizar el ajuste debido. La mayoría de errores presentados en la estación de referencia son los mismos que en el receptor de usuario, a excepción de los efectos multitraectoria, el ruido en el receptor y la compensación del reloj de la estación de referencia, aunque esta última puede calcularse.

La línea recta formada entre la estación de referencia y el usuario receptor se llama línea de base. Para líneas de base cortas, los errores predominantes utilizando esta técnica diferencial son los efectos multitraectoria, mientras que para las líneas de base largas, son los errores ionosféricos y troposféricos. En el caso de los efectos troposféricos se puede emplear un modelo de error de la zona local para obtener una mayor exactitud. La Tabla 3.1 muestra la magnitud de los errores que tienen efecto utilizando esta técnica; los datos proporcionados desprecian el tiempo de latencia entre la estación de referencia y el receptor de usuario al momento de transmitir la corrección. También se considera que la estación y el usuario se encuentran a una misma altitud o se emplea algún otro método para conocer la del usuario.

Tabla 3-1 Comparación de error entre el GPS y el DGPS de área local

SEGMENTO	FUENTE DE ERROR	ERROR (m)	
		GPS	DGPS de área local
Espacio/Control	Errores de reloj	1.1	0.0
Usuario	Error de grupo en C/A y P	0.3	0.0
	Efemérides difundidas	0.8	0.1-0.6 mm* Línea base en km
	Retardo Ionosférico	7.0	0.2-4 cm* Línea base en km
	Retardo troposférico	0.2	0.1-4 cm* Línea de base en km
	Ruido en el receptor	0.1	0.1
	Multitrayectoria	0.2	0.3
Error resultante en la posición del usuario		7.1	0.3m+1-6cm*Línea base en km

3.1.2 Técnica de Código de Área Regional

Debido a que la corrección de error en las técnicas diferenciales disminuye su exactitud cuando se tienen líneas de base largas, se pueden emplear 2 o más estaciones de referencia, dependiendo de la cantidad de terreno a cubrir. Las estaciones deben distribuirse en el perímetro que se quiere abarcar para utilizar el concepto de DGPS de área regional. El receptor de usuario puede obtener una mayor exactitud en la solución de su posición al obtener un promedio de las correcciones de pseudodistancias obtenidas de las estaciones de referencia. Ya que el error aumenta de acuerdo a la distancia entre el usuario y la estación, se puede asignar un determinado peso a cada estación de referencia, en donde la estación más cercana sea la de mayor peso [19].

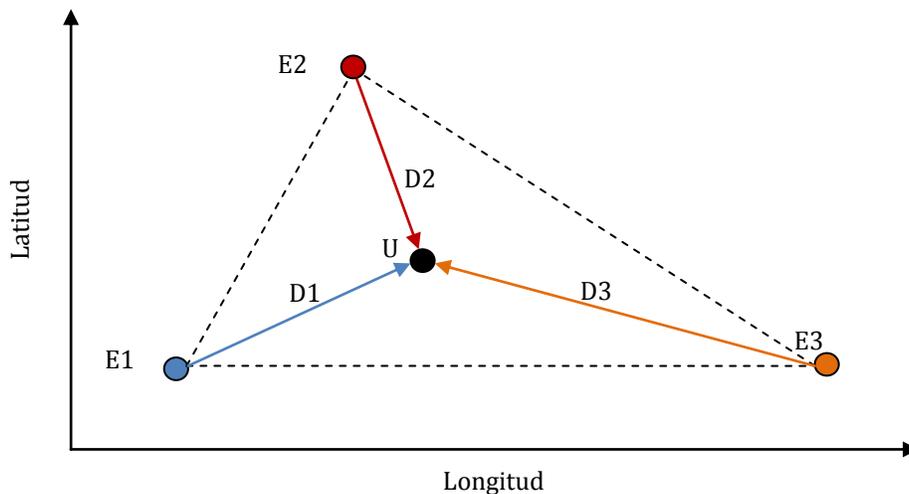


FIGURA 3-1 Cálculo de pesos de acuerdo a la distancia del usuario respecto a la estación

Para obtener mejores resultados en la solución de posición del usuario se utiliza una corrección de 2 etapas; en la primera de ellas cada estación realiza la corrección de manera individual, utilizando el error medido en cada una de ellas. El segundo paso consiste en determinar un promedio de error de acuerdo a los pesos presentados entre las estaciones de referencia y el usuario. La Figura 3.1 ejemplifica el concepto de DGPS de área regional utilizando 3 estaciones de referencia; el peso para cada estación sería determinado por la distancia con respecto al usuario utilizando su latitud y longitud.

3.1.3 Técnica de Código de Área Amplia

El objetivo del DGPS de área amplia es utilizar el menor número de estaciones de referencia posible, además de estimar la variación de cada componente en toda la región y no solo en la zona de la estación de referencia, sin depender de la proximidad del usuario a la estación de referencia. Esta técnica usa una red de estaciones de referencia, sitios de procesamiento y un enlace de datos que provee de las correcciones a los usuarios. Cada estación de referencia tiene uno o más receptores GPS para medir la pseudodistancia y la fase de portadora de las señales de los satélites. Las estimaciones de error en cada referencia se envían a los sitios de procesamiento central, para que posteriormente estas puedan estimar las efemérides de los satélites revirtiendo el algoritmo de la solución de posición de las estaciones. La información recabada por las estaciones también es utilizada para la corrección de error de los relojes de los satélites.

Para la estimación de los errores ionosféricos se emplean modelos, junto con las mediciones de los ángulos de inclinación de los retrasos de la ionósfera, que provee la red de estaciones de referencia para desarrollar estimaciones de retrasos verticales en puntos discretos sobre el área de cobertura. El receptor de usuario interpola entre estos puntos para desarrollar una corrección para el retardo ionosférico dependiendo del ángulo de inclinación de la señal de cada satélite recibida. En cuanto a los retrasos troposféricos, son tratados por las estaciones de referencia utilizan modelos específicos para el área local de su cobertura [20].

3.2 TÉCNICA DE PORTADORA

El movimiento constante de la constelación de satélites GPS, origina un efecto Doppler sobre el receptor de usuario, el receptor de usuario deber ser capaz de compensar este efecto en tiempo real para poder alcanzar una exactitud centimétrica.

Cuando el receptor puede compensar el efecto Doppler se obtienen mediciones sumamente exactas de la señal de la fase de la portadora entre las épocas de tiempo. Aunque los cambios de fase en la señal de una época a otra pueden ser medidos con mucha exactitud, el número total de ciclos en la portadora a lo largo de la trayectoria de propagación entre el satélite y el receptor sigue siendo ambiguo, la determinación de este número de ciclos se conoce como resolución de ambigüedad de ciclos en la portadora.

Generalmente las técnicas de resolución de ambigüedades son utilizadas en técnicas de pos procesamiento, ya que los cálculos realizados no son realizados en tiempo real y no hay premura por la solución de posición. Cada vez que un receptor se sincroniza con un satélite, no solo realiza la medición de pseudodistancia, también se tiene un contador de ciclos basado en el cambio de la frecuencia Doppler presente en la frecuencia de la portadora L1 y L2. Por cada época hay un determinado número de ciclos que mide el receptor. De esta manera el avance de la fase en la portadora durante una época puede ser determinada por la compensación del efecto de la frecuencia Doppler sobre la portadora. Esta compensación está dada por la tasa de cambio en la fase de la portadora, entre una época y otra. Aunque el número de ciclos en la portadora se puede medir con mucha exactitud, se presenta la llamada ambigüedad de ciclos en la portadora, debido a que el receptor no empieza el conteo en una época determinada si no en el momento en que empieza el seguimiento del satélite.

Como se mencionó anteriormente el SPS del GPS provee dos tipos de mediciones, la de pseudodistancia y la de la fase de la portadora para cualquier receptor GPS. Los receptores de doble frecuencia son capaces además de recuperar el código P (Y) para realizar las respectivas mediciones en las frecuencias L1 y L2 además de las ya obtenidas por el código C/A. El problema con las mediciones sobre los 2 tipos de servicio y en ambas frecuencias, es que todas presentan los errores de retraso en la ionosfera y troposfera, errores de reloj, errores de efemérides y ruido, aparte de los propios problemas de los receptores de usuario, como los efectos multitrayectoria, la inestabilidad de sus relojes de cuarzo y también el ruido del receptor. La ventaja de los DGPS es el uso de al menos 2 receptores GPS, donde la combinación lineal de ambas mediciones puede eliminar los errores más comunes presentados en ambos receptores. Esta combinación se conoce como simple diferencia (SD) y la diferencia entre 2 SD es llamada doble diferencia (DD). La implementación de DD corrige la mayoría de errores presentados en el código P (Y) o C/A, a excepción de los efectos multitrayectoria que aunque se pueden disminuir no se pueden eliminar y el ruido del receptor que aunque siempre está presente generalmente es mucho menor que el presentado por multitrayectoria. Estas técnicas son comúnmente conocidas como técnicas de interferometría.

La técnica de DD se puede aplicar para mediciones de la portadora o de pseudodistancia. La primera presenta un bajo nivel de ruido, aunque también una ambigüedad en la fase de la portadora. La DD de pseudodistancia no presenta ambigüedades pero tiene un mayor índice de ruido. Estas técnicas pueden resolver la ambigüedad de ciclos en la portadora, la compensación del reloj del satélite, los errores en la ionosfera y en la troposfera también se corrigen siempre y cuando los receptores se encuentren a la misma altitud y en una línea de base menor a 50km, los errores de efemérides son un término común, por lo tanto se eliminan en la formación de la SD.

El problema con las técnicas interferométricas para la resolución de ambigüedades de ciclo enteras, es el requerimiento de grandes recursos de cálculo, ya que normalmente los recursos computacionales no pueden proporcionar una solución en tiempo real. Actualmente esta área sigue siendo de un tema muy amplio de investigación y fuente de varios artículos. Las técnicas interferométricas normalmente tienen aplicaciones en estudios topográficos, como la agrimensura. La utilización de GPS en esta área requiere exactitudes centimétricas y para esto se hacen posicionamientos estáticos de alrededor de una hora con estas técnicas. También son muy utilizadas en aplicaciones de vuelo y emplean otros sistemas para aumentar la exactitud.

3.2.1 Aplicaciones de Vuelo

Las estaciones en tierra transmiten las correcciones diferenciales a los receptores GPS de las aeronaves, las ambigüedades de ciclo enteras son resueltas por el GPS en vuelo. Las pistas de aterrizaje son equipadas con pseudolites (pseudo-satélites), los cuales son capaces de generar códigos PRN, diferentes a los de los satélites para que no exista confusión. Con los pseudolites no es necesario tener un seguimiento de un mínimo de cuatro satélites, además se puede resolver con mayor facilidad las ambigüedades de ciclo enteras. La exactitud alcanzada en estas aplicaciones depende de las mediciones de fase una vez que se hayan resuelto las ambigüedades de ciclo entero. El error obtenido llega a ser de 20 a 40 cm. La fuente dominante de error es la multitrayectoria. Hay que recalcar que los efectos multitrayectoria son los errores más grandes en las técnicas interferométricas, sin embargo las antenas en tierra presentan mayores efectos multitrayectoria que los receptores GPS en los aviones.

