



**UNIVERSIDAD AUTONOMA DEL
ESTADO DE HIDALGO**

INSTITUTO DE CIENCIAS
BASICAS E INGENIERIA

**GPS
GLOBAL POSITIONING SYSTEM
SISTEMAS DE POSICIONAMIENTO GLOBAL**

MONOGRAFÍA
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES

PRESENTA:
JAYRO NOEL GARCÍA PÉREZ

ASESOR:
M. EN C. EVA JEANINE LEZAMA ESTRADA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por concederme siempre mis sueños!!! Por darme la vida y el aliento para salir adelante cuando me encontré en dificultades. Te necesito para lograr todas mis metas.

A mi padre por enseñarme que puedo llegar tan lejos como yo quiera.

A mi madre por estar apoyando a mi padre para darme todo lo que necesite.

Son los pilares en mi formación personal y profesional y porque siempre estarán ahí para apoyarme, amigos incondicionales, los amo!!

A Josué y Elizabeth, porque a pesar de ser menores que yo me han enseñado cosas tan valiosas en la vida y porque siempre me han dado lo mejor de ustedes, los adoro niños.

A ti, la musa de mis sueños e ilusiones, que me has dado parte de tu vida y que te has convertido en una persona tan valiosa e indispensable para mí, que siempre me alentaste para lograr esto, que me ayudaste cuando te necesite y que siempre estuviste al tanto de mí y de mis logros, te amo Lilitiana.

A mis amigos que son pocos pero muy importantes de quienes aprendí mucho, que siempre estarán ahí cuando los necesite, cuenten también conmigo.

A mi asesora M. en C Eva Jeanine, por su tiempo y dedicación a este trabajo, quien también fue mi maestra, una persona culta e inteligente, que sabe transmitir conocimientos académicos y no académicos, entre ellos como apreciar la vida y verla siempre con alegría, la admiro, gracias por todo

Al Ing. Rosas e Ing. Sandra Luz, mis sinodales quienes aportaron a mi formación profesional, porque fueron grandes profesores, los considero buenos amigos ya que siempre me trataron muy bien, gracias por brindarme su valioso tiempo y amistad.

Al M. en C. Elías, Ing. Arumir, Lic. Ángel e Ing. Juan Manuel por su cooperación en este documento, aprecio sus atenciones, mi respeto hacia ustedes, gracias.

A mi magnífica y querida UNIVERSIDAD AUTONOMA DE HIDALGO, por albergarme gran parte de mi vida, quien me forjo y me enseñó también a amar, hoy me siento orgulloso de ser parte de tí.

GRACIAS!!!

Todo lo que hagas no importa que, hazlo con amor y alegría y nunca existirá un no puedo o un obstáculo, recuerda que lo que un humano puede hacer, otro también lo puede hacer, el único problema es que no sabe que puede!!

Se constante y fiel a tí mismo, y tan seguro como que hay estrellas en el cielo, que llegaras a tiempo a la verdadera meta de la vida.

Herman Hitz.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	I
OBJETIVO.	III
JUSTIFICACIÓN.	IV
CAPÍTULO 1. FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN SATÉLITE...	1
1.1 Sistemas de Propulsión.....	2
1.2 Subsistema de Control.....	3
1.3 Subsistema de Energía.....	3
1.4 Sistema de Telemetría.....	4
1.5 Sistema de Telemando.....	4
1.6 Subsistema de Control Térmico.....	5
1.7 Designación de frecuencias.....	5
1.8 Modelos de enlace satelital.....	8
1.8.1 Modelo de subida.....	8
1.8.2 Transponder.....	9
1.8.3 Modelo de bajada.....	10
1.9 Las órbitas de los satélites.....	11
1.9.1 Tipos de orbitas de los satélites.....	12
1.9.1.1 Orbita satelital LEO.....	13
1.9.1.2 Orbita satelital MEO.....	14
1.9.1.3 Orbita satelital GEO.....	14
1.9.1.3.1 Parámetros típicos de la orbita geoestacionaria.....	17
1.9.2 Patrones orbitales.....	19
1.9.2.1 Latitud-Longitud.....	21
1.9.2.2 Ángulos de vista.....	22
1.9.2.3 Ángulo de elevación.....	22
1.9.2.4 Azimut.....	24
1.10 Constitución de un sistema de satélites.....	25
CAPÍTULO 2. RESEÑA GPS.....	32
2.1 ¿Dónde esta?.....	32
2.2 Tiempo y posición, con precisión.....	34
2.3 Comenzó con una investigación básica.....	37
2.4 Una herramienta para estudiar la naturaleza.....	40
2.5 El reloj de Rabi.....	41
2.6 Aplicaciones prácticas.....	42
2.7 GPS y el futuro.....	45
2.8 Cronología.....	46

CAPÍTULO 3 COMO FUNCIONA GPS.....	48
3.1 Triangulación desde los satélites.....	48
3.2 Midiendo las distancias a los satélites.....	50
3.2.1 Descripción lógica del método.....	51
3.2.2 Sincronizando nuestros relojes.....	59
3.2.3 Código aleatorio.....	60
3.3 Control perfecto del tiempo.....	62
3.3.1 Una medición adicional remedia el desfasaje del timing.....	63
3.4 Conocer donde están los satélites en el espacio.....	64
3.4.1 Control.....	65
3.4.2 Corrigiendo el mensaje.....	66
3.5 Corrigiendo errores.....	67
3.5.1 Un difícil viaje a través de la atmósfera.....	67
3.5.2 Un difícil viaje a través de la tierra.....	68
3.5.3 Problemas en el satélite.....	69
3.5.4 Algunos ángulos son mejores que otros.....	69
3.5.5 Errores intencionales.....	70
CONCLUSIONES	71
GLOSARIO	72
BIBLIOGRAFÍA	74
BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA	75

ÍNDICE DE FIGURAS.

	Pág.
CAPÍTULO 1	
Figura 1.1 Estructuras del satélite.....	2
Figura 1.2 Subsistemas de control de orientación y propulsión.....	3
Figura 1.3 Subsistema de energía.....	4
Figura 1.4 Sistemas de Telemando, Telemetría y Control térmico.	5
Figura 1.5 Enlaces.....	6
Figura 1.6 Modelo de subida del satélite.....	8
Figura 1.7 Transponder del satélite.....	9
Figura 1.8 Modelo de bajada del satélite.....	10
Figura 1.9 Las Orbitas.....	11
Figura 1.10 Altitudes Orbitales Para Constelaciones Satelitales....	16
Figura 1.11 Fuerzas sobre el Satélite.....	18
Figura 1.12 Orbitas del satélite.....	21
Figura 1.13 Líneas de Latitud y Longitud.....	22
Figura 1.14 Ángulos de vista (Azimut y ángulo de elevación).....	24
Figura 1.15 Atenuación debida a la absorción atmosférica: (a) banda de 6/4 GHz., (b) banda 14/12 GHz.....	24
Figura 1.16 Azimut y ángulo de elevación para las estaciones terrenas situadas en el hemisferio norte (referidas a 180°).....	25
Figura 1.17 Sistema de comunicación vía satelital.....	27
CAPÍTULO 2	
Figura 2.1 El piloto del F-16 americano capitán Scott F. O'Grady..	32
Figura 2.2 Aplicación de la tecnología GPS.....	36
Figura 2.3 Satélites Navstar.....	38
CAPÍTULO 3	
Figura 3.1 Triangulación desde los satélites, 1.....	49
Figura 3.2 Triangulación desde los satélites, 2.....	50
Figura 3.3 Triangulación desde los satélites, 3.....	50
Figura 3.4 Cada satélite tiene un Código Pseudo aleatorio único...	61
Figura 3.5 Las Órbitas altas son exactas.....	66
Figura 3.6 El monitoreo constante por Radar, agrega precisión....	67
Figura 3.7 viaje difícil a través de la atmósfera.....	68
Figura 3.8 Viaje difícil sobre la tierra.....	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Designación de frecuencias.....	7
Tabla 1.2 clasificación de órbitas.....	12
Tabla 1.3 Comparación de sistemas satelitales.....	16
Tabla 1.4 Parámetros de la órbita geoestacionaria.....	19
Tabla 3.1 Resumen de las fuentes de error del sistema GPS.....	73

INTRODUCCIÓN

GPS (Global Positioning system) o sistemas de posicionamiento global, ha venido a innovar completamente la sociedad actual en que vivimos, ya que si realmente una empresa pretende ser competitiva en la actualidad, de antemano sabemos que las telecomunicaciones son un verdadero factor de desarrollo y GPS es lo último en vanguardia pero sobre todo funcional. Este sistema es realmente elemental y ha trascendido notablemente, de ser una herramienta militar que fue creada por el ejército de la defensa de los EUA y su objetivo localizar un vehículo en cualquier punto específico de la tierra, esto con fines de destrucción o de defensa y el cual ha dado un giro considerable puesto que ha venido de ser una aplicación, hasta destructiva por decirlo de alguna forma, a ser una herramienta cotidiana para muchas personas, en la actualidad se usa en transportes marítimos GPS sirve para darnos una ubicación precisa de una embarcación y evitar colisiones con un iceberg en este caso, en el espacio aéreo se usa para localizar un avión y tener su ubicación precisa, hoy en día hasta se llega a usar en personas poderosas, para en caso de secuestro localizar de inmediato a dicha persona.

Con todo esto nos preguntaremos ¿como se lleva al cabo este proceso? Pues para ello se necesitan un transmisor el cual es implantado en un vehículo, una persona, un animal o un punto cualquiera del que queramos saber su ubicación, necesitamos tener 4 satélites ubicados de forma específica, para saber el punto exacto de posicionamiento de nuestro objetivo, el satélite envía una señal a dicho objetivo y nos da una distancia, se hace lo mismo con los otros satélites, la distancia se obtiene con una fórmula que calcula esta distancia en base al tiempo en que tarda en llegar la señal, al tener las distancias sabremos donde se encuentra ubicado el punto.

En el desarrollo del tema, en el capítulo 1 analizaremos el funcionamiento básico de un satélite, así como sus principales sistemas que lo conforman, elementos que sustentan una transmisión de datos, esto para familiarizarnos con los componentes primordiales del sistema GPS y tener un panorama más amplio cuando se analice dicho sistema.