3.3 SBAS

El sistema SBAS es un DGPS de área amplia con un sistema de integridad de datos, utilizando satélites geoestacionarios, además de poder transmitir en la frecuencia de la banda L1. Todos estos sistemas están equipados con receptores de monitoreo, instalaciones centrales de procesamiento, uno o más satélites geoestacionarios e instalaciones encargadas del enlace estos. En cada instalación de procesamiento central, se reciben todos los datos de la red de estaciones de monitoreo para ser procesadas y así poder estimar las posiciones de los satélites y los errores en sus relojes, este proceso se realiza mediante la diferencia de mediciones entre cada estación de monitoreo, las mediciones recibidas en el mensaje de navegación y la estimación del retardo en la ionosfera dentro del área de servicio. Las instalaciones de procesamiento central también son capaces de determinar cualquier problema en alguno de los satélites (Problemas en las señales satelitales, comportamiento erráticos en el reloj del satélite etc.). Si se detecta una anomalía, se envía los datos del satélite GPS al o los satélites geoestacionarios para que estos puedan informar a los receptores de usuarios que señal no debe ser usada en la determinación de su posición. Los satélites geoestacionarios modulan el mensaje SBAS junto con el mensaje de navegación en la banda L1 y posteriormente la transmiten a todos los usuarios. Los sistemas SBAS fueron diseñados para aplicaciones de vuelo pero actualmente pueden ser utilizadas en diversas áreas con un receptor adecuado. No cualquier GPS es capaz de realizar las correcciones de los sistemas SBAS, para esto es necesario modificar su software.

3.4 ESTADO DEL ARTE

Se ha hecho una amplia investigación sobre los últimos avances en la corrección de errores de sistemas de navegación satelital. Como se mencionó anteriormente hay diversos factores que afectan el desempeño de los GPS. Los efectos de la Ionosfera, son unos de los principales errores en los sistemas GPS, en [28] se modelan notablemente los errores de la ionosfera basado en el modelo de Klobuchar y en [24] se emplea este efecto para monitorear y tratar otros errores en pseudodistancias, empleando algoritmos de auto calibración del propio receptor GPS. El problema con esta técnica es que esta basado en las correcciones atmosféricas de los sistemas diferenciales WAAS, además de la necesidad de emplear receptores GPS de doble frecuencia.

Por otro lado en [25] se discuten nuevas técnicas para el posicionamiento en receptores GPS, con resultados comparables con a los obtenidos con DGPS. Estas técnicas alcanzan precisiones a niveles de decímetros o centímetros. Para alcanzar estos niveles se ayuda de receptores de doble frecuencia, efemérides precisas e información

de los relojes de los satélites. Aunque actualmente se puede conseguir las efemérides precisas, el servicio internacional GNSS (IGS) tarda de 3 a 9 horas en entregarlas, esto impide que estas técnicas puedan emplearse en tiempo real.

Otra rama de gran investigación aplicada a los errores GPS son los algoritmos evolutivos como algoritmos genéticos y redes neuronales. En [26] se utilizan 3 algoritmos evolutivos diferentes y en [27] una red neuronal con resultados de precisión de 0.8m y 0.5m en promedio utilizando receptores GPS comerciales de bajo costo. Cabe mencionar que estas pruebas se realizaron en centros de investigación al aire libre donde los efectos multitrayectoria no son un factor importante. Estas técnicas están basadas en colecciones de datos de la misma zona, donde los errores GPS presentados no varían drásticamente. Esto no sucede en ambientes urbanos, en los cuales los efectos multitrayectoria ocasionan cambios abruptos en los errores GPS. Las técnicas anteriores tendrían que ser aplicadas a estos medios para observar su desempeño, en un ambiente donde la colección de datos es mucho más dispersa.

Actualmente las técnicas de posicionamiento más exactas son las mediciones de cambio de fase en la portadora, se pueden alcanzar niveles de exactitud a niveles de centímetros. Como se mencionó anteriormente esto depende de la solución de las ambigüedades de ciclo entero, que se ve afectado por los errores GPS. En [33] se modelan los errores dispersos (por ejemplo los retardos de la ionosfera) y no dispersos (como los errores en la troposfera). Las correcciones RTK solo se emplean para distancias no mayores de 25 km, ya que los retrasos atmosféricos son considerablemente diferentes a mayor distancia. [33] también aborda esta complicación, estimando estas diferencias de error en distancias de hasta 100 km obteniendo resultados favorables. En [32] se realizan pruebas con una red de estaciones RTK (NRTK) en Reino Unido, utilizando diferentes enlaces datos para probar la fiabilidad, posicionamiento continuo, movilidad y exactitud de los sistemas RTK en un vehículo. Aunque las pruebas arrojaron excelentes resultados se siguen tratando diversos problemas en cuanto a la transmisión de datos y el bloqueo de las señales satelitales. Los servicios de datos celulares resultaron ser la mejor opción pero no hay una garantía en la entrega del mensaje, así como un retardo considerable para aplicaciones en tiempo real. Otro problema fue la pérdida momentánea de las señales satelitales, a causa de los efectos multitrayectoria.

Existen diversas aplicaciones en medios urbanos donde los efectos multitrayectoria juegan el factor más importante en los errores GPS. Uno de los más importantes a corto plazo, es el control de flotillas. Hay muchas propuestas para compensar los diferentes errores GPS, en [29] se apoyan de Sistemas de Navegación Inercial (INS) y filtros Kalman obteniendo en promedio buenos resultados. El INS es utilizado principalmente para

movimiento laterales y el filtro Kalman para la predicción del posicionamiento. Se obtuvieron buenos resultados en cuanto a la predicción de posición cuando los movimientos de los vehículos no eran muy abruptos, esto sin tomar en cuenta que las pruebas no fueron realizadas en medios urbanos donde la precisión de posición varía demasiado. En [30] no solo se utilizan INS, también se modelan los efectos multitrayectoria, retardos de corrección DGPS y los cambios geométricos repentinos comúnmente presentados en ambientes urbanos, además de utilizar propiedades estadísticas del ruido en la zona. Los resultados fueron muy satisfactorios, siendo de nuevo la multitrayectoria el error predominante, con errores de hasta un metro.

En [31] se implementa una sistema de localización vehicular automatizado, donde una estación de referencia (actúa como servidor) se encarga de realizar la ubicación en un sistema de mapas con mucha exactitud, el vehículo está equipado con un receptor DGPS, celular con soporte GPRS y un micro controlador encargado de controlar el enlace para el envío de posición, velocidad y tiempo a la estación de referencia. El proyecto fue diseñado principalmente para el control de flotillas, siendo suficiente la exactitud de un DGPS por código. Una gran ventaja es la implementación de un enlace de datos GPRS, superando la limitante de los enlaces de radio convencionales, aunque el retardo del tiempo de transmisión depende de muchos factores (velocidad de transmisión, saturación de la red, etc.).

En el presente para los errores atmosféricos se han desarrollado diferentes modelos con buenos resultados, además si el usuario cuenta con un receptor de doble frecuencia puede mitigar este error. Los errores de reloj, efemérides y de reloj en los satélites son compensados con correcciones diferenciales. Los errores relativistas pueden ser tratados con mediciones de portadora, quedando solo los efectos trayectoria y el ruido en el receptor. Por lo tanto las zonas urbanas son las más propensas a errores, aun con las técnicas RTK. Los últimos avances en posicionamiento NRTK siguen en constante investigación y solo se han empleado en Estados Unidos, Europa, Australia y Japón. En algunas aplicaciones vehiculares, los efectos multitrayectoria se pueden compensar con INS.

Capítulo 4

ARQUITECTURA DEL SISTEMA

La mayoría de los errores en los sistemas de navegación satelital pueden resolverse con sistemas DGPS, a excepción del ruido en el receptor y los efectos multitrayectoria, siendo estos últimos predominantes. Cuando existe una distancia considerablemente grande entre la estación de referencia y el GPS móvil, son marcados los errores atmosféricos, pero si la distancia no sobrepasa los 100km el error es pequeño; por ello, los sistemas DGPS de áreas amplias tienen varias estaciones de referencia. Si se corrigen los efectos multitrayectoria en los DGPS actuales se podría reducir notablemente el error de posición. El modelo presentado utiliza este concepto, con los datos obtenidos del protocolo NMEA para estimar las señales con efecto multitrayectoria; NMEA es un medio por el cual los instrumentos marítimos y los receptores GPS pueden comunicarse, definido por la National Marine Electronics Association. Se simuló una estación de referencia con las instalaciones del CIDETEC, utilizando un modem WAVECOM como GPS y un celular como dispositivo móvil, el cual tiene integrado un receptor GPS. El enlace de datos es por medio de internet. La información obtenida en la estación de referencia se almacena periódicamente en una base de datos, al igual que la información recibida por el móvil, para posteriormente poder ser comparada.

4.1 ESTACIÓN DE REFERENCIA

Para simular una estación de referencia se necesita un GPS con el que se puede medir en todo momento los errores presentados en el área. Para este trabajo se utilizó

un kit de desarrollo de la marca WAVECOM. El CPU Wireless WAVECOM fue proporcionado por el Centro de Investigación de Computo (CIC) y se pueden desarrollar diversas aplicaciones. El CPU Wireless envía la información por medio de un puerto serie, con el formato establecido por el protocolo NMEA.

Se diseñó una aplicación en Visual Basic.NET 2010 para la obtención, interpretación, manipulación y almacenamiento de los datos recibidos por el CPU Wireless. Para almacenar la información se implementó una base de datos con el MDB (Manager Data Base) PostgreSQL. La aplicación desarrollada no solo administra la información recibida, sino que también es capaz de recibir conexiones entrantes, en este caso de cualquier dispositivo móvil que necesite una corrección diferencial, el único requerimiento es que la información recibida tenga el formato correcto.

4.1.1 CPU Wireless WAVECOM

El modem WAVECOM es una tarjeta de desarrollo para diversas aplicaciones, tiene soporte GSM/GPRS/EGPRS, interfaz SIM, USB, UART, etc. Como accesorio cuenta con una tarjeta GPS como se muestra en la imagen siguiente:

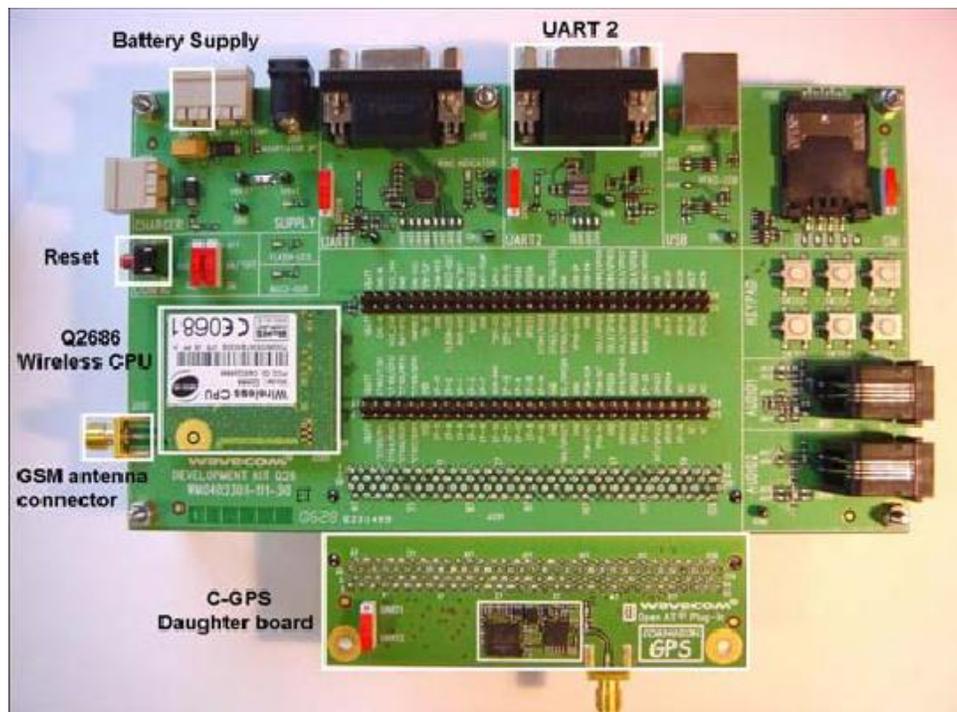


FIGURA 4-1 Kit de desarrollo WAVECOM

El conjunto de componentes de la tarjeta GPS realiza un procesamiento preliminar de la información recibida de los satélites y posteriormente la envía al CPU wireless. La tarjeta GPS utiliza uno de los 2 UART's disponibles para enviar y recibir datos con el CPU Wireless, por lo tanto el otro UART es utilizado para que cualquier aplicación externa (Por ejemplo un emulador de terminal como la Hyperterminal) sea capaz de enviar comandos AT o recibir sentencias NMEA. Para nuestro caso el UART1 sirve de interfaz entre el CPU Wireless y la aplicación de Visual Basic.net desarrollada y el UART2 es utilizado internamente para la comunicación con la tarjeta GPS.