En el capítulo 2 haremos un recorrido por los antecedentes históricos de GPS, como nace, quienes fueron los principales aportadores de conocimientos, sus principales campos de aplicación, también que es lo que se espera de este sistema en un futuro cercano.

En el capítulo 3 se desarrollara la idea generalizada de GPS, para que nos sirva, como funciona paso a paso, la triangulación de los satélites, su transmisión de información, sus principales factores de error y la corrección de estos, así como su modelo matemático, entre muchos otros temas importantes.

OBJETIVO GENERAL

El objetivo de este trabajo de investigación es dar a conocer lo referente a Global Positioning System (Sistemas de Posicionamiento Global) que es una herramienta de vanguardia y sobre todo funcional para las empresas, ya que no es fácil encontrar información en libros en español puesto que es tecnología de punta.

Este trabajo tiene la finalidad de poder aplicar los conocimientos adquiridos, los cuales se encuentran en esta recopilación de datos.

JUSTIFICACIÓN

En la actualidad, la tecnología se desarrolla con una enorme velocidad, a un país en vías de desarrollo como el nuestro tardan en llegar tecnologías e información con respecto de los más adelantados. GPS es una herramienta de primer mundo, por lo tanto es vanguardista y esta nos permite trivialidad en la resolución de problemas de radiocomunicación, esto para los Ingenieros en Electrónica y Telecomunicaciones, es un gran aporte al desarrollo de nuestra funcionalidad puesto que al tener mayor conocimiento también tendremos mejores expectativas de competitividad y desempeño.

En nuestra Universidad, dicha área de conocimiento esta desarrollándose de buena forma, así que sabiendo que no existe demasiada información en nuestro idioma es importante reforzarla con un tema con tecnología de punta, GPS cumple con estas expectativas y es importante tener una herramienta más para el desarrollo de nuestra carrera.

GPS es futurista como herramienta más importante en los próximos años, ya que se pretende implantar un biochip en cada ser humano, el cual sustituye toda la documentación y dinero necesarios para sobrevivir, por supuesto se sabrá la ubicación de cada persona en el planeta en todo momento, esto controlado por dicha tecnología.

Capítulo 1

Funcionamiento básico de un satélite

Para comprender el funcionamiento de GPS, es importante saber como funcionan y se constituyen los satélites, ya que los principales elementos que lo conforman son estos, en este capítulo se da a conocer el funcionamiento elemental de un satélite, desde sus sistemas que lo integran, hasta las orbitas de operación de estos, todas las características que se mencionen son trascendentes en el desarrollo del tema.

CAPITULO 1 FUNCIONAMIENTO BÁSICO DE UN SATÉLITE.

Un satélite puede dividirse en 2 partes fundamentales para su operación: el conjunto de equipos y antenas que procesan las señales de comunicación de los usuarios como función substancial, denominado carga útil o de comunicaciones, y la estructura de soporte con los elementos de apoyo a dicha función, denominada plataforma. Existe una interacción precisa entre ambas partes que debe preservarse y controlarse en todo momento.

La carga útil tiene amplio campo de acción de la cobertura de la huella del satélite y del empleo de las ondas de radio en una extensa gama de frecuencias que constituyen la capacidad de comunicación al servicio de los usuarios, en tanto que la acción de los elementos de la plataforma no se extiende fuera de los límites del propio satélite, salvo en la comunicación con su centro de control actúa recíprocamente tanto con la carga útil como con la plataforma, para adecuar el funcionamiento del satélite a las necesidades de operación y a los servicios contratados por los usuarios.

La plataforma puede dividirse para su análisis funcional en varios subsistemas que apoyan la operación satisfactoria de la carga de comunicaciones como se muestra en la siguiente figura.

La estructura de la plataforma sirve de soporte tanto para sus demás elementos como para la carga útil. Debe tener la suficiente resistencia para soportar las fuerzas y vibraciones del lanzamiento y a la vez un peso mínimo conveniente. Esta construida con aleaciones metálicas ligeras y con compuestos químicos de alta rigidez y bajo coeficiente de dilatación térmica, resistentes al deterioro. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

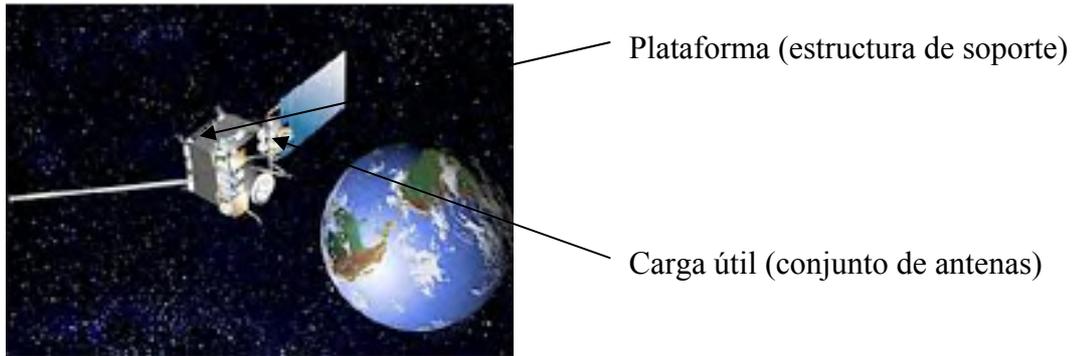


Figura 1.1 Estructuras del satélite.

1.1 Sistemas de Propulsión.

Los sistemas de propulsión pueden incluir un motor de apogeo que permita al satélite llegar a su órbita de destino después de ser liberado por el vehículo de lanzamiento si este no lo hace directamente. Si el satélite debe ubicarse en una posición determinada de la órbita geoestacionaria, y los servicios de lanzamiento utilizan un vehículo que solo sea capaz de dejarlo en una órbita elíptica con apogeo cercano a aquella, una opción de diseño permite programar una serie de encendidos breves de dicho motor cuando menos en el apogeo (cuando este utiliza combustible líquido) para llevarlo por aproximaciones sucesivas a la órbita circular al incrementarse progresivamente la altitud del perigeo. Ver figura 1.2.

Una vez en la órbita y emplazamiento deseados, las correcciones a las desviaciones fuera de ellos debidas a las perturbaciones causadas por el sol, la luna y la propia tierra se realizan mediante pequeños impulsores, cuyo número depende del tipo del satélite, los cuales pueden emplear propulsantes químicos requeridos para conservar su posición durante su vida útil representan de 20 a 40 % de masa adicional a la de la nave sin combustible o masa seca en misiones de 10 a 15 años. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

1.2 Subsistema de Control.

El subsistema de control de orientación o actitud esta constituido por las partes y componentes que permiten conservar la precisión del apuntamiento de la emisión y recepción de las antenas del satélite dentro de los limites del diseño, corrigiendo no solo las desviaciones de estas por dilatación térmica e imprecisión de montaje, sino de toda la nave en su conjunto. Para este fin cuenta con sensores y dispositivos giroscópicos como referencia, y un procesador digital con algoritmos de corrección que le pueden permitir un amplio grado de autonomía de su función y que incluyen el control de oscilaciones transitorias mediante amortiguamiento. Las correcciones de orientación pueden realizarse por medio de los impulsores y por otros elementos a bordo. Ver figura siguiente.

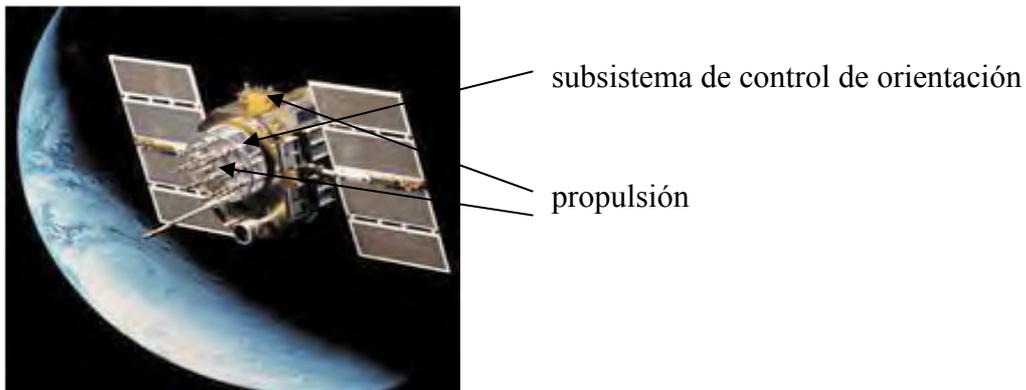


Figura 1.2 Subsistemas de control de orientación y propulsión.

1.3 Subsistema de energía.

El subsistema de energía esta constituido generalmente por células solares que alimentan los circuitos eléctricos de la nave, las baterías que aseguran el suministro durante los eclipses y los dispositivos de regulación y adaptación que evitan tanto la introducción de pulsos en las líneas de alimentación hacia la carga útil como las variaciones de voltaje que podrían ser causadas por el ángulo de recepción de los rayos solares, la mayor o menor distancia del sol o el deterioro de las células. Como se muestra a continuación, fig. 1.3 subsistema de energía. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

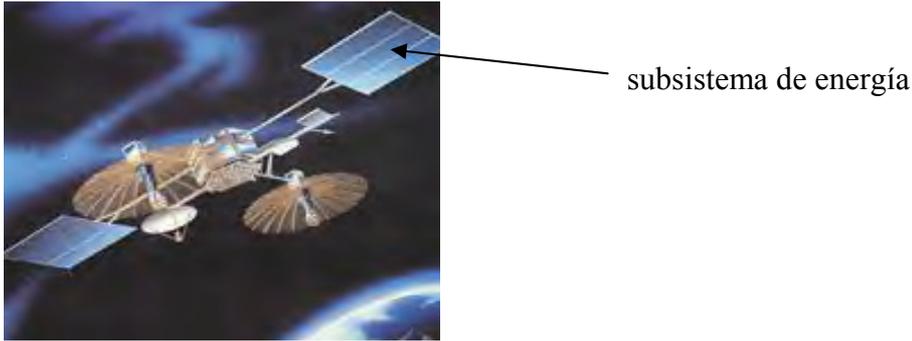


Figura 1.3 Subsistema de energía.