4.1.1.1 Tarjeta GPS

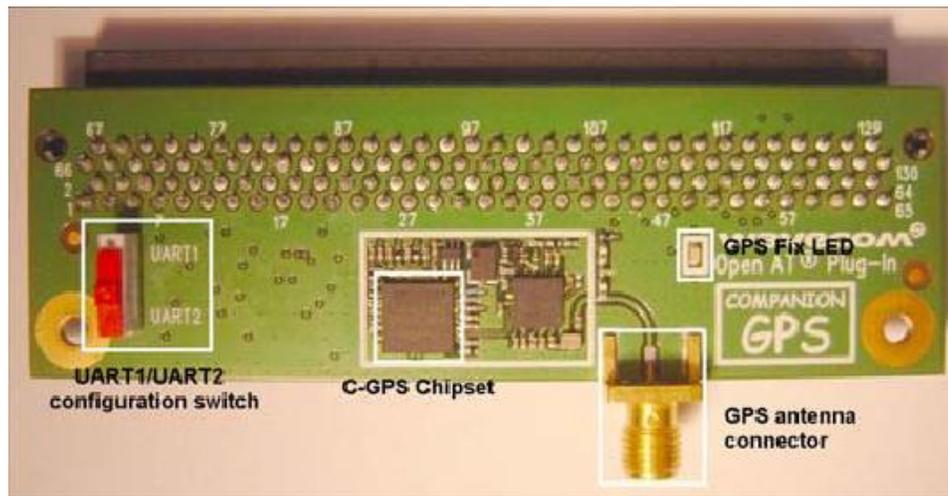


FIGURA 4-2 Tarjeta GPS

- Conector de antena GPS: Este conector se utiliza para conectar la antena externa GPS con el conjunto de componentes de la tarjeta GPS.
- Configuración UART1/UART2: Este interruptor se emplea para seleccionar el UART que servirá para comunicar la tarjeta GPS y el CPU Wireless. Si se selecciona el UART1, este no podrá ser utilizado para mandar comandos AT mediante alguna aplicaciones externa, el UART2 será utilizado en su lugar. De igual manera si se selecciona el UART2 para la comunicación con el CPU wireless, se tendrá que emplear el UART1 como interfaz para alguna aplicación externa.
- Indicador de LED: Este led indica cuando se ha logrado establecer una posición;
 - Si no se logra la obtención de una posición el led permanece encendido.

- Una vez que se obtiene una posición el led empieza a parpadear, la frecuencia de parpadeo es la misma con la que las sentencias NMEA son enviadas a la aplicación externa.
- Si la señal se pierde el led deja de parpadear.

4.1.1.2 Tarjeta WAVECOM

Se necesita una correcta configuración por parte de la tarjeta wavecom para poder utilizar la tarjeta GPS. La figura 4-3 muestra el switch para la manipulación de cada UART.

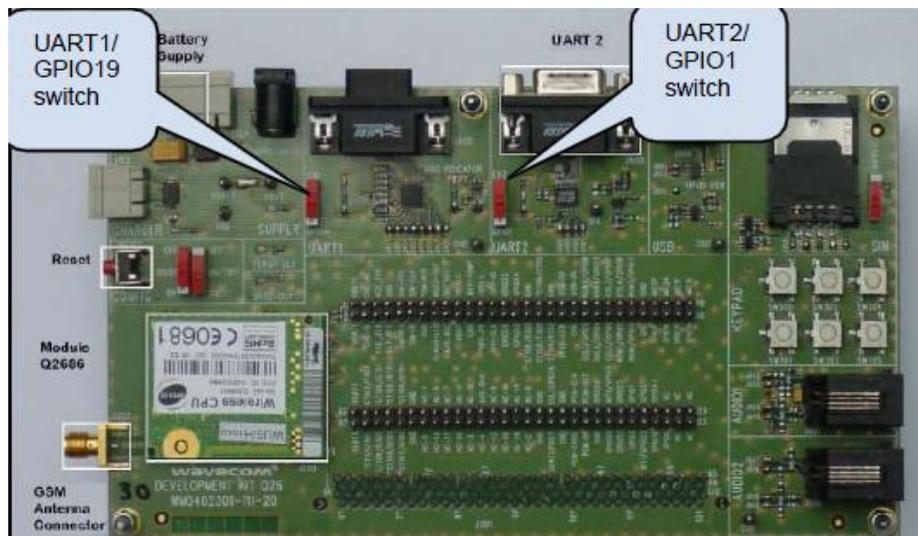


FIGURA 4-3 Tarjeta WAVECOM

Si se quiere utilizar el UART1 para la tarjeta GPS, su switch debe seleccionar GPIO19 y UART2 en EN2 para aplicaciones externas, por el contrario si se desea utilizar UART2 para la tarjeta GPS, su switch debe seleccionar GPIO1 y UART1 en EN1. También el switch ON/OFF debe estar seleccionado en ON.

4.1.1.3 Aplicación de Consulta

Wavecom proporciona una aplicación de consulta para obtener la información de la tarjeta GPS en sentencias NMEA. La aplicación utiliza algunos comandos AT personalizados para iniciar la aplicación o configurar el comportamiento de la misma.

Tabla 4-1 Configuración NMEA

CONFIGURACIÓN DE SENTENCIA NMEA

COMANDO	RESPUESTAS
AT+NMEA?	+NMEA:<VALOR> OK
AT+NMEA=?	+NMEA:(0-2) OK
AT+NMEA=<VALOR>	+CME ERROR: 3 or OK

El rango de valores aceptado es de 0-2:

- 0: Indica que la trama NMEA no debe ser enviada.
- 1: Especifica que la trama NMEA debe ser enviada en formato estándar.
- 2: Indica que la trama NMEA debe ser enviada en bruto.

Tabla 4-2 Configuración UART

CONFIGURACIÓN UART	
COMANDO	RESPUESTAS
AT+CGPS?	+CGPS:<VALOR> OK
AT+CGPS=?	+CGPS:(1-2) OK
AT+CGPS=<VALOR>	+CME ERROR: 3 or OK

El rango de valores aceptado es de 1-2:

- 1: Indica que UART1 es utilizado por la tarjeta GPS y UART2 por la aplicación externa.
- 2: Indica que UART2 es utilizado por la tarjeta GPS y UART1 por la aplicación externa.

Tabla 4-3 Configuración General

CONFIGURACIÓN GENERAL	
COMANDO	RESPUESTAS
AT+CONFIG?	+CONFIG:<VALOR> OK
AT+CONFIG=?	+CONFIG:(0-1)

	OK
AT+CONFIG=<VALOR>	+CME ERROR: 3 or OK

El rango de valores aceptado es de 0-1:

- 0: La aplicación no guarda la configuración usada para NMEA y UART.
- 1: La aplicación guarda la configuración usada para NMEA y UART. Por lo tanto aunque la tarjeta sea reiniciada, la configuración previa se mantiene.

Para iniciar la aplicación es necesario enviar el comando “AT+WOPEN=1” y para pararla el comando “AT+WOPEN=0”.

4.1.1.4 Procedimiento para Descargar la Aplicación de Consulta

La aplicación de consulta se descargó utilizando el protocolo XModem, usado por la hyperterminal (Se puede utilizar cualquier aplicación para puerto serial que emplee el protocolo XModem para transferencia de información). A continuación se describen los pasos para la descarga de la aplicación de consulta.

1. Se conecta el UART1 a la PC, la configuración de la hyperterminal debe ser;
 - a. Baud Rate: 115200 Bauds/Sec
 - b. Data Bits: 8
 - c. No parity.
 - d. 1 Stop Bit.
2. El swithch “BOOT” del CPU wirless debe ser selección en OFF y el switch ON/OFF en ON. La tarjeta GPS no debe estar conectada.
3. Se ejecuta el comando “AT+WDWL”.
4. Se transfiere el archivo de la aplicación de consulta con extensión “.dwl”.
5. Después de haberse completado la descarga se debe ejecutar el comando “AT+CFUN=1”, para reiniciar el CPU wireless.

4.2 DISEÑO DE BASE DE DATOS EN POSTGRESQL

Con el fin de tener un registro de toda la información, se creó una base de datos que almacenara la información recaba por la estación de referencia y la enviada por el GPS móvil. Se utilizó la definición de base de datos relacional (Entidad-Relación). Se

diseñaron 4 entidades, 2 para almacenar la información del GPS servidor y otras 2 para el GPS móvil. La figura 4-4 muestra el diseño Entidad Relación del Servidor “GPS_Servidor”:

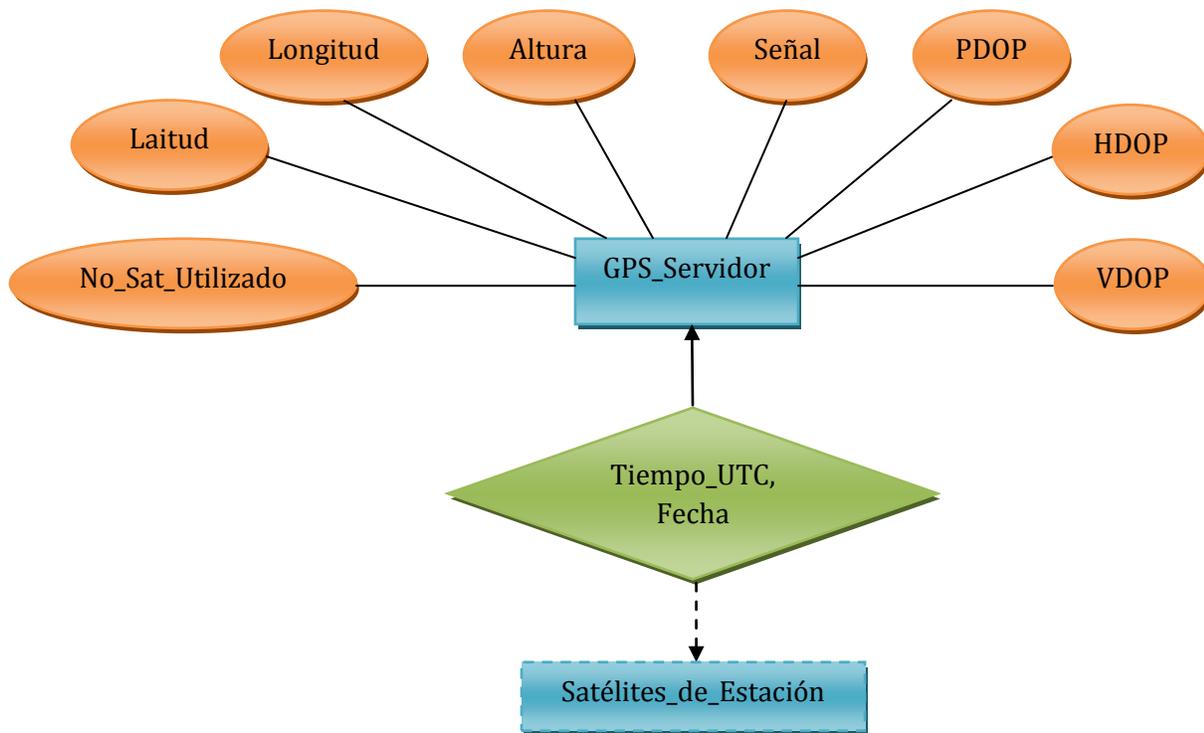


FIGURA 4-4 Modelo Entidad Relación del GPS Servidor

En la figura se muestran 2 entidades relacionadas por 2 atributos (Tiempo UTC y Fecha), los cuales sirven como restricción (Llave primaria). La entidad “GPS_Servidor” almacena la información general referente a la posición y errores geométricos. El atributo “Señal” indica la fiabilidad de los datos, “No_de_Sat_Utilizados” el número de satélites utilizados en la solución de posición, “PDOP”, “HDOP” y “VDOP” los errores geométricos. La entidad “Satélites_de_Estación” guarda la información de los satélites, los atributos no se dibujaron porque son demasiados, pero se resumen a continuación:

Satélites_de_Estación:

- Tiempo_UTC
- Fecha

- Sat_1
- Az_1
- Angulo_1
- SNR_1
- Sat_2
- Az_2
- Angulo_2
- SNR_2
- :
- :
- :
- Sat_35
- Az_35_
- Angulo_35
- SNR_35

“Sat_#” se refiere al código PRN, “Az_#” el azimut entre el receptor y el satélite en cuestión, “Angulo_#” el ángulo de elevación entre el receptor y el satélite en cuestión y “SNR_#” la relación señal a ruido de la señal del satélite en cuestión.

La constelación GPS está compuesta solo por 24 satélites pero con el paso del tiempo se han ido reemplazando varios por diversas causas (Tiempo de vida útil finalizado o Fallas de diversos tipos), por lo tanto el código PRN mayor no es 24. En la entidad “Satélites_de_Estación” como se puede observar arriba, se introdujo un soporte de hasta un PRN 35.

Las entidades encargadas de almacenar la información del GPS móvil son iguales a las del GPS servidor a excepción de la entidad encargada de la información de los satélites que contiene un atributo más llamado “Movil_Id_sat_utilizados”, el cual indica el código PRN de cada satélite que se empleó en la solución de posición. La palabra “Móvil” se antepuso en el nombre del atributo para indicar que pertenece a la información del GPS móvil, al igual que todos los demás nombres de atributos y entidades referentes encargadas de su almacenamiento.

4.3 DESARROLLO DE APLICACIÓN PARA GPS SERVIDOR

La aplicación desarrollada en Visual Basic .NET es de tipo Windows Form, esta clase de aplicación permite diseñar una interfaz con ventanas, botones, etiquetas y muchas otras figuras similares a las de una ventana de Windows.

El programa no solo se encarga de mostrar de una manera presentable los datos del protocolo NMEA de la tarjeta GPS, también permite interactuar por medio de comandos con el CPU Wireless, almacena la información recibida cada cierto tiempo en una base de datos, no solo del GPS de la estación, también de cualquier dispositivo móvil GPS que envíe su ubicación por medio de internet.

Para el desarrollo de todas estas tareas se utilizaron en su mayoría temporizadores de procesos, para que en ciertos intervalos de tiempo se almacene información en la base de datos o se actualice la información recibida de la tarjeta GPS en pantalla. Para el proceso encargado de abrir un puerto para cualquier conexión entrante se creó un proceso en paralelo o también llamado background. Esto fue necesario debido a que el proceso debe estar activo en cualquier momento.

Para mostrar una posición se utilizó la API proporcionada por Microsoft para manipular su sistema de mapas de MapPoint.

4.3.1 Diseño De Interfaz De Usuario

El diseño de la interfaz de usuario se desarrolló con el fin de proporcionar la posición obtenida por el GPS y algunos datos adicionales, además de poder interactuar por medio de comandos con el CPU wireless.

La figura 4-5 muestra la interfaz de usuario diseñada. El estatus indica si la señal GPS recibida es adecuada o no. Aun cuando el receptor GPS haya logrado el seguimiento de la señal de los satélites, pueden presentarse diversas situaciones en que la señal se pierda, como puede ser interferencia, condiciones atmosféricas adversas, fallas en las señales satelitales o incluso fallas en la antena del receptor.

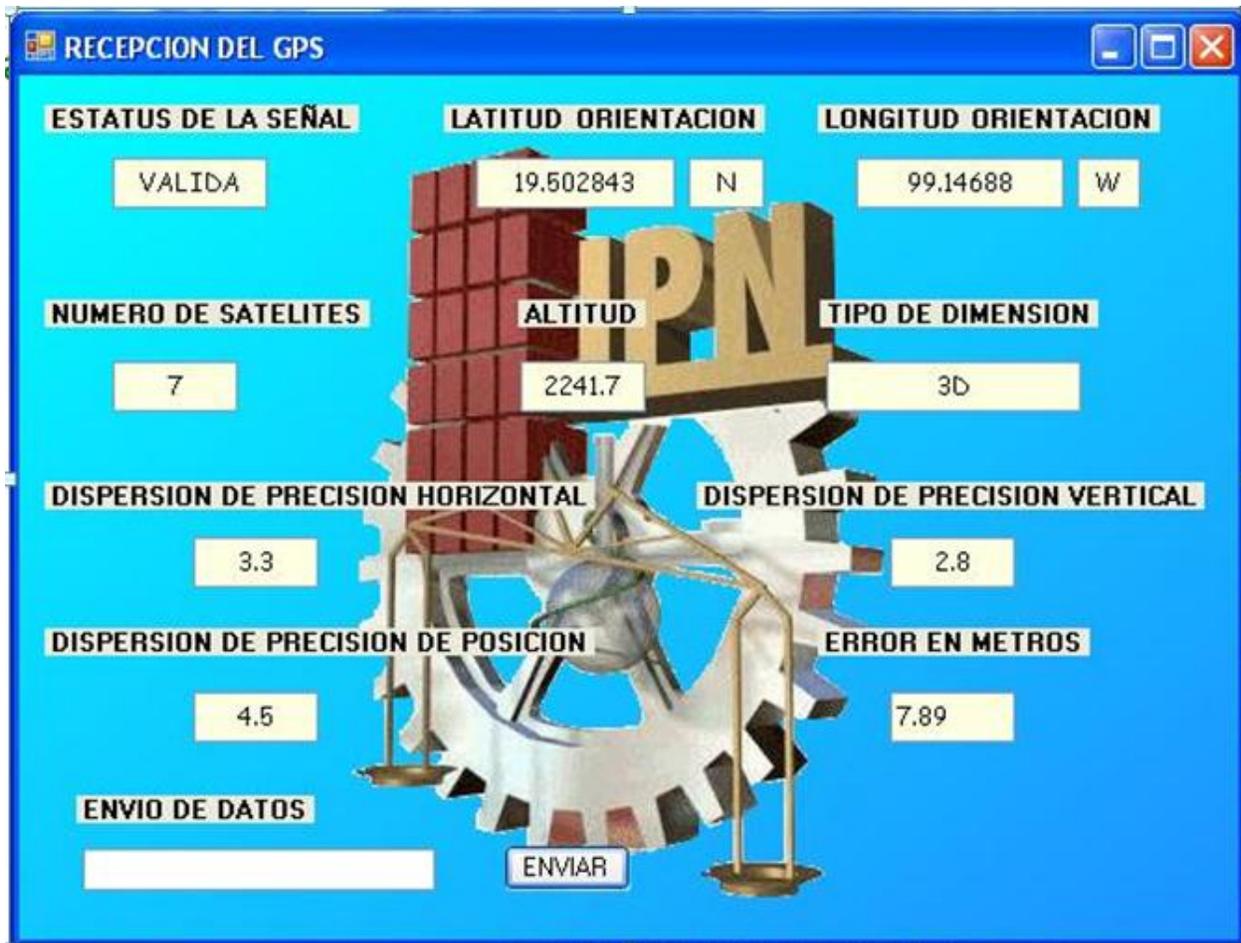


FIGURA 4-5 Interfaz de Usuario

La posición está dada por la longitud y la latitud en 2 dimensiones, cuando se tiene un posicionamiento en 3 dimensiones se agrega la altitud. Idealmente el posicionamiento se realiza en 3D, sin embargo se pueden presentar situaciones en las que solo se pueda calcular en 2D. Esto es debido al número de satélites que se emplean para la solución de posición. Para un posicionamiento en 3D se necesita un mínimo de 4 satélites, cuando no se cumple este mínimo se puede adquirir una ubicación en 2D con un mínimo de 3 satélites.

Hay diversos formatos para indicar las coordenadas de latitud y longitud:

- Grados y Minutos Decimales
- Grados, Minutos y Segundos
- Grados Decimales
- Universal Transversal Mercator (UTM)

Para nuestra aplicación se empleó el formato Grados Decimales. La orientación puede ser positiva o negativa, sin embargo puede ser reemplazada por Norte o Sur para latitud y Este u Oeste para longitud. Cuando la latitud es positiva se llama "latitud norte", si es negativa es llamada "latitud sur", para la longitud positiva se emplea la "longitud este", cuando es negativa se le llama "longitud oeste".

La casilla "numero de satélites", indica la cantidad de satélites que el receptor GPS tiene en vista. Es de gran importancia dejar en claro que el número de satélites en vista no es el número de satélites que se utilizan para la solución de posición. La razón de esto es por varias causas; las señales de algunos de estos vehículos satelitales presentan demasiado ruido, la posición geométrica no es adecuada, el ángulo de elevación es demasiado bajo, etc.

La dispersión de precisión horizontal (HDOP), dispersión de precisión vertical (VDOP) y dispersión de precisión de posición (PDOP), son los errores geométricos presentados de acuerdo a la posición de los satélites utilizados en la solución de posición. Mientras la dispersión de precisión sea más cercana a cero, el error es más pequeño y por el contrario, mientras más grande sea este, el error se incrementa. Normalmente con una dispersión de posición mayor a 6 se dice que la señal GPS ya no es confiable.

Por último el "error en metros", es la distancia presentada entre la posición adquirida por el receptor GPS y la posición real de la antena.