1.4 Sistema de Telemetría.

El sistema de telemetría permite conocer el estado de todos los demás subsistemas, utiliza un gran número de sensores que detectan o miden estados de circuitos y variaciones de temperatura, presión, voltaje, corriente eléctrica, etc., convierte esta información en datos codificados y los envía en secuencia al centro de control a través de un canal especial de comunicación, repitiéndose la secuencia a intervalos regulares. Ver figura 1.4. Esta información se utiliza para acción inmediata si fuera necesario y se registra para su análisis estadístico y detallado.

1.5 Sistema de Telemando.

El sistema de telemando permite enviar órdenes al satélite desde el centro de control a través de un canal de comunicación dedicado que se activa cuando estas se transmiten. Los comandos pueden tener efecto tanto sobre la carga útil como sobre la plataforma y solo son admitidos por el satélite mediante códigos de seguridad que evitan su acceso ilegítimo, debido a las consecuencias catastróficas que puede tener un comando inadecuado ya que es fácil tener acceso al satélite no solo desde cualquier lugar dentro de la huella objetivo, sino, en condiciones propicias, desde cientos de kilómetros fuera de ella si se emplea suficiente potencia en una estación terrena transmisora. Ver figura 1.4. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

1.6 Subsistema de Control Térmico.

Para evitar variaciones de temperatura extremas en los componentes del satélite, fuera de las toleradas para su adecuado funcionamiento y duración, el subsistema de control térmico emplea conductos de calor y radiadores que lo disipan fuera de la plataforma. También protege a las partes de frío intenso durante los eclipses o en áreas no expuestas al sol por medio de calefactores eléctricos y emplea materiales aislantes para lograr el equilibrio térmico requerido dentro de la nave. Los dispositivos de control interno permiten modificar las acciones térmicas cuando es necesario.

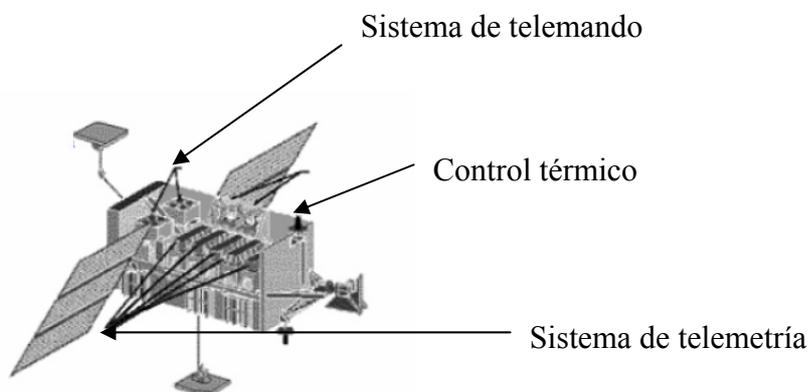


Figura 1.4 Sistemas de telemando, telemetría y Control térmico.

1.7 Designación de Frecuencias.

Como se menciona anteriormente, un satélite de comunicación puede operar en una amplia gama de frecuencias. Las diversas bandas de frecuencias que pueden utilizar los satélites son determinadas (atribuidas, en la terminología convencional de este campo) por la unión internacional de telecomunicaciones (UIT) en forma exclusiva para estos o en forma compartida con otros servicios, quedando a cargo de los gobiernos de cada país asignarlas a usuarios específicos. Para satisfacer las necesidades mundiales de comunicación, cada banda de frecuencias puede ser utilizada simultáneamente por muchos países, con las debidas precauciones técnicas para evitar interferencias que pueden originarse por la dificultad de limitar las radiaciones solo a las áreas de servicio.

Cuando por las interferencias que se originan no es posible el uso simultáneo de toda una banda por cada uno de los países de una región, se puede realizar una planificación regional anticipada, aprobada por todos los países de la misma, que queda registrada por la UIT. Para evitar interferencias a los servicios entre 2 países, se realizan coordinaciones específicas caso por caso que pueden ser complementadas por convenios bilaterales.

Un satélite o sistemas de satélites puede operar en una o mas de las bandas atribuidas a los servicios de satélite dependiendo de las necesidades de capacidad de trafico, en su caso de las bandas que se hayan empleado en la generación anterior de satélites del mismo sistema, de los servicios que se pretenden prestar en cierta medida de las condiciones climáticas de la zona de servicio y de las posibilidades técnicas de ocupación de una órbita o posición orbital sin causar interferencias a otros satélites. Cada banda de frecuencias dispone de una parte de la misma para los enlaces ascendentes tierra-satélite y otra para los enlaces descendentes satélite-tierra a fin de evitar interacciones inconvenientes. Cada unidad básica de la carga útil o transpondedor recibe las emisiones desde la tierra como enlaces ascendentes, las amplifica para compensar la enorme perdida en el espacio, realiza la transposición o conversión de sus frecuencias y las devuelve a tierra como enlaces descendentes, operando en fracciones diferentes de la banda que los demás transpondedores (salvo en casos de reuso de frecuencias en el mismo satélite) como se muestra en la figura 1.5. [1]

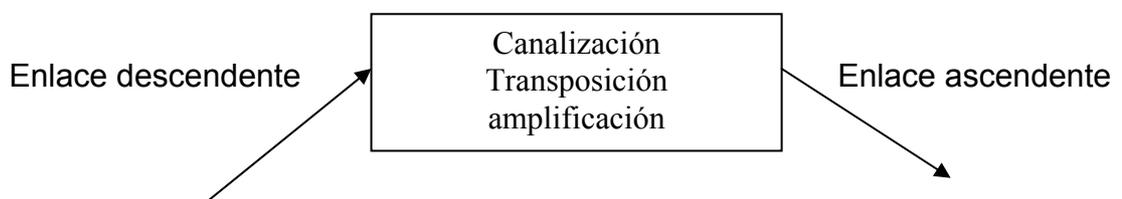


Figura 1.5 Enlaces.

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Además de las funciones mínimas mencionadas, si se requiere, la carga útil puede diseñarse para realizar la conmutación de señales a bordo y otros tipos de procesamiento, así como la comunicación con otros satélites.

La parte del espectro de radiofrecuencia atribuido por la UIT a la comunicación por satélite para cada uno de los tipos de servicio móvil por satélite SMS, fijo por satélite (SFS), difusión (SRS) o entre satélites (SES) comprende porciones en la gama de aproximadamente de 3.4 a 14.8 GHz (principalmente en las llamadas bandas C y Ku), considerando el número de satélite que las emplean y la reutilización de frecuencias en muchos de ellos. Para sus propios fines reglamentarios la UIT considera 3 regiones en el mundo: la región 1 que abarca a África, los países árabes, Europa y los países que anteriormente constituían la URSS, la región 2 que abarca los países de América y la región 3 que incluye a Asia y Oceanía, existiendo algunas diferencias menores en la atribución de frecuencias para cada región y excepciones registradas por países en forma individual.

Por razones prácticas, a las bandas de frecuencias más comunes para el servicio por satélite se les designa por fabricantes de equipos, operadores de satélites y usuarios por medio de letras empleadas originalmente para radar, aunque no son utilizadas oficialmente por la UIT. De acuerdo con estas siglas, las principales bandas para los servicios por satélite son las mostradas en la siguiente tabla, para la región 2 (América) como ejemplo. [1]

Designación	Rango	Servicio	Observaciones
Banda L	1-2 GHz	Servicio móvil.	Baja atenuación en espacio libre
Banda S	2-4 GHz	Subsistema teledirigido y telecomando.	
Banda C	6 GHz (UL) 4 GHz (DL)	Servicio fijo.	Es el segmento más saturado
Banda X	8 GHz (UL) 7 GHz (DL)	Uso militar.	
Banda Ku	14/12 GHz 17/12 GHz	Servicio fijo. DBS.	Ampliación servicios banda C
Banda K	18 GHz (UL) 27 GHz (DL)	Enlaces entre satélites (ej. IRIDIUM).	Elevada absorción atmosférica
Banda Ka	27-40 GHz	Uso militar.	
Milimétricas	60 GHz	Servicio móvil de banda ancha.	Videokonferencias, etc.

Tabla 1.1 Designación de frecuencias.

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

1.8 Modelos de enlace del sistema satelital.

Esencialmente, un sistema satelital consiste de tres secciones básicas: una subida, un transponder satelital y una bajada.

1.8.1 Modelo de subida.

El principal componente dentro de la sección de subida, de un sistema satelital, es el transmisor de la estación terrena. Un típico transmisor de la estación terrena consiste de un modulador de IF, un convertidor de microondas de IF a RF, un amplificador de alta potencia (HPA) y algún medio para limitar la banda del espectro de salida (por ejemplo un filtro pasa-banda de salida).

La Figura 1.6 muestra el diagrama a bloques de un transmisor de estación terrena satelital. El modulador de IF convierte las señales de banda base de entrada a una frecuencia intermedia modulada e FM*, en PSK* o en QAM*. El convertidor (mezclador y filtro pasa-banda) convierte la IF a una frecuencia de portadora de RF apropiada. El HPA proporciona una sensibilidad de entrada adecuada y potencia de salida para propagar la señal al transponder del satélite. Los HPA usualmente usados son klystons y tubos de onda progresiva. [2]

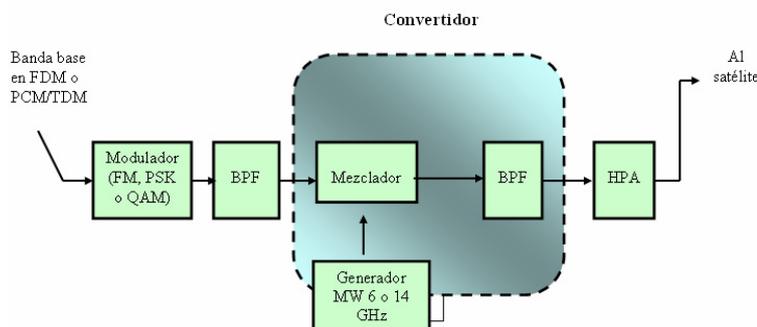


Figura 1.6 Modelo de subida del satélite.