La actualización de la información no se sincronizo con la lectura del puerto, debido a que el receptor puede perder la señal y seguir mandando la información de la última adquisición de posición valida o simplemente puede dejar de enviarla por cualquier falla interna. Por esta razón la actualización en pantalla se controla por un temporizador en intervalos de 2 segundos.

4.3.2 Lectura E Interpretación De Datos Del Puerto Serie

El entorno de Visual Basic .NET tiene un OCX para la manipulación del puerto serie, la configuración del puerto es la misma que la utilizada para la descargar la aplicación de consulta. La figura 4-6 muestra la configuración del OCX.

La tarjeta GPS puede mandar información en cualquier momento, incluso una vez iniciada la aplicación no podemos determinar el tiempo que tardara la tarjeta GPS en fijar una posición. Debido a esto la recepción de datos no se puede establecer en un tiempo determinado, pero se puede lanzar un evento cada vez que el puerto serie reciba información.

```
SerialPort1.Open() 'se abre el puerto serie  
  
'evento lanzado al recibir datos  
AddHandler SerialPort1.DataReceived, AddressOf ReceiveSerialData
```

ReceiveSerialData es la función que se llama cada vez que se reciben datos, también es la encargada de validar la información y distribuir las diferentes sentencias NMEA a su respectivo método para poder ser interpretada y dar el respectivo formato.

Una vez iniciada la aplicación de consulta, el CPU Wireless comienza a mandar los datos por medio del puerto serie, el problema aquí es que aunque la tarjeta GPS pierda el seguimiento de los satélites por cualquier motivo, esta sigue mandando información por medio del puerto serie, en este caso los datos referentes al último momento en que se pudo realizar la solución de la posición.

Algunas de las sentencias NMEA, dentro de sus campos verifican que la señal GPS sea correcta, en este caso de utilizo la sentencia GPRMC (Checar apéndice B para más información sobre el protocolo NMEA).

La función ReceiveSerialData utiliza una bandera para la validación de la información, primero lee la primer línea de datos recibida, cuando recibe la sentencia GPRMC verifica su campo de validación de la señal GPS, si la información es correcta, la bandera es puesta en "true" o 1 y los datos son enviados a la interfaz de usuario, cuando la información es incorrecta, la bandera es puesta en "false" o "0", los datos no son enviados y la información en los cuadros de texto es puesta en cero indicando que la señal recibida al momento es invalida.

Data	
▶ (ApplicationSettings)	
Design	
(Name)	SerialPort1
GenerateMember	True
Modifiers	Friend
Misc	
BaudRate	115200
DataBits	8
DiscardNull	False
DtrEnable	True
Handshake	None
Parity	None
ParityReplace	63
PortName	COM3
ReadBufferSize	4096
ReadTimeout	-1
ReceivedBytesThres	1
RtsEnable	True
StopBits	One
WriteBufferSize	2048
WriteTimeout	-1

FIGURA 4-6 Configuración Puerto Serie

4.3.3 Conexión Con Base De Datos Y Almacenamiento De Información

Para la conexión de datos se utilizó un proveedor nativo (psqlODBC), que es un plug-in de postgresQL.

```
'Variables declaradas para la conexión a la base de datos
Dim gpsConection As Npgsql.NpgsqlConnection
Dim gpsDataAdapter As Npgsql.NpgsqlDataAdapter
Dim gpsDataSet As DataSet
Dim gps As DataTable
Dim registro As DataRow
```

El objeto de tipo “**NpgsqlConnection**” es el encargado de establecer una conexión física con una base de datos determinada. Información como la dirección IP, No de puerto, Base de datos, ID de usuario etc, es requerida.

“**NpgsqlDataAdapter**” es utilizado para establecer una comunicación entre una fuente de datos y el “**DataSet**”, utilizando como intermediario un objeto “**NpgsqlDataAdapter**” A su vez, un “**NpgsqlDataAdapter**” contiene 4 objetos:

- “**NpgsqlCommand**” es el objeto encargado de realizar los trabajos de selección de datos. En sí, es el que se encarga de devolver y rellenar los datos de una fuente de datos a un “**DataSet**”.
- “**DeleteCommand**” es el objeto encargado de realizar las acciones de borrado de datos.
- “**InsertCommand**” es el objeto encargado de realizar las acciones de inserción de datos.
- “**UpdateCommand**” es el objeto encargado de realizar las acciones de actualización de datos.

Los objetos “**DeleteCommand**”, “**InsertCommand**” y “**UpdateCommand**” son los objetos que se utilizan para manipular y transmitir datos de base de datos, al contrario del objeto “**SelectCommand**” que tan sólo interactúa con la fuente de datos para recuperar una porción o todos los datos indicados.

El objeto “**DataSet**” es una representación de datos residente en memoria que proporciona un modelo de programación relacional coherente independientemente del origen de datos que contiene. Contiene en sí, un conjunto de datos que han sido volcados desde el proveedor de datos.

Un “**DataSet**” contiene colecciones de “**DataTables**” y “**DataRelations**”. El “**DataTables**” contiene una tabla o tablas, mientras que la “**DataRelations**” contiene las relaciones entre las “**DataTables**”.

Se tuvieron algunas complicaciones debido a los formatos de datos específicos de los atributos de la base de datos, ya que tienen algunas diferencias con respecto a Visual Studio 2010. Se emplearon diferentes métodos de conversión, comenzando desde el formato del protocolo NMEA.

El tiempo de almacenamiento en la base de datos se realiza cada minuto, porque habría una cantidad inmensa de información recopilar datos cada segundo diariamente.

4.3.4 Conexión Remota

El espacio de nombres “System.Net.Sockets”, nos proporciona los métodos necesarios para mandar y recibir una cadena de bits desde un puerto.

```
'Variables encargadas de la recepción y envío de datos
Dim tcpListener As TcpListener (portNumber)
Dim tcpClient As TcpClient
Dim networkStream As NetworkStream
Dim bytes(tcpClient.ReceiveBufferSize) As Byte
Dim datoscliente As String = Encoding.ASCII.GetString(bytes)
```

El objeto “TcpListener” establece el número de puerto que permanecer “a la escucha” de una conexión remota. “TcpClient” provee una conexión cliente TCP para servicios de red haciendo uso del “TcpListener” y “NetworkStream” provee una cadena fundamental de datos para acceso a red, en este caso es utilizada para obtener la información entrante en “TcpListener”.

El número de bytes recibidos por la conexión remota no tiene un tamaño fijo, por lo tanto con el método “tcpClient.ReceiveBufferSize”, obtiene el número de bytes del tamaño del buffer recibido (Datos entrantes) y finalmente el método “Encoding.ASCII.GetString (bytes)” nos permite hacer una conversión de bytes a código ASCII.

La información recibida es almacenada en la base de datos y recibe una corrección diferencial, que será enviada de vuelta al GPS móvil. El mismo proceso de recepción de datos es invertido para este fin. La posición original y corrección diferencial, son graficada en un sistema de mapas (MapPoint).

El sistema puede recibir en cualquier momento una conexión, por lo tanto el puerto encargado de la recepción de datos debe estar a la escucha en todo momento. Si el proceso principal se encarga de esta tarea, la aplicación quedaría en stand-by hasta que se realizara una conexión. Para solucionar este inconveniente se crea un proceso en paralelo.

```
'Variables encargadas de crear un proceso en paralelo
Dim miHilo As Thread
Dim miHiloEmpieza As New ThreadStart (AddressOf mconexion)
miHilo.IsBackground = True
```

El objeto de tipo “Thread”, es el proceso que correrá en paralelo con el proceso principal y “ThreadStart” indica el método que se ejecutara una vez que el proceso empieza. El método “IsBackground” indica al proceso que se ejecute en trasfondo.

4.3.5 Calculo Del Error De Distancia Con Coordenadas Geodésicas

La distancia entre dos coordenadas geográficas de la superficie de la Tierra es la longitud del arco comprendido entre el punto P_1 y el punto P_2 . Para hacer estos cálculos se aproxima el elipsoide terrestre a la forma esférica, y se calcula el arco de círculo máximo entre ambos puntos mediante la fórmula de los cosenos de la trigonometría esférica.

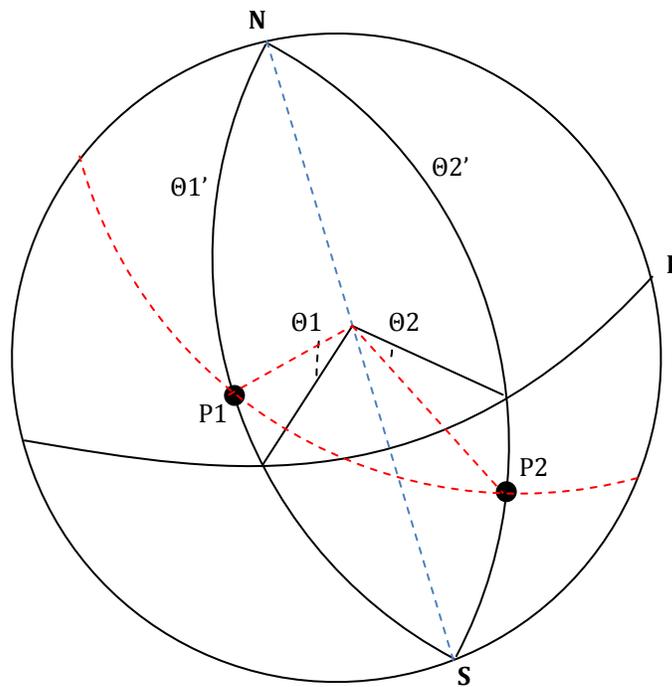


FIGURA 4-7 Distancia entre 2 puntos

Siendo “ θ ” la latitud y “ ϕ ” la longitud, se calcula la colatitud (θ') de ambos puntos con la ecuación (4-1) y el ángulo diedro “ P_1NP_2 ” con (4-2):

Ecuación 4-1

$$\theta' = 90 - \theta$$

Ecuación 4-2

$$P_1NP_2 = \phi_1 - \phi_2$$

Aplicando el teorema de cosenos (4-3) de geometría esférica se calcula la distancia entre los dos puntos a partir del arco de círculo máximo entre ambos puntos [34]:

Ecuación 4-3

$$\cos G = \cos \theta_1' \cdot \cos \theta_2' + \sin \theta_1' \cdot \sin \theta_2' \cdot \cos \phi_1 - \phi_2$$

Ecuación 4-4

$$G = \arccos \left[\cos \theta_1' \cdot \cos \theta_2' + \sin \theta_1' \cdot \sin \theta_2' \cdot \cos \phi_1 - \phi_2 \right]$$

Donde “G” es la distancia total en grados, para realizar la conversión a metros se utiliza la ecuación (4-5).

Ecuación 4-5

$$D = \frac{400750166855784861}{360} G$$

La proporción esta dada por la longitud de arco del circulo máximo del datum WGS 84 entre 360 [35].

4.3.6 Ubicación de Posición

Las posición enviadas por el GPS móvil y las correcciones diferenciales son marcadas en la distribución de mapas de Microsoft “MapPoint”, utilizando una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API).

```
'evento lanzado cada minuto para almacenar datos
Dim MYAPP As MapPointApp.Application
Dim MYMAP As MapPointApp.Map
Dim LOCATION1 As MapPointApp.Location
```

El objeto de tipo “*Application*”, contiene todos los métodos referentes a la manipulación del mapa. El objeto “*Location*”, es la encargada almacenar posiciones y “*Map*” contiene el método utilizado para señalar una ubicación.

El mapa almacena todas las posiciones enviadas por el GPS móvil, también se pueden realizar pruebas en aplicaciones vehiculares para analizar la exactitud GPS durante la ruta de navegación.

4.4 GPS MÓVIL

Hoy en día hay una gran variedad de celulares que proporcionan datos GPS, aunque en su mayoría solo es la información de latitud longitud. Esto es porque la mayoría de celulares que ofrecen servicio GPS no cuentan realmente con un Receptor interno GPS y realizan el cálculo de su posición mediante la información de la red (Se utilizan servidores de posicionamiento). Las aplicaciones desarrolladas para estos dispositivos no proporcionan ningún otro tipo de información relacionada con las señales satelitales, además de estar limitada a dispositivos que cuenten con un plan de datos y principalmente la disponibilidad de la red. Los dispositivos móviles con GPS integrado no tienen estas limitantes y proporciona toda la información necesaria para emplear el protocolo NMEA.



FIGURA 4-8 Interfaz de usuario de ExtGPS

Se utilizó un teléfono celular Nokia N8 como GPS móvil. Para la lectura, transportación e interpretación de la información proporcionada por el GPS interno se utiliza una aplicación comercial llamada “extGPS”. Esta nos permite enviar la información GPS a una computadora, mediante cable USB o Bluetooth en el formato NMEA.

La etiqueta  “Status:” indica si la información GPS está siendo compartida. 
“GPS:” muestra el estatus de las señal GPS. En la figura 4-8  indica que se esta realizando la adquisición de señales GPS, una vez realizado el seguimiento de los satélites el indicador “Searching” cambia a “Satellite Fix NMEA-0183”. Las etiquetas 
“Bluetooth” y  “USB” muestra el medio en el que son compartidos los datos GPS.

4.5 DISEÑO DE PROGRAMA PARA GPS MOVIL

El programa diseñado para el GPS Móvil, se encarga de leer eh interpretar la información del formato NMEA proporcionada por el dispositivo móvil, crear un enlace de datos con el GPS Servidor para mandar su posición y recibir una corrección diferencial, además de una interfaz de usuario que muestre en tiempo real la información de todos los satélites en vista.

4.5.1 Diseño De Interfaz De Usuario

La interfaz de usuario de GPS Móvil tiene casillas similares a las de GPS Servidor, por lo tanto estas no serán explicadas.

Se implementaron 48 casillas para visualizar en tiempo real toda la información de hasta 12 satélites en vista por el receptor. Por cada satélite se diseñaron introdujeron 4 casillas, “PRN De Satélite”, “Angulo”, “Azimut” y “SNR”. La casilla “Satélites Utilizados para la Adquisición de Datos”, como su nombre lo indica, muestra el numero PRN de los satélites empleados en la solución de posición.

La información de “Posición de Corrección Diferencial”, muestra la posición del GPS Móvil después de recibir la corrección de error del GPS Servidor. El botón “Corrección Diferencial” invoca al método encargado de establecer la conexión al GPS referenciado.



FIGURA 4-9 Interfaz de usuario para GPS Movil

4.5.2 Lectura del Puerto Serie

Anteriormente se mencionó que la aplicación “ExtGPS” comparte la información por Bluetooth y cable USB. Para esta aplicación se utilizó el cable USB debido a la velocidad de transferencia e integridad de la información. La propia aplicación genera un puerto serie virtual en el que se envían los datos GPS en formato NMEA. Por lo tanto el procedimiento de lectura para el puerto serie es el mismo que el empleado en el GPS Servidor, salvo algunas pequeñas validaciones adicionales que se tuvieron que agregar.

En algunas ocasiones la aplicación “ExtGPS” manda información repetida, a causa de la saturación de memoria del sistema operativo del teléfono (Symbian Anna). Esto causa

un conflicto en el GPS Servidor cuando se envía la información para corrección diferencial. Al momento de almacenar los datos se crea una violación de restricción (Llave primaria) por la información repetida. Para solucionar este inconveniente se creó una condición que validara que la información no es repetida, antes de ser enviada.

4.5.3 Conexión Remota Del GPS Móvil

La aplicación del GPS Móvil emplea un método similar al del GPS Servidor para el envío de la información. En el GPS Servidor es necesario contar con un proceso en paralelo para que este a la “escucha” de cualquier conexión entrante. En este programa no fue necesario, debido a que el proceso se crea en el momento de pedir una corrección diferencial (Evento generado al presionar el botón de “Corrección Diferencial”).

El programa GPS Móvil envía una trama completa NMEA anteponiendo la palabra “GPS:”, esta es una manera en que el programa GPS Servidor verifica que los datos son confiables. Cualquier conexión entrante que no contenga esta palabra en el principio de su mensaje, es descartada. Por su parte el GPS Servidor también emplea esta validación al momento de contestar con la corrección diferencial.

4.6 PRUEBAS Y RESULTADOS

Se realizaron varias pruebas principalmente en el área de Zacatenco. Debido a la cantidad de información recolectada solo se muestran las ubicaciones más significantes y que arrojaron un mayor análisis de estudio en los efectos multitrayectoria.

La tabla 4-4 muestra once ubicaciones, con su posición real, la calculada por el GPS móvil y la resultante de la corrección diferencial. La tabla 4.5 muestra el error en metros entre la distancia calculada por el GPS Móvil y la corregida por el GPS Servidor.

Tabla 4-4 Posiciones obtenidas

Posición	Latitud Verdadera	Longitud Verdadera	Latitud Calculada	Longitud Calculada	Latitud Corregida	Longitud Corregida
1	19.502689	-99.147048	19.502805	-99.147167	19.502789	-99.147111
2	19.504129	-99.139409	19.504389	-99.139088	19.504373	-99.309032
3	19.495309	-99.138028	19.495351	-99.137960	19.495335	-99.137904
4	19.495057	-99.136215	19.494971	-99.136400	19.494955	-99.136344
5	19.492721	-99.142569	19.492914	-99.142650	19.492898	-99.142594
6	19.464946	-99.137196	19.465198	-99.135577	19.465182	-99.135521
7	19.498554	-99.136283	19.498559	-99.136025	19.498543	-99.135969
8	19.498013	-99.134536	19.503892	-99.137495	19.503875	-99.137474
9	19.499306	-99.134404	19.49983	-99.136262	19.499813	-99.136241
10	19.499827	-99.134879	19.498637	-99.136287	19.49862	-99.136266
11	19.503888	-99.136035	19.503883	-99.136015	19.503866	-99.135994

Tabla 4-5 Error de distancia

Posición	Error del GPS	Error del GPS con corrección diferencial
1	18.332	13.091
2	45.486	49.357
3	8.792	13.882
4	22.40	18.123
5	23.244	19.892
6	180.372	186.203
7	28.239	34.383
8	730.109	727.396
9	211.490	208.763
10	203.182	202.695
11	2.256	5.107

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se presenta una nueva metodología para la corrección del margen de error de posición de los sistemas GPS utilizando la información del protocolo NMEA y el concepto DGPS. Las pruebas fueron realizadas a diferentes horas del día y condiciones atmosféricas. Los entornos en las que se implementaron fueron muy variados, pero principalmente en vías públicas donde los efectos multitrayectoria tienen una gran relevancia. Las correcciones diferenciales fueron realizadas en tiempo real y almacenadas en la base de datos para su posterior análisis.

A continuación se presentan las problemáticas que fueron tratadas para el desarrollo de este trabajo:

- Fue necesario documentarse sobre procesos en paralelo en Visual Basic .NET, ya que el Programa de la estación de referencia necesita emplear 2 procesos en paralelo, uno para lectura y almacenamiento de la información, y otro para el control de las conexiones entrantes.
- Fueron necesarias bastantes conversiones de variables, debido a la diferencia entre variables de tipo de la base de datos y Visual Basic .NET, y los formatos del protocolo NMEA y Visual Basic .NET.
- Cuando el GPS del dispositivo móvil perdía el seguimiento de los satélites continuaba mandando la información del último punto donde la señal fue válida. Esto aparte de ser información incorrecta, creaba un conflicto en la base de datos por la repetición de datos en la clave primaria. Se buscó una solución a nivel de programación para bloquear la información repetida.

- Casi todas las aplicaciones GPS para celular, solo obtienen y comparten la Latitud y Longitud. La información de las señales de los satélites está dada en la sentencia GSV del protocolo NMEA, el GPS móvil no entrega por si solo esta información a la computadora, fue necesario buscar alguna aplicación de Symbian^3 (Sistema Operativo del celular) que pudiera obtenerla y pudiera compartirla.
- En ocasiones la banda ancha de telcel perdía la conexión a internet, principalmente en pruebas a alta velocidad (pruebas vehiculares).

Todas las pruebas fueron hechas al aire libre pero en un medio urbano por esta razón los resultados obtenidos muestran una gran diferencia en distancia sobre el error de posición a causa de los diferentes niveles del efecto multitrayectoria. En lugares relativamente libres de obstáculos cercanos (Bajo efecto multitrayectoria), los resultados del margen del error son de entre 5 y 50 metros, en cambio las pruebas entre edificios y debajo de puentes vehiculares, mostraron resultados entre los 100 y más de 500 metros.

Las mediciones de error en la estación de referencia realizan correcciones de entre 5 y 15 metros. Estas correcciones en su gran mayoría ayudan en la corrección de posición del GPS, pero se presentaron algunas ocasiones en que el error aumento. Esto sucede cuando los efectos multitrayectoria generan un desplazamiento de la posición verdadera en la misma dirección que la corrección diferencial y por lo tanto el margen de error aumenta.

El análisis de señales de los satélites pudieron determinar los siguientes puntos:

1. En casi todas las pruebas el nivel SNR de los satélites es mejor en el GPS Servidor que en el GPS Móvil, debido a una línea de visión sin obstáculos.
2. Las señales que no cumplían el punto anterior presentan el efecto sombra, el cual aumenta la potencia de la señal.
3. La mayoría de veces el GPS Móvil no ocupa los mismos satélites que el GPS Servidor para la solución de su posición, debido a la detección de los efectos multitrayectoria. Esto pudo ser determinado al graficar la posición y analizar su línea de visión mediante el ángulo de elevación y su azimut.
4. Las señales que fueron empleadas por el GPS Móvil para la solución de su posición, con una diferencia de SNR mayor a 20 con respecto al GPS Servidor presentan efectos multitrayectoria, debido a los obstáculos en la línea de visión.

Las señales con efecto sombra son fáciles de detectar en este modelo y para los efectos multitrayectoria tendría que establecerse una relación distancia SNR para determinar cuando la SNR es baja por un efecto multitrayectoria o a causa de la distancia con respecto al satélites. La exclusión del efecto sombra y multitrayectoria en el cálculo de solución de posición debe arrojar una mayor exactitud, lamentablemente este último calculo no pudo llevarse a cabo. Los GPS comerciales actuales solo entregan la información del protocolo NMEA, la información del mensaje de navegación no es compartida y por lo tanto la ubicación de los satélites, necesario para el cálculo de posición.