*ver glosario de términos.

[2] ver referencia bibliográfica, sistemas de comunicaciones...

1.8.2 Transponder.

Un típico transponder satelital consta de un dispositivo para limitar la banda de entrada (BPF), un amplificador de bajo ruido de entrada (LNA), un translador de frecuencia, un amplificador de potencia de bajo nivel y un filtro pasa-bandas de salida.

La Figura 1.7 muestra un diagrama a bloques simplificado de un transponder satelital. Este transponder es un repetidor de RF a RF.

Otras configuraciones de transponder son los repetidores de IF, y de banda base, semejantes a los utilizados en los repetidores de microondas.

En la Figura 1.7, el BPF de entrada limita el ruido total aplicado a la entrada del LNA (un dispositivo normalmente utilizado como LNA, es un diodo túnel).

La salida del LNA alimenta un translador de frecuencia (un oscilador de desplazamiento y un BPF), que se encarga de convertir la frecuencia de subida de banda alta a una frecuencia de bajada de banda baja.

El amplificador de potencia de bajo nivel, que es comunmente un tubo de ondas progresivas (TWT), amplifica la señal de RF para su posterior transmisión por medio de la bajada a los receptores de la estación terrena.

También pueden utilizarse amplificadores de estado sólido (SSP), los cuales en la actualidad, permiten obtener un mejor nivel de linealidad que los TWT.

La potencia que pueden generar los SSP, tiene un máximo de alrededor de los 50 Watts, mientras que los TWT pueden alcanzar potencias del orden de los 200 Watts. [2]

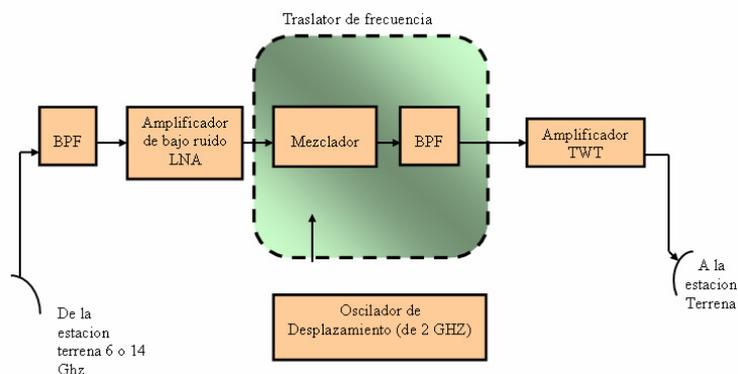


Figura 1.7 Transponder del satélite.

[2] ver referencia bibliográfica, sistemas de comunicaciones...

1.8.3 Modelo de bajada.

Un receptor de estación terrena incluye un BPF de entrada, un LNA y un convertidor de RF a IF. La Figura 1.8 muestra un diagrama a bloques de un receptor de estación terrena típico. Nuevamente el BPF limita la potencia del ruido de entrada al LNA. El LNA es un dispositivo altamente sensible, con poco ruido, tal como un amplificador de diodo túnel o un amplificador paramétrico. El convertidor de RF a IF es una combinación de filtro mezclador/pasa-bandas que convierte la señal de RF a una frecuencia de IF. [2]

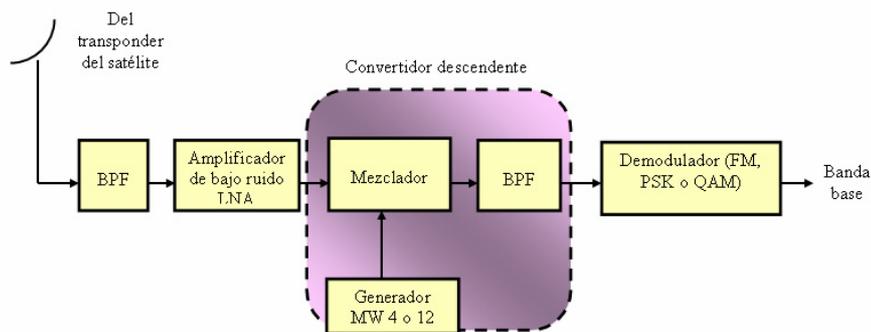


Figura 1.8 Modelo de bajada del satélite.

[2] ver referencia bibliográfica, sistemas de comunicaciones...

1.9 Las órbitas de los satélites.

Los satélites artificiales giran en torno a la Tierra conforme a la ley de gravitación universal descrita por Newton y descriptivamente cumplen con las Leyes de Kepler.

La Ley de Gravitación Universal nos dice que la fuerza de atracción de dos cuerpos está relacionada con la masa y distancia entre los mismos. A mayor masa y menor distancia, mayor atracción.

La primera ley de Kepler dice que las órbitas de los planetas son "elipses" y que el Sol ocupa uno de sus focos. La segunda, relaciona el recorrido (órbita) del planeta con el tiempo que tarda en recorrerlo y dice que un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. La tercera relaciona el tiempo que tarda un planeta en recorrer su órbita con la distancia media al Sol, manifestando que el tiempo de recorrido es mayor cuanto mayor sea la distancia Planeta-Sol. A pesar de estar hablando de planetas, estas leyes rigen para cualquier cuerpo que orbite entorno a otro en el espacio, por ejemplo los satélites artificiales y la Tierra. [3]

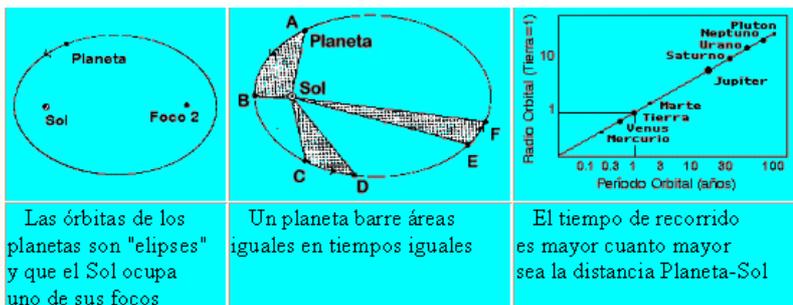


Figura 1.9 Las Órbitas.

[3] ver referencia bibliográfica, <http://www.monografias.com>.

Las órbitas de los planetas son "elipses" y que el Sol ocupa uno de sus focos. Un planeta barre áreas iguales en tiempos iguales. El tiempo de recorrido es mayor cuanto mayor sea la distancia Planeta-Sol. [3]

1.9.1 Tipos de órbitas de los satélites.

Un hecho fundamental a tener en cuenta en las órbitas satelitales es la existencia de los Cinturones de Van Allen, de forma toroidal y con gran densidad de partículas ionizadas de alto nivel de radiación. En la medida de lo posible se ha de evitar pasar por estos cinturones, lo cual da lo que podríamos llamar alturas de órbita prohibidas. Existen dos cinturones de Van Allen:

- Primer cinturón: entre 1500 km y 3000 km de altitud sobre la superficie terrestre.
- Segundo cinturón: entre 13000 km y 20000 km de altitud.

Las órbitas terrestres pueden clasificarse por su altitud, según se indican a continuación.

36.000 km	=====	GEO (Geostationary Earth Orbit)
20.000 km	=====	
13.000 km	=====	2º Cinturón Van Allen
		MEO (Medium Earth Orbit)
3.000 km	=====	1º Cinturón Van Allen
1.500 km	=====	LEO (Low Earth Orbit)
100 km	=====	
0 km	=====	Atmósfera

tabla 1.2 clasificación de órbitas.

Existe otro tipo: las órbitas no terrestres, como es el caso de la heliosíncrona: órbita alrededor del Sol pero con giro síncrono con la Tierra.

Por otro lado, según su forma, podemos clasificar las órbitas en elípticas (HEO, Heliptical Earth Orbit) y circulares, que son un caso particular de las anteriores con excentricidad unitaria.

1.9.1.1 Órbita Satelital LEO.

LEO (Low Earth Orbit), por sus siglas en inglés u Órbita Terrena Baja, en español, es una órbita circular. Se define la inclinación del plano orbital como el ángulo formado por el plano orbital con el plano del Ecuador. Podemos distinguir entre:

- **Órbitas polares.** Tienen inclinación = 90° .
- **Órbitas ecuatoriales.** Tienen inclinación = 0° .

Las órbitas polares no son muy aconsejables porque se produce mucha concentración de satélites en los polos (todas las órbitas polares confluyen en los polos). [4]

Entre las ventajas de las LEOs podemos mencionar:

- Al ser de baja altura y usarlas satélites pequeños, el lanzamiento es fácil y el costo mínimo.
- La atenuación por propagación en espacio libre es pequeña.
- Los retardos de propagación son pequeños.

Las desventajas principales de las LEOs son:

- Pequeña cobertura. Hace falta una constelación para cubrir grandes extensiones.
- El satélite tendrá velocidad relativa respecto a un punto fijo de la superficie terrestre. Esto hace que pueda ser necesario un seguimiento del satélite por parte de la estación terrestre, y además aparece el efecto Doppler.

[3] ver referencia bibliográfica, <http://www.monografias.com>.

Los usos más característicos de estas órbitas son los servicios de comunicaciones móviles por satélite (IRIDIUM, con 66 satélites), los de radiodeterminación (constelación NAVSTAR GPS) y las estaciones espaciales (MIR, ISS).

La órbita polar no suele utilizarse en comunicaciones móviles, ya que da mucha cobertura en las zonas polares (donde el tráfico es pequeño) y poca en las zonas ecuatoriales, donde la densidad de tráfico es mayor. Las órbitas polares las suelen usar los satélites de reconocimiento: meteorológicos, de exploración del suelo, militares, etc.

1.9.1.2 Órbita Satelital MEO.