5.2 TRABAJOS A FUTURO

Actualmente hay diversas investigaciones en torno a la mitigación y manejo de los efectos multitrayectoria. De acuerdo a las problemáticas presentadas en este trabajo se proponen los siguientes puntos para futuras investigaciones:

- Diseño de un receptor GPS para el acceso a la información del mensaje de navegación.
- Realizar pruebas con corrección DGPS en la portadora de fase.
- Implementación de INS en dispositivos Móviles.
- Desarrollar nuevas metodologías para la solución de la ambigüedad entera de ciclos en la portadora para RTK.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

Almanaque: Versión simplificada de las efemérides, permite calcular las coordenadas de los satélites en forma aproximada; su validez es de seis meses, aunque es recomendable su actualización semanal.

Datum: Descripción matemática de la Tierra. Típicamente se define como un elipsoide de revolución, con sus dos radios (ecuatorial y polar), o su radio ecuatorial y el nivel de "achatamiento". Existen diferentes datum en todo el mundo, dependiendo de la zona geográfica. El "datum" actual, más moderno y universal para el GPS es el WGS-84 (equivalente al NAD 83 norteamericano).

DGPS (*Differential GPS*): Modelo de corrección de los sistemas GPS. Se emplea un mínimo de 2 receptores GPS. Uno actúa como estación de referencia midiendo constantemente el error GPS en la zona. El segundo GPS utiliza este error para corregir su posición.

DOP (*Dilution of Precision*): Es una medida de la dilución de imprecisión, está derivada de la geometría de los satélites respecto al receptor GPS. Dado que sus órbitas son conocidas (almanaque), existen algoritmos para calcular las diferentes DOP, tanto en tiempo real como con antelación.

DR (*Dead Reckoning*): Es la técnica utilizada para el cálculo de la posición actual implementando las posiciones anteriores calculadas.

ECEF (*Earth-Centered Earth-Fixed*): Sistema de coordenadas fijo centrado en la tierra, utilizado por el GPS para calcular la posición del usuario. Plano "X", "Y" paralelo al ecuador. Eje "X" fijado en la dirección longitud 0° , "Y" en la longitud 90° este. El eje "Z" apunta al polo norte geográfico, de manera que es normal al ecuador.

ECI (*Earth-Centered Inertial*): Sistema de coordenadas inercial, utilizado por el GPS para describir con mayor facilidad la posición de los satélites. El eje "X" es fijado en dirección de un astro celeste, el eje "Z" al polo norte geográfico, y el eje "Y" es fijado de tal manera de formar un sistema de mano derecha.

EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*): Es un servicio de DGPS de área amplia empleado en Europa. Transmite las correcciones diferenciales vía SBAS.

Efemérides: Conjunto de parámetros que permiten calcular la órbita de cada satélite y su posición dentro de la misma (coordenadas). Esta información cambia frecuentemente, es actualizada por las estaciones de Control Maestro. Los parámetros orbitales son actualizados aproximadamente cada 4 horas.

Elipsoide de Revolución: Modelo matemático de la superficie terrestre, correspondiente a un "datum" determinado.

Exactitud: Capacidad de un instrumento para medir un valor lo más aproximado posible al valor de la magnitud real.

GDOP (*Geometric Dilution of Precision*): Es la dilución de precisión geométrica, constituida por cuatro componentes: tiempo, posición horizontal, posición vertical y posición tridimensional.

Geoide: Modelo físico de la tierra.

GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*): Nombre generalizado a cualquier sistema de navegación usando satélites.

HDOP (*Horizontal Dilution of Precision*): La dilución de precisión horizontal, es la componente de error geométrico horizontal.

INS (*Inertial Navigation System*): El sistema de navegación inercial ayuda a predecir el movimiento de un vehículo con la ayuda de sensores de movimiento y sensores de rotación.

MSAS (*Multi-Functional Satellite Augmentation System*): Es un servicio de DGPS de área amplia empleado en Asia (principalmente Japón). Transmite las correcciones diferenciales vía SBAS.

Multitrayectoria: Error generado en los GPS a causa de la reflexión de las señales antes de llegar al receptor.

NMEA (*National Marine Electronics Association*): Datos específicos de comunicación entre dispositivos electrónicos marinos. Este es el protocolo adoptado por el GPS para que el receptor comunique al usuario o alguna aplicación su posición y una serie de datos adicionales.

PDOP (*Position Dilution of Precision*): La dispersión de precisión de posición es la imprecisión tridimensional.

PPS (*Precise Positioning Service*): Es el servicio de mayor precisión proporcionado por el GPS, exclusivo para uso militar.

Precisión: Es la capacidad de un instrumento de calcular la misma posición en diferentes condiciones.

PRN (*Pseudo Random Noise*): Código pseudo aleatorio utilizado por cada satélite del GPS para que el receptor pueda calcular la distancia entre estos. Cada satélite utiliza un código PRN diferente, cada uno de estos presenta una baja correlación entre ellos.

RTK (*Real Time Kinematic*): Son las técnicas DGPS utilizadas para resolver la ambigüedad de ciclo entero en tiempo real.

SA (*Selective Availability*): Mecanismo por medio del cual EE.UU. añade errores en las referencias enviadas por los satélites, con el fin de disminuir la precisión del sistema. Actualmente está desactivado.

SBAS (*Satellite Based Augmentation System*): Es un sistema DGPS que utiliza satélites Geoestacionarios para transmitir las correcciones diferenciales.

Pseudodistancia: Distancia calculada entre el receptor GPS y un satélite con la influencia de los errores asociados a todo el sistema.

SPS (*Standard Positioning System*): Es el servicio estándar proporcionado por el GPS para uso civil.

TDOP (*Time Dilution of Precision*): Dilución de precisión en el tiempo.

UART (*Universal Asynchronous Receiver-Transmitter*): Comunicación por puerto serie.

UTC (*Coordinated Universal Time*): Es el tiempo de la zona horaria de referencia de todo el mundo

VDOP (*Vertical Dilution of Precision*): La dilución de precisión vertical es la componente de error geométrico vertical.

WAAS (*Wide Are Augmentation System*): Es un servicio de DGPS de área amplia empleado en USA. Transmite las correcciones diferenciales vía SBAS.

APENDICE A

SISTEMA DE COORDENADAS REFERENCIADO

Para poder obtener una posición, tiene que existir un sistema coordenado de referencia. El GPS utiliza 2 principales sistemas coordenados, el inercial y el rotacional.

A.1. SISTEMA DE COORDENADAS INERCIAL CENTRADO EN LA TIERRA

Para la determinación de orbitas de los satélites es más conveniente usar un sistema coordenado inercial centrado en la tierra (Earth-centered inertial, ECI). El origen de este sistema se encuentra en el centro de la masa terrestre y los ejes apuntan en direcciones fijas con respecto a las estrellas. En la mayoría de los sistemas coordenados ECI, el plano "XY" coincide con el plano ecuatorial, el eje "X" es fijado de forma permanente con respecto alguna esfera celeste, el eje "Z" es la normal con respecto al plano "XY" en dirección al polo norte, finalmente el eje "Y" es elegido a manera de formar un sistema de coordenadas de mano derecha.

Un problema con este sistema es que puede no ser completamente inercial debido a las irregularidades del movimiento de la tierra. La forma de la tierra es irregular y debido en gran parte a la fuerza de atracción del sol y la luna sobre el abultamiento ecuatorial de la tierra, el plano ecuatorial se mueve con respecto a la esfera celeste. En el sistema ECI, el eje "X" se define con respecto a la esfera celeste y el eje "Z" se define en base al plano ecuatorial, por esta razón, las irregularidades del movimiento de la tierra podrían causar que el sistema ECI no sea del todo inercial.

Para solucionar el problema anterior se decidió fijar la dirección de los ejes en un determinado tiempo o época. El sistema ECI utiliza la orientación del plano ecuatorial a las 12:00 del 1 de enero del 2000 del tiempo universal coordinado (UTC). El eje "X" se define en dirección del equinoccio de primavera y los ejes "Y" y "Z" como se definieron anteriormente, de esta manera el sistema ECI es inercial.

A.2. SISTEMA DE COORDENADAS ESTÁTICO CENTRADO EN LA TIERRA

Cuando se trata de calcular la posición de un receptor GPS, se obtienen mejor resultados utilizando un sistema coordenado que gire con la tierra, conocido también como centrado en tierra, sistema de tierra fija (ECEF, Earth-Centered Earth-Fixed).

Al igual que el sistema ECI, el sistema ECEF utiliza un plano ecuatorial que coincide con el plano "X, Y", pero a diferencia de ECI, el eje "X" apunta en la dirección de la longitud 0° , el eje "Y" en la dirección longitud este de 90° y finalmente el eje "Z" es escogido de manera que sea normal al plano ecuatorial en dirección al polo norte. De esta manera los ejes "X", "Y" y "Z" giran con la tierra y ya no señalan direcciones fijas hacia el espacio. El software GPS se encarga del cálculo de orbitas satelitales, así como la transformación entre el sistema ECI y ECEF [21]. Varios centros se encargan de calcular orbitas precisas, posición GPS y la velocidad de ECEF. A no ser por el efecto SAGNAC sobre la señal de propagación rotacional en el sistema ECEF, se podría proceder a formular el problema de la navegación GPS en ECEF sin entrar en los detalles de la determinación de orbitas y transformación del sistema ECI a ECEF [22].

La obtención de la posición del receptor se hace mediante el sistema ECEF, una vez hecho el cálculo (x, y, z), estas son transformadas en latitud, longitud y altitud, sin embargo para lograr esta transformación es necesario un modelo físico de la tierra.

A.3. SISTEMA GEODESICO MUNDIAL

El modelo físico de la tierra utilizado para aplicaciones GPS es el Sistema Geodésico Mundial de 1984 (WGS 84, World Geodetic System of 1984) desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos de América [23]. Una parte de WGS84 es un modelo detallado de las irregularidades gravitacionales de la tierra, este modelo es esencial para poder obtener una gran precisión en las efemérides.

WGS84 cuenta con un modelo elipsoidal de la tierra, en este modelo las secciones transversales de la tierra paralelas al plano ecuatorial son circulares y las perpendiculares elipsoidales.

Se han realizado cuatro ediciones de WGS84. La última edición es muy parecida al Marco de Referencia Internacional Terrestre (ITRF International Terrestrial Reference Frame), administrado por la Asociación Internacional de Geodesia y la diferencia entre estos es menor a 1 cm.

APENDICE B

PROTOCOLO NMEA

El protocolo NMEA no solo es utilizado por los sistemas de navegación satelital, todos los instrumentos marítimos utilizan este protocolo y contiene una gran variedad de sentencias. Para fines de este trabajo solo se describirán las sentencias entregadas por el GPS utilizado.

- \$GPGLL Posición geografica, Latitud/Longitud
- \$GPGSV Datos de satélites GPS en vista
- \$GPZDA Tiempo y Fecha UTC
- \$GPGGA Datos de posición del sistema de posicionamiento global
- \$GPVTG Orientación sobre la tierra y velocidad
- \$GPGS GPS DOP (Dispersión de precisión) y satélites activos
- \$GPRMC Datos especificos minimos recomendados GNSS GPS/TRANSIT

B.1. GLL (Posición geografica LATITUD Y LONGITUD)

\$GPGLL,III.II,E,yyyy.yy,F,hhmmss.ss,A*hh

- III.II: Latitud.
- E: N o S (para latitud).
- yyyy.yy: Longitud.
- F: E o W (para longitud).
- hhmmss.ss: UTC de posicon fijada (tiempo).
- A: Estatus de datos (A = Validos, V = Invalidos).
- *hh: Checksum.

B.2. GSV (Datos de satélites en vista)

\$GPGSV,A,B,C,D1,E1,Az1,SNR1,D2,E2,Az2,SNR2,D3,E3,A,z3,SNR3,D4,E4,Az4,SNR4*hh

- A: Numero de mensajes requeridos para mostrar los datos de todos los vehiculos satelitales en vista.
- B: Numero de mensaje.

- C: Numero total de satélites en vista.
- D1-D4: Numero PRN del satélite.
- E1-E4: Elevación en grados (Maximo 90).
- Az1-Az4: Azimut (medido en grados desde el norte verdadero, de 0 a 359).
- SNR1-SNR4: Relación señal a ruido (Mientras mayor sea el numero, mejor será la señal).
- *hh: Checksum.

B.3. ZDA (Fecha y Tiempo)

\$GPZDA,hhmmss.ss,dd,mm,yyyy,xx,yy,*hh

- hhmmss.ss: UTC de posicon fijada (tiempo).
- dd: Dia.
- mm: Mes.
- yyyy: Año.
- xx: Hora local de la zona (-13 a 13).
- yy: Minutos locales de la zona (0 a 59).
- *hh: Checksum.

B.4. GGA (Datos fijados del SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL)

\$GPGGA,hhmmss.ss,IIII.II,E,yyyyy.yy,F,A,bb,x.x,y.y,z.z,s.s,####,*hh

- hhmmss.ss: UTC de posicon fijada (tiempo).
- IIII.II: Latitud.
- E: N o S (para latitud).
- yyyyy.yy: Longitud.
- F: E o W (para longitud).
- A: Calidad del posicionamiento
 - 0 = Invalida.
 - 1 = Posicionamiento GPS (SPS).
 - 2 = Posicionamiento DGPS.
 - 3 = Posicionamiento PPS.
 - 4 = Cinematica en tiempo real.
 - 5 = RTK Flotante.
 - 6 = Estimación (dead reckoning)
 - 7 = Modo de entrada manual

- 8 = Modo simulación
- bb: Numero de satélites en uso.
- x.x: Error horizontal (precisión).
- y.y: Altura de la antena en metros.
- z.z: Altura del geoide (sobre el nivel del mar) en metros.
- s.s: Tiempo en segundos desde la ultima actualización.
- ####: ID de la estación DGPS
- *hh: Checksum.

B.5. VTG (Rumbo sobre la tierra y velocidad)

\$GPVTG,COG,T,COG,M,SOG,N,SOG,K,A*hh

- COG,T: Rumbo sobre la tierra (T = Verdadero).
- COG,M: Rumbo sobre la tierra (M = magnetico).
- SOG,N: Velocidad (N= Nudos).
- SOG,K: Velocidad (K = km/h).
- M: Indicador de modo.
 - A = Autonomo.
 - D = Diferencial.
 - E = Estimación (Dead reckoning).
 - N = Ninguno.
- yy: Minutos locales de la zona (0 a 59).
- *hh: Checksum.

B.6. GSA (GNSS DOP - Dispersion de precisión y satélites activos)

\$GPGSA,OM,NM,D1-D12,PDOP, HDOP, VDOP*hh

- OM: Modo de operación.
 - Forzado manualmente a operar en 2D o 3D.
 - Automatico 2D/3D
- NM: Modo de navegación.
 - Posición no disponible.
 - 2D.
 - 3D.
- D1-D12: Vehiculos satelitales utilizados en la solución de la posición
- PDOP: Dispersion de precisión de posición.

- HDOP: Dispersion de precisión horizontal.
- VDOP: Dispersion de precisión vertical.
- *hh: Checksum.

B.7. RMC (Datos específicos mínimos recomendados)

\$GPRMC,hhmmss.ss,A,III.II,E,yyyy.yy,F,SOG,COG,ddmmyy,MV,F,M*hh

- hhmmss.ss: UTC de posición fijada (tiempo).
- A: Estatus de datos (A = Válidos, V = Inválidos).
- III.II: Latitud.
- E: N o S (para latitud).
- yyyy.yy: Longitud.
- F: E o W (para longitud).
- SOG: Velocidad (N= Nudos).
- COG: Rumbo sobre la tierra (Grados).
- ddmmyy: Fecha coordinada.
- MV: Variación magnética (Grados).
- F: Dirección de variación magnética Este u Oeste.
- M: Indicador de modo.
 - A = Autónomo.
 - D = Diferencial.
 - E = Estimación (Dead reckoning).
 - N = Ninguno.
- *hh: Checksum.

REFERENCIAS

- [1] Parkinson, B., "A History of Satellite Navigation," *NAVIGATION: Journal of The Institute of Navigation*, Vol. 42, No. 1, Spring 1995, pp. 109–164.
- [2] "Global View," *GPS World Magazine*, February 2002, p. 10.
- [3] European Union Fact Sheet, "EU-US Co-Operation on Satellite Navigation Systems Agreement Between Galileo and the Global Positioning System (GPS)," June 2004.
- [4] Federal Space Agency for the Russian Federation, "GLONASS: Status and Perspectives," *Munich Satellite Navigation Summit 2005*, Munich, Germany, March 9, 2005.
- [5] "CTC—Civilian Service Provider BeiDou Navigation System" and associated Web sites in English, China Top Communications Web site, <http://www.chinatopcom.com/english/gsii.htm>, September 8, 2003.
- [6] Bate, R., et al., *Fundamentals of Astrodynamics*, New York: Dover Publications, 1971.
- [7] Brown, K., et al., "L-Band Anomaly Detection in GPS," *Proc. of the 51st Annual Meeting, Inst. of Navigation*, Washington, D.C., 1995.
- [8] Hay, C., and J. Wong, "Improved Tropospheric Delay Estimation at the Master Control Station," *GPS World*, July 2000, pp. 56–62.
- [9] Mendicki, P., "GPS Ground Station Coverage—Visibility Gap Analysis," Aerospace Corporation, October 2002, unpublished.
- [10] Seeber, G., *Satellite Geodesy: Foundations, Methods, and Applications*, New York: Walter De Gruyter, 1993.
- [11] Langley, R., "Time, Clocks, and GPS," *GPS World Magazine*, Advanstar Communications, November–December 1991, pp. 38–42.
- [12] Parker, T., and D. Mataskis, "Time and Frequency Dissemination Advances in GPS Transfer Techniques," *GPS World Magazine*, Advanstar Communications, November 2004, pp. 32–38.
- [13] Parsons, J. D., *The Mobile Radio Propagation Channel*, 2nd ed., New York: John Wiley and Sons, 2000.
- [14] Fante, R. L., and J. J. Vaccaro, "Multipath and Reduction of Multipath-Induced Bias on GPS Time-of-Arrival," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 39, No. 3, July 2003.
- [15] Jorgensen, P. S., "An Assessment of Ionospheric Effects on the User," *NAVIGATION: Journal of the Institute of Navigation*, Vol. 36, No. 2, Summer 1989.

-
- [16] Olynik, M., et al., "Temporal Variability of GPS Error Sources and Their Effect on Relative Positioning Accuracy," *Proc. of The Institute of Navigation National Technical Meeting*, January 2002.
- [17] Hofmann-Wellenhof, B., H. Lichtenegger, and J. Collins, *GPS Theory and Practice*, New York: Springer-Verlag, 1993.
- [18] van Graas, F., and M. Braasch, "Selective Availability," in *Global Positioning System: Theory and Applications, Volume I*, B. Parkinson, and J. J. Spilker, Jr., (eds.), American Institute of Aeronautics and Astronautics, Washington, D.C., 1996.
- [19] Lapucha, D., and M. Huff, "Multi-Site Real-Time DGPS System Using Starfix Link: Operational Results," *ION GPS-92*, Albuquerque, NM, September 16–18, 1992.
- [20] Ashkenazi, V., C. J. Hill, and J. Nagle, "Wide Area Differential GPS: A Performance Study," *Proc. of the Fifth International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GPS-92)*, Albuquerque, NM, September 16–18, 1992, pp. 589–598.
- [21] GPS Navstar Joint Program Office, *Navstar GPS Space Segment/Navigation User Interfaces, IS-GPS-200*, Revision D, GPS Navstar Joint Program Office, El Segundo, CA, December 7, 2004
- [22] Long, A. C., et al., (eds.), *Goddard Trajectory Determination System (GTDS) Mathematical Theory*, Revision 1, FDD/552-89/001, Greenbelt, MD: Goddard Space Flight Center.
- [23] National Imagery and Mapping Agency, Department of Defense, *World Geodetic System 1984 (WGS 84): Its Definition and Relationships with Local Geodetic Systems*, NIMA TR8350.2, 3rd ed., Bethesda, MD: National Imagery and Mapping Agency, January 2000.
- [24] Gregory Bishop, Andrew Mazzella, Elizabeth Holland and Susan Rao "Algorithms that Use the Ionosphere to Control GPS Errors" 0-78033085-4/96 1996 IEEE.
- [25] Ahmed El-Rabbany "An Autonomous GPS carrier-phased-based System for Precisión Navigation", Proceedings of the IEEE ITSC 2006 2006 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Toronto, Canada, September 17-20, 2006.
- [26] Mosavi, M. R. "Evolutionary Algorithms Approach for Errors High-Precisión Modeling in Single-Frequency GPS Receivers" *international Journal of Geoinformatics*. Vol. 6, No. 2, June. 2010 ISSN 1686-6576 ' O Ucoinlomatics Intcmalional.
- [27] M. R. Mosavi "Increasing of DGPS Accuracy Using Recurrent Neuronal Networks" 0-7803-8406-7/04 2004 IEEE.
- [28] Renato Filjar, Tomislav Kos and Ivan Markezic "GPS Ionospheric Error Correction Models", 48th International Symposium ELMAR-2006, 07-09 June 2006, Zadar, Croatia.

- [29] Keith A. Redmill, Takeshi Kitajima and Omit Ozguner, "DGPS/INS Integrated Positioning for Control of Automated Vehicle", 2001 IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proceedings – Oakland (CA), USA – August 25-29, 2001.
- [30] Han-Shue Tan and Jihua Huang, "DGPS/INS-Based Vehicule Positioning with Novel DGPS Noise Processing", Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minesota, USA, June 14-16, 2006.
- [31] Jie Du and Mathew J. Barth, "Next-Generation Automated Vehicle Location Systems: Positioning at the Lane Level", IEEE Transactions on Intelligent Transportations Systems, Vol.9, No.1 MARCH 2009.
- [32] X. Meng, L. Yang, J. Aponte, C. Hill, T. Moore and A. H. Dodson, "Development of Satellital Based Positioning and Navegation Facilities for Precise ITS Applications", Proceedings of the 11th International IEEE, Conference on Intelligent Transportation Systems, Beijing, China, October 12-15, 2008.
- [33] Samsung Lim, Chris Rizos and Tajul Musa, "Application of Running Average Function to Non-Dispersive Errors of Network-Based Real-Time Kinematic Positioning", Journal of Global Positioning Systems.
- [34] Alfred Leick, "Geometric Geodesic ", 1980 Lecture Notes in Surveying Engineering, University of Maine at Orono, 107 Boardman Hall Orono, Maine 04469.
- [35] Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty, "Understanding GPS, Principles and Applications", 2006 ARTECH HOUSE, INC. 685, Canton Street, Norwood, MA 02062.