MEO (Medium Earth Orbit) Órbita Terrena Media, suele ser una órbita circular. Al ser más altas que las LEO, la cobertura de cada satélite es mayor y por tanto se necesitan menos satélites para cubrir un área determinada, con el inconveniente de tener mayor atenuación por propagación en el espacio libre. [4]

1.9.1.3 Órbita Satelital GEO

GEO (Geostationary Earth Orbit), Órbita Geoestacionaria, se trata de una única órbita ecuatorial, situada a una altura de 36.184 km sobre la superficie terrestre. Al estar situada a esta altura, se consigue que el satélite gire sincrónicamente con la Tierra (girando en el mismo sentido de rotación). Proporciona una cobertura de aproximadamente 1/3 de la superficie terrestre, lo que la hace apropiada para enlaces fijos y de radiodifusión DBS (Direct Broadcast System). La principal desventaja es que está muy lejos de la Tierra y por tanto se producen elevadas pérdidas por propagación en espacio libre, lo cual hace que se necesiten ganancias de antena muy grandes tanto en el satélite como en la estación terrena. Además, la GEO es única, sólo hay un arco geoestacionario donde poder situar los satélites, lo cual limita la cantidad de satélites que pueden situarse en GEO y obliga a trabajar con anchos de haz muy estrechos en la estación terrena para no interferir con los satélites vecinos.

Los satélites suelen situarse a una distancia de arco de 2° tomando la Tierra como referencia (unos 200 Km. entre cada par) y esto sólo puede conseguirse con un control muy preciso. La latitud donde se sitúa el satélite dentro de la órbita geoestacionaria se ha de corresponder con la latitud de la zona geográfica de la Tierra a la que se quiere dar cobertura. Esto supone un problema añadido en zonas de alta densidad de servicio, como Europa. Por ejemplo, el HISPASAT está situado a una latitud $30^\circ W$ para dar cobertura a España y Sudamérica. Debido a las irregularidades en el campo gravitatorio terrestre (la Tierra no es una esfera sino una geode), existen dos puntos estables y puntos no estables dentro de la GEO. Cualquier cuerpo no situado en un punto estable sufre derivas en latitud en dirección hacia el punto estable más cercano. Esto hace que se tengan posiciones prohibidas dentro del arco geoestacionario. El ángulo de elevación es el formado por la visual de la estación terrestre con el satélite, y la superficie terrestre. Si es negativo, no existe visual con el satélite. Los puntos de la Tierra situados en latitudes superiores a los 70° - 80° tienen ángulo de elevación negativo con la GEO y por tanto no se les proporciona cobertura. Este problema lo tienen algunos países como Rusia, que ha de utilizar órbitas HEO en lugar de GEO. Un tipo de órbita utilizada en este caso es la órbita Molniya, cuyo apogeo* coincide con la GEO. Dado que el campo gravitatorio terrestre no es uniforme, como ya se menciona, los planos orbitales elípticos no se mantienen en una posición constante, sino que giran (cambia su argumento del perigeo*), pero manteniendo la inclinación. Las órbitas elípticas pueden tener cualquier inclinación, pero suele utilizarse una inclinación de 63.4° , debido a que en ese caso el efecto de variación del argumento del perigeo es mínimo. Se define una constelación como el conjunto de órbitas de satélites que operan conjuntamente. Una constelación está en fase si todos sus planos orbitales tienen la misma inclinación y dentro de cada plano orbital se distribuyen de forma uniforme los satélites, dando distancias iguales en argumento de perigeo entre cada pareja de satélites.

*ver glosario de términos.

[4] ver referencia bibliográfica, <http://www.worldbookonline.com>

En una constelación la inclinación de todos los planos orbitales ha de ser la misma para que las perturbaciones del campo magnético terrestre afecten de forma similar a todos los satélites de la constelación. El número total de satélites que caben en una órbita es función de la altitud de la misma. A continuación en la fig. 1.10 se muestran las órbitas en las que operan los satélites y en la tabla 1.3 se dan a conocer las altitudes de cada una de ellas.

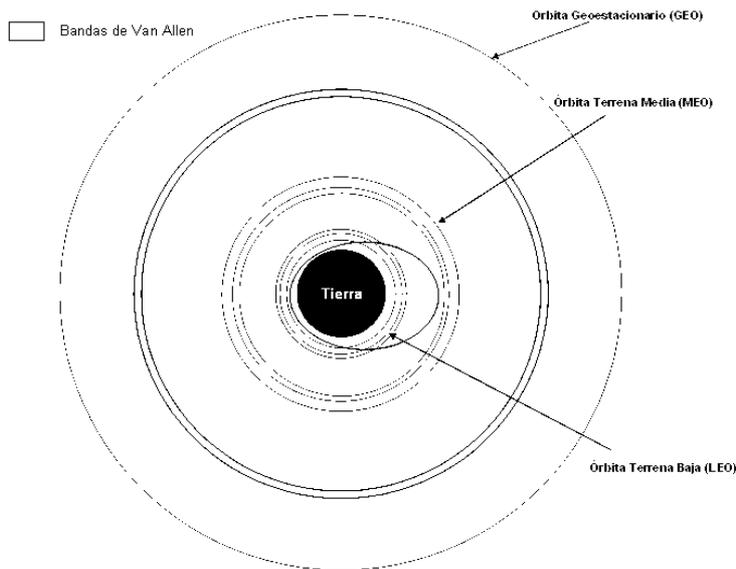


Figura 1.10 Altitudes Orbitales Para Constelaciones Satelitales.

Constelación	LEO	MEO	GEO
<i>Altitud (Km)</i>	500 - 1 500	10 000 - 20 000	35 850
<i>Rotación (min)</i>	90 - 120	12 Hrs max.	24 Hrs
<i>Retardo de propagación (mseg)</i>	5 - 15	130 max.	240
<i>Accesibilidad al Satélite (min)</i>	15 a 20	40 a 50	Continua
<i>No. de Satélites (cobertura global)</i>	Muchos Satélites	10 ó mas	3
<i>Hand-off</i>	Alto	Medio	No

Tabla 1.3 Comparación de Sistemas Satelitales.

1.9.1.3.1 Parámetros típicos de la órbita geoestacionaria.

Es posible calcular algunos parámetros típicos de la órbita geoestacionaria, tales como la altura del satélite, o la velocidad del mismo, partiendo de las leyes básicas de la física.

Como es sabido un satélite geoestacionario tiene un periodo de rotación igual al de la tierra, por lo tanto debemos saber con exactitud dicho periodo de rotación. Para ello se considera el día sidéreo, que es el tiempo de rotación de la tierra medido con respecto a una estrella lejana y que difiere del día solar o medido con respecto al sol.

La duración de este día sidéreo es de 23h 56 min. 4.1seg, y es el tiempo que usaremos en nuestros cálculos.

Si hiciésemos la consideración de que la tierra fuese realmente esférica y con una densidad uniforme, su masa equivalente podría considerarse como puntual y su fuerza de atracción sobre un satélite de masa m , respondería a la ley de gravitación universal de Newton, esta fuerza puede expresarse como:(Ecuación 1.1)

$$F_g = G * \frac{mM}{r^2} \quad (\text{Ecuación 1.1})$$

Donde:

M: Es la masa de la Tierra, 5.98×10^{24} kg.

G: Es la constante de gravitación universal, 6.67×10^{-11} N.m²/kg².

r : Distancia desde el satélite al centro de la Tierra.

m: Masa del satélite.

Además dado que el satélite se encuentra en una órbita circular, existirá una fuerza centrífuga F_c debida a su movimiento alrededor de la Tierra, de igual magnitud pero opuesta a la fuerza F_g , en consecuencia el satélite se encuentra en una situación de equilibrio.

$$F_c = \frac{mV^2}{r} \quad (\text{Ecuación 1.2})$$

V: Velocidad del satélite.

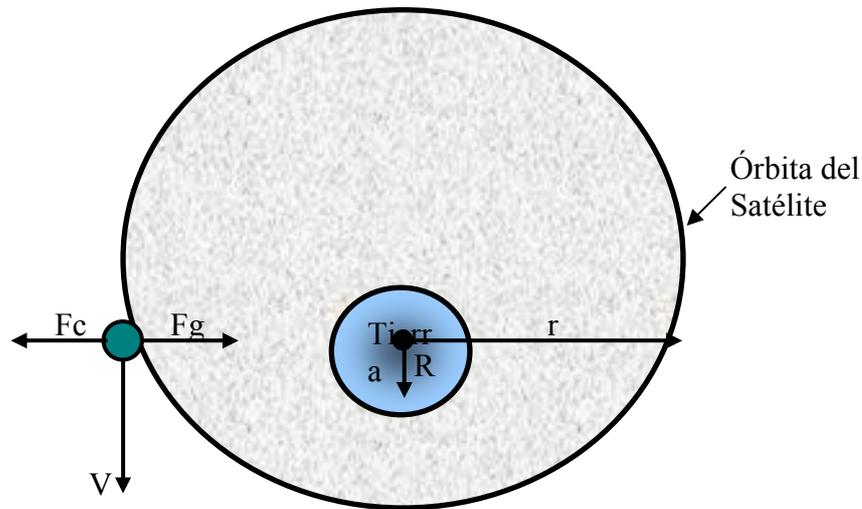


Figura 1.11 Fuerzas sobre el Satélite.

De la ecuación (1.2) podemos despejar la velocidad del satélite

$$V = \sqrt{\frac{GM}{r}} \quad (\text{Ecuación 1.3})$$

El periodo de rotación T, del satélite es:

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{V} \quad (\text{Ecuación 1.4})$$

Reemplazando (1.3) en (1.4) y despejando el radio r, nos queda:

$$r = \sqrt[3]{GM \left(\frac{T}{2\pi} \right)^2} \quad (\text{Ecuación 1.5})$$

Como un satélite geoestacionario tiene un periodo de rotación T igual al de la Tierra, dicho periodo será entonces, la duración de un día sidéreo (23h 56min 4.1seg).

Por lo tanto de la expresión (5) podemos obtener la distancia del satélite al centro de la Tierra, y si a este valor le restamos el radio terrestre R=6370 Km., obtendremos la altura de la órbita geoestacionaria. Por último de la expresión (3) se obtiene la velocidad del satélite. [3]

[3] ver referencia bibliográfica, <http://www.monografias.com>.

Todos estos parámetros se han resumido en la siguiente tabla:

Parámetros de la órbita geoestacionaria	
Radio medio de la Tierra.	6370 km.
Periodo de rotación (Tierra y satélite).	23h 56min 4.1seg
Radio de la órbita geoestacionaria.	42173 Km.
Altura del satélite sobre la Tierra.	35803 Km.
Velocidad del satélite.	3.075 Km./seg.

Tabla 1.4 Parámetros de la órbita geoestacionaria.

1.9.2 Patrones orbitales.

Una vez lanzado, un satélite permanece en órbita debido a que la fuerza centrífuga, causada por su rotación alrededor de la Tierra, es contrabalanceada por la atracción gravitacional de la Tierra. Entre mas cerca gire de la Tierra el satélite, más grande es la atracción gravitacional y mayor será la velocidad requerida para mantenerlo alejado de la Tierra. Los satélites de baja altitud tienen órbitas cercanas a la Tierra (160 a 480 Km. de altura), viajan aproximadamente a 28160 Km. por hora. A esta velocidad, se requiere aproximadamente de 1 1/2 h para girar alrededor de toda la Tierra.

Consecuentemente el tiempo que el satélite esta visible en una estación terrestre en particular, es solamente 1/4 h o menos por órbita. Los satélites de altitud media (9600 a 19300 Km. de altura), tienen un periodo de rotación de 5 a 12 h y permanecen a la vista de una estación terrestre específica de 2 a 4 h por órbita.

Los satélites geosíncronos de alta altitud (30570 a 40200 km. de altura), viajan aproximadamente a 11070 Km. por hora y tiene un periodo de rotación de 24 h, exactamente el mismo que la Tierra. De esta manera, permanecen en una posición fija, con respecto a una estación de la Tierra específica y tienen un tiempo de disponibilidad de 24 h.

La Figura 1.12 muestra los tres trayectos que un satélite puede tomar, conforme gira alrededor de la Tierra. Cuando el satélite gira en una órbita arriba del ecuador, se llama órbita ecuatorial. Cuando el satélite gira en una órbita que lo lleva arriba de los polos norte y sur, se llama órbita polar. Cualquier otro trayecto orbital se llama órbita inclinada. Un nodo ascendente, es el punto en donde la órbita cruza el plano ecuatorial de sur a norte; un nodo descendente, es el punto donde la órbita cruza el plano ecuatorial de norte a sur. La línea que une a los nodos ascendentes y descendentes por el centro de la Tierra, se llama línea de nodos. [5]

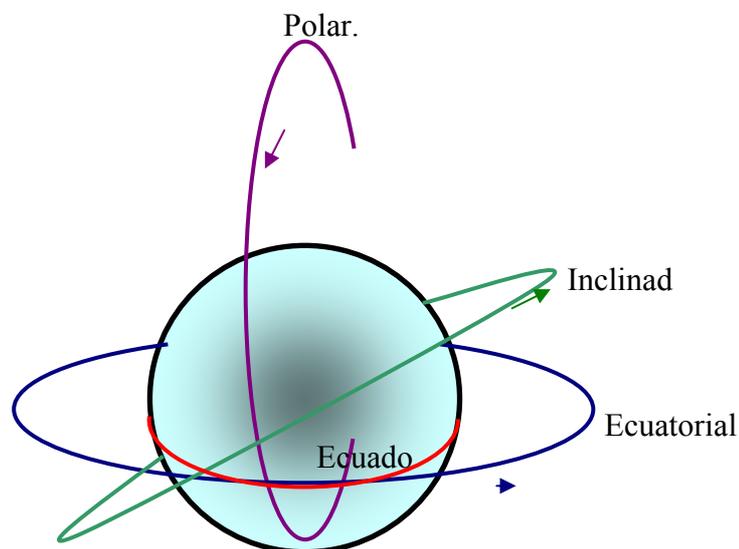


Figura 1.12 Órbitas del satélite.

[5] ver referencia bibliográfica, satellite communications...

1.9.2.1 Latitud-Longitud.

Como primera medida para describir el paso de un satélite en órbita, deberemos designar un punto de observación o un punto de referencia. Este punto podrá tratarse de un lugar distante, tal como una estrella, o un punto en la superficie de la tierra, o también el centro de la Tierra, que a su vez el centro de gravedad del cuerpo principal.

En caso de tomar como lugar de observación un punto en la superficie de la Tierra, deberemos estar en condiciones de localizar dicho punto mediante algún método.

Este método de localización es a través de un grillado imaginario denominado meridianos. Estas líneas conforman un cuadrículado sobre la superficie de la tierra. Las líneas verticales se denominan longitud y las líneas horizontales se denominan latitud.

Las líneas de longitud se extienden desde el polo norte al polo sur, es decir que son círculos iguales al contorno de la tierra que se interceptan en los polos. Se ha definido por convención, como primer meridiano o longitud cero grados, al meridiano que pasa por la ciudad de Greenwich, tomando el nombre de dicha ciudad.

En total son 360 líneas, lo que equivale a 18 círculos completos. De esta manera se componen los 360 grados de longitud, partiendo desde la línea de longitud 00 hacia el este.

Las líneas de latitud están conformadas por 180 círculos paralelos y horizontales, siendo el círculo mayor el ubicado en la línea del ecuador denominada latitud cero grados.

De esta forma existen 90 hacia el hemisferio norte, denominados latitud positiva y 90 hacia el hemisferio sur, denominados latitud negativa.

Por lo tanto mediante la intersección de las coordenadas de latitud y longitud podremos localizar un punto que este sobre la superficie de la tierra.

En cuanto a un satélite, este se encuentra en el espacio, y su posición puede ser estimada con una Latitud, una Longitud y una altura. Dicha altura estará referida a un punto sobre la tierra que es la intersección de la recta que une al satélite con el centro de la tierra y la superficie terrestre.

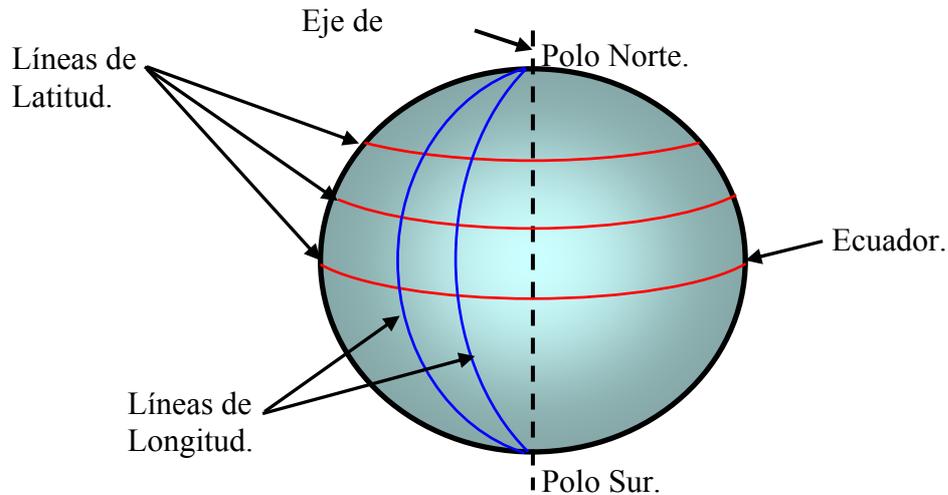


Figura 1.13 Líneas de Latitud y Longitud.

1.9.2.2 Ángulos de Vista.

Para orientar una antena desde una estación terrena hacia un satélite, es necesario conocer el ángulo de elevación y azimut (ver Figura 1.14). Estos se llaman ángulos de vista.

1.9.2.3 Angulo de elevación.

El ángulo de elevación es el ángulo formado entre la dirección de viaje de una onda radiada desde una antena de estación terrena y la horizontal, o el ángulo de la antena de la estación terrena entre el satélite y la horizontal. Entre más pequeño sea el ángulo de elevación, mayor será la distancia que una onda propagada debe pasar por la atmósfera de la Tierra. Como cualquier onda propagada a través de la atmósfera de la Tierra, sufre absorción y, también, puede contaminarse severamente por el ruido.

De esta forma, si el ángulo de elevación es demasiado pequeño y la distancia de la onda que está dentro de la atmósfera de la Tierra es demasiado larga, la onda puede deteriorarse hasta el grado que proporcione

una transmisión inadecuada. Generalmente, 5° es considerado como el mínimo ángulo de elevación aceptable.

La Figura 1.14 muestra como el ángulo de elevación afecta la intensidad de la señal de una onda propagada debido a la absorción atmosférica normal, absorción debida a neblina pesada, y absorción debida a fuerte lluvia. Puede observarse que la banda de 14/12 GHz (Figura 1.15a) es, severamente mas afectada que la banda de 6/4 GHz (Figura 1.15b). Esto se debe a las longitudes de onda más pequeñas asociadas con las frecuencias más altas. Además, en ángulos de elevación menores que 5°, la atenuación se incrementa rápidamente. [5]

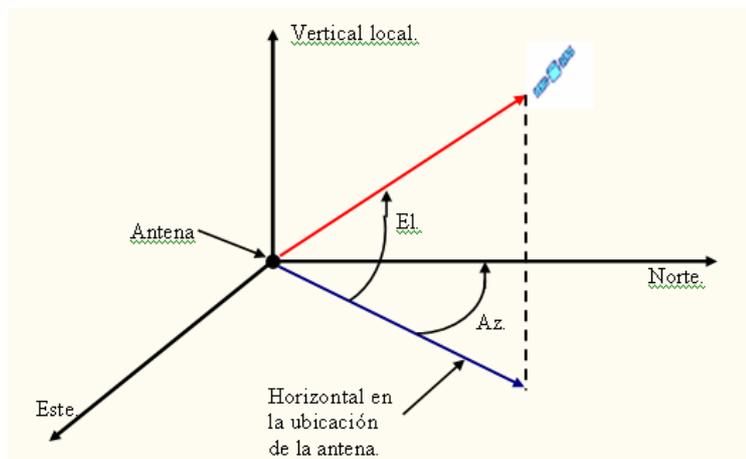


Figura 1.14 Ángulos de vista (Azimut y ángulo de elevación).

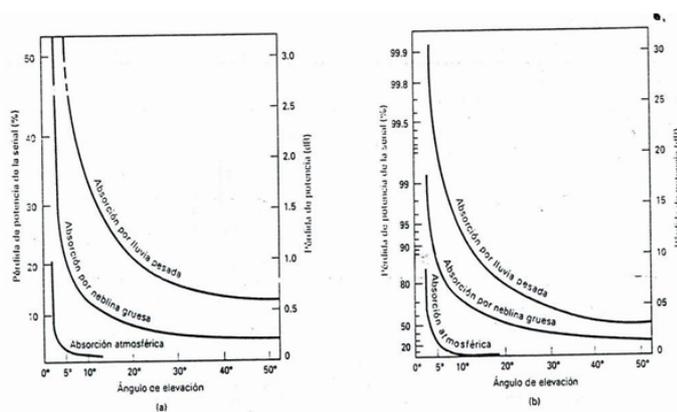


Figura 1.15 Atenuación debida a la absorción atmosférica: (a) banda de 6/4 GHz., (b) banda 14/12 GHz.

1.9.2.4 Azimut.

Azimut se define como el ángulo de apuntamiento horizontal de una antena. Se toma como referencia el Norte como cero grados, y si continuamos girando en el sentido de las agujas del reloj, hacia el Este, llegaremos a los 90° de Azimut.

Hacia el Sur tendremos los 180° de Azimut, hacia el Oeste los 270° y por último llegaremos al punto inicial donde los 360° coinciden con los 0° del Norte.

El ángulo de elevación y el azimut, dependen ambos, de la latitud de la estación terrena, así como el satélite en órbita.

Para un satélite geosíncrono, en una órbita ecuatorial, el procedimiento es el siguiente: de un buen mapa se determina la latitud y longitud de la estación terrestre, luego conociendo la longitud del satélite en interés, se calcula la diferencia (ΔL), entre la longitud del satélite y la longitud de la estación terrena. Entonces, de la Figura 1.16 determinamos el azimut y ángulo de elevación para la antena (ingresando al gráfico con la diferencia ΔL , y con la latitud de la estación terrena). [5]

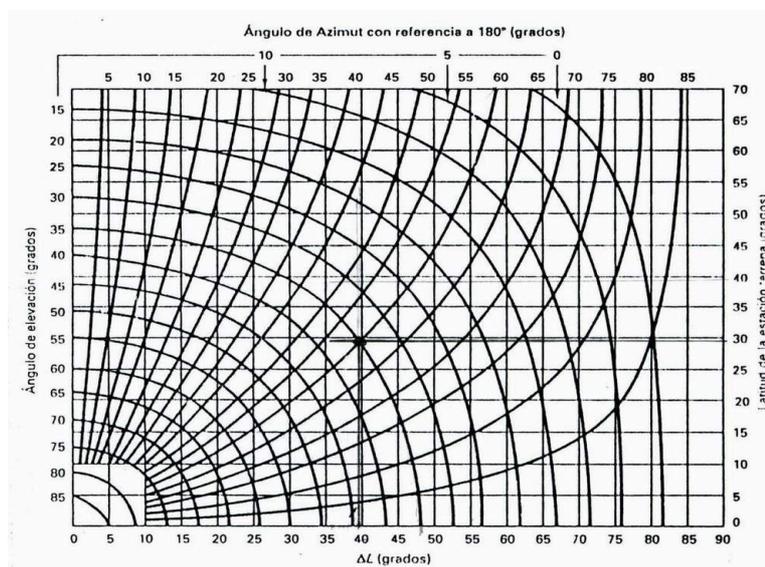


Figura 1.16 Azimut y ángulo de elevación para las estaciones terrenas situadas en el hemisferio norte (referidas a 180°).

[5] ver referencia bibliográfica, satellite communications...

1.10 Constitución de un sistema de satélites.

Establecer un sistema comercial para los servicios de comunicación por satélite implica un proyecto de gran magnitud que el momento actual requiere de la evaluación de la demanda potencial del mercado y de la cada vez más amplia competencia, no solo de otros medios de comunicación, sino de otros sistemas por satélite, análisis de las tendencias de desarrollo de los servicios, de la madurez de las tecnologías, de las opciones tecnológicas viables y de las fuentes de los recursos financieros, así como de un diseño adecuado del plan de negocios, entre otras cuestiones.

Hace 3 décadas el único sistema comercial de comunicación por satélites era el de la Organización Internacional de Comunicaciones por Satélite INTELSAT que se ha desarrollado en forma muy importante desde entonces y que aun constituye el sistema más grande con 20 o más satélites de gran capacidad en operación. En los últimos años los nuevos proyectos de sistemas satelitales han sido muy influidos por la generalización de lo que se ha venido denominando desregulación de los servicios, que abre considerablemente las posibilidades de participación de las empresas tecnológicas y operadoras privadas en la prestación de los servicios a nivel mundial.

En el caso de los servicios móviles de órbitas bajas en proyecto, todos ellos de cobertura mundial por propias razones, la cantidad de contendientes y la importancia de los proyectos hace prever que algunos de estos no podrán llegar a realizarse y algunos de los sistemas que logren iniciar operaciones tendrán un difícil desarrollo y enfrentaran altos riesgos. El éxito de los proyectos probablemente dependerá de una sola tecnología, de un plan económico con adecuadas características de sensibilidad, de una relativamente rápida integración y puesta en servicio y de una estructura de la inversión y control más aceptable desde en punto de vista político, ya que es necesaria la participación de empresas de múltiples países. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Un sistema de comunicación por satélite consta de uno o mas satélites, uno o mas centros de control de los mismos y estaciones terrenas que se comunican entre si a través de aquellos. Un sistema constituido por un solo satélite geostacionario, un centro de control y un número indeterminado de estaciones terrenas lo podremos observar en la siguiente figura.

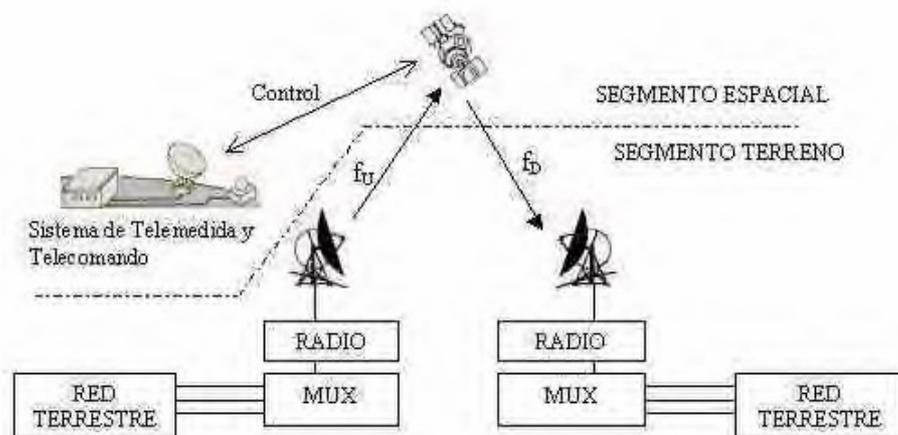


Figura 1.17 Sistema de comunicación vía satelital.

El satélite recibe señales de las estaciones terrenas, las convierte y las transmite a la zona o zonas de cobertura. Otras funciones incluyen la recolección de datos de su propio funcionamiento y su transmisión al centro de control mediante el subsistema de telemetría y el control y el control autónomo de diversas partes de los demás subsistemas. En un sistema más grande, si lo determinan los requisitos de diseño, pueden tener comunicación directa con otros satélites. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

MUX: ver glosario de términos.

El centro de control tiene como función principal vigilar el estado de todos los subsistemas del satélite y, mediante órdenes de control al satélite, conservar dentro de los valores tolerados todos los parámetros esenciales para su buen funcionamiento. Entre otros, deben conservarse dentro de tolerancia los parámetros de posición y apuntamiento del satélite mediante maniobras programadas. En caso de presentarse condiciones de falla, valores fuera de tolerancia y otras anormalidades, debe realizar diversas comprobaciones, y en caso necesario utilizar procedimientos de emergencia y reemplazar algunas de las funciones autónomas del satélite, con objeto de reestablecer las condiciones normales de operación. Además el centro de control tiene una variedad de funciones adicionales, como activar o modificar las configuraciones alternativas de operación respecto de conectividad y coberturas, estimar el combustible remanente en el satélite y generar información para los usuarios sobre riesgo próximo en las comunicaciones o sobre interferencia que se hayan presentado, opcionalmente, participar en las maniobras de la órbita de transferencia de los nuevos satélites del propio sistema o de otros sistemas después de ser liberados por el vehículo de lanzamiento de la estación lo permite, lo que es posible gracias a la capacidad, experiencia y extenso entrenamiento del personal con que cuenta. Todas las funciones las realiza por medio de una instalación compleja de equipos de cómputo, de medición, de registro, de análisis y de telemando, y de la estación terrena de telemetría, telemando y seguimiento (TT y S, en inglés TTAC). Los sistemas de satélites de órbitas diferentes a la geoestacionaria generalmente requieren de más de un centro de control. La función de las estaciones terrenas de tráfico es transmitir, recibir o transmitir y recibir señales de comunicación de o hacia otras estaciones a través del satélite. También pueden existir estaciones terrenas de control de red que principal o exclusivamente reciban y envíen señales de control para permitir la comunicación entre otras estaciones de una misma red. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Las estaciones de telemetría, telemando y seguimiento de los centros de control del sistema intercambian con los satélites señales que no están destinadas a otras estaciones. Por último, hay estaciones terrenas que por razones de operación, de economía o por otras circunstancias combinan algunas de las funciones mencionadas.

Un sistema de comunicación que opera por medio de un satélite tiene un segmento espacial y un segmento terreno. el segmento espacial esta formado por el satélite y su centro de control, mientras que el conjunto de estaciones terrenas de la red que se comunican entre si y a través de las cuales es posible la conexión con las redes terrenales, constituye el segmento terreno.

Los sistemas de comunicación por satélite pueden ser domésticos (nacionales) para servicio de un solo país, o internacionales, que incluyen los de servicio global a varios continentes y los regionales para proporcionar servicio a un numero restringido de países, aparte del aspecto de la estructura de propiedad del sistema, en el que en los últimos años se han abierto diversas opciones de participación en los proyectos de sistemas globales, con implicaciones a largo plazo aun no bien experimentadas.

Para establecer y operar un sistema comercial de comunicación por satélite es necesario cumplir un complicado proceso, con duración de varios años, que parte de un análisis inicial de alternativas para atender necesidades de telecomunicación de la visión empresarial de oportunidades de negocios y que en alguna etapa se formaliza al aprobarse el programa dentro de la organización promotora. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Regularmente, las etapas del programa incluyen lo siguiente:

- Planeación inicial del sistema con requisitos y especificaciones preliminares.
- Estudios de viabilidad técnica y económica, incluyendo la posibilidad de ocupar posiciones orbitales en la órbita geostacionaria, si es el caso.
- Investigación y evaluación de los últimos avances tecnológicos de posible aplicación al sistema en proyecto como alternativa a tecnologías maduras.
- Determinación de las características definitivas técnicas, de organización del sistema y sus servicios, y de estructura de la inversión
- Acopio de los recursos financieros
- Autorización inicial del programa por las agencia gubernamentales de comunicaciones del país sede, las cuales, si es el caso, deberán iniciar la entrega de la documentación pertinente a la UIT.
- Preparación y expedición de la solicitud de ofertas de los satélites y centro de control.
- Evaluación de las propuestas y negociación del contrato de suministro.
- Coordinación del programa con la organización de telecomunicaciones por satélite INTELSAT (en la mayoría de los casos) y con una organización operadora de un sistema regional si corresponde, y complementado de las gestiones ante la UIT para iniciar la coordinación con otros países.
- Coordinación técnica con los operadores de otros sistemas internacionales y nacionales, si es el caso.

- Preparación y expedición de la solicitud de ofertas de los servicios de lanzamiento, si no están incluidos en el contrato de suministro de los satélites.
- Evaluación de las propuestas de servicios de lanzamiento y negociación del contrato.
- Construcción de los satélites, obras civiles y demás elementos del sistema, así como suministro de los servicios requeridos.
- Desarrollo de los programas de entrenamiento y en su caso del de transferencia de tecnología.
- Lanzamiento, operaciones en la órbita de transferencia, pruebas en órbita y aceptación del sistema.
- Publicidad y comercialización.
- Iniciación de operación y desarrollo del programa de asistencia técnica.

Las etapas mencionadas anteriormente no corresponden necesariamente a la secuencia de un programa específico y algunas de ellas pueden realizarse en forma simultánea.

Desde la concepción del proyecto hasta la iniciación de la operación pueden transcurrir de 4 a 6 o más años, aunque excepcionalmente puede reducirse si un sistema se inicia mediante la adquisición de un satélite en operación o en tierra que puede ser excedente de otro sistema o de la cancelación de un pedido anterior a un fabricante aun cuando sus características técnicas no sean óptimas. También es posible arrendar temporalmente un satélite que se encuentra en órbita. La sola integración de un satélite comercial grande puede requerir entre 2 y 3 años, debido a que algunas de sus partes tienen tiempos de entrega de más de 1 año y a la complejidad tanto de la propia integración como de las pruebas de sus componentes y de la nave en su conjunto. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Aun cuando las etapas del proceso de ejecución del programa son similares a las de cualquier otro de gran importancia, el sistema mas sencillo incluye diversas instancias de gestión ante las mas altas autoridades gubernamentales en el área de comunicaciones de cuando menos un país, así como ante un mínimo de 2 organizaciones internacionales y la coordinación de algunos aspectos entre 2 o mas gobiernos nacionales. Estas gestiones no son un simple requisito burocrático y pueden requerir largo tiempo y presentar complicaciones, ya que están basadas en los riesgos de causar interferencias a otros servicios o de afectar intereses económicos o políticos en otros países. [1]

[1] ver referencia bibliográfica, comunicación por satélite...

Capítulo 2

Reseña de GPS.

En este capítulo se hace una reseña de GPS que nos muestra su proceso de evaluación, así como sus principales campos de aplicación y su tendencia

CAPITULO 2 RESEÑA DE GPS

2.1 ¿Dónde está?

Eran las 2:08 de la madrugada del 6 de junio de 1995 cuando un piloto de la fuerza aérea estadounidense que sobrevolaba en un caza F-16 las posiciones serbias de Bosnia-Herzegovina escuchó la llamada “Basher 52” a través de su radio. “Basher 52” era la señal de llamada de un piloto americano, el capitán Scott O’Grady, cuyo F-16 había sido abatido por las fuerzas serbias en esa misma área 4 días antes. Posteriormente, el piloto declaró que la señal de llamada de O’Grady resultó como escuchar una voz de ultratumba. Un misil tierra-aire serbio había alcanzado al F-16 de O’Grady y éste explotó de inmediato. Aunque el piloto, de 29 años de edad, consiguió saltar sano y salvo, el piloto que le seguía no vio salir ningún paracaídas de los restos llameantes. [6]



Figura 2.1 El piloto del F-16 americano capitán Scott F. O’Grady.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

O'Grady estuvo en tierra tras las líneas enemigas durante 4 días, alimentándose a base de hierbas e insectos, durmiendo durante el día bajo un nido de camuflaje y desplazándose por la noche.

Finalmente, se arriesgó a establecer contacto por radio con otros aviones, que verificaron su posición y avisaron a los marines, concretamente a la unidad expedicionaria de marines 24 y su grupo de expertos en recuperación táctica de personal de aeronaves o TRAP. Transcurridas 4 horas, el equipo de búsqueda y rescate el había despegado del USS Kearsarge en el mar Adriático con dirección Bosnia. A las 6:50 a.m. ya habían rescatado a O'Grady mediante un espectacular rescate clásico, habían hecho frente a los ataques serbios y se dirigían de vuelta a casa. Posteriormente, ese mismo día en Alexandria, Virginia, se informaba a William O'Grady, el padre del joven piloto, que su hijo estaba vivo y fuera de peligro.

La prensa aclamaba a O'Grady como un héroe y el propio O'Grady atribuía el mérito y daba las gracias a los marines que "arriesgaron sus vidas para salvarme". Pero fue otro factor el que permitió a los marines desempeñar ese papel fundamental en la operación de rescate con una precisión milimétrica. Cuando O'Grady saltó del avión, su chaleco salvavidas disponía de un receptor de radio portátil sintonizado con una red de 24 satélites conocida como GPS. O'Grady pudo determinar su posición tras las líneas enemigas (longitud, latitud y altitud) con una precisión de metros y, a continuación, notificó esa posición a los pilotos de las fuerzas aéreas que le sobrevolaban y a los marines que acudieron en su ayuda. Uno no puede dejar de preguntarse si O'Grady y los que le rescataron eran conscientes de que parte de la tecnología que posibilitó este notable rescate se había desarrollado a partir de investigaciones básicas sobre las propiedades fundamentales de los átomos y los núcleos realizadas unos 60 años antes.[6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

2.2 Tiempo y posición, con precisión.

Gracias al GPS se puede contestar una pregunta tan simple como “¿Dónde estoy?” de forma casi inmediata y con una precisión sorprendente. La novedosa tecnología utiliza relojes atómicos que marcan el tiempo con una precisión de un nanosegundo. Estos relojes fueron creados por científicos que no podían imaginar que en el futuro formarían parte de un sistema global de navegación. El sistema se utilizó por primera vez durante la Guerra del Golfo de 1991 y obtuvo críticas muy favorables. Las tropas estadounidenses lo utilizaron para orientarse en tierra, mar y aire, localizar el objetivo de las bombas y orientar los misiles de a bordo. El GPS permitió a las tropas terrestres estadounidenses moverse con rapidez y precisión a través del vasto y monótono desierto de la Península Arábiga.

Desde entonces, la tecnología GPS se ha trasladado al sector civil. Hoy en día, el GPS permite salvar vidas, sirve de ayuda a la sociedad de muchísimas otras maneras y genera puestos de trabajo en una nueva industria que mueve miles de millones de dólares. Los avances conseguidos en la tecnología de circuitos integrados (la tecnología que se utiliza para crear los chips informáticos) muy pronto permitirá construir transmisores y receptores GPS del tamaño de una tarjeta de crédito, tan pequeños y accesibles que prácticamente todos los vehículos y personas podrán disponer de uno.[6]

En tan sólo unos pocos años, las aplicaciones del GPS son prácticamente ilimitadas:

- Los vehículos de emergencia utilizan el GPS para ubicar con exactitud los destinos y trazar rutas.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

- El GPS se utiliza para localizar embarcaciones perdidas en el mar.

- Los servicios de transporte utilizan GPS para realizar un seguimiento de su flota y acelerar las entregas.

- Las compañías de transporte equipan los buques cisterna y cargueros con GPS para su navegación, así como para registrar y controlar los movimientos de las embarcaciones.

- Los propietarios de embarcaciones de recreo y pequeños vehículos comerciales confían en el GPS para la navegación.
- Los pilotos civiles utilizan GPS para la navegación, fumigación aérea, topografía y fotografía aérea.

- Al utilizar la tecnología GPS para elaborar los planes de vuelo, las líneas aéreas ahorran millones de dólares. Los GPS se pueden utilizar para el aterrizaje instrumental, tanto en aeropuertos grandes como pequeños, y hacen posible la creación de nuevos sistemas de elusión aérea.

- La tecnología GPS se usa habitualmente para realizar mapas, mediciones de tierra y en topografía. El GPS se ha utilizado para realizar mapas de carreteras, seguimiento de incendios forestales y para guiar las hojas de los bulldozers en los procesos de construcción, consiguiendo un grado de precisión de centímetros.

- Los científicos que estudian la Tierra utilizan la tecnología GPS para monitorizar los terremotos y los movimientos de las placas tectónicas terrestres.

- Las compañías de telecomunicaciones confían cada vez más en el uso de GPS para sincronizar sus redes digitales terrestres mediante la comparación directa de sus relojes de referencia con la hora del GPS.

- Los fabricantes de satélites utilizan receptores GPS para realizar un seguimiento de las posiciones de los satélites.
- En los automóviles se están instalando GPS para que los conductores puedan saber dónde están y a la vez recibir indicaciones de dirección. En Japón, 500.000 automóviles ya incorporan un sistema de navegación basado en GPS.

Esto es sólo el principio. El mercado mundial actual de la tecnología y receptores GPS se estima en más de 2.000 millones de dólares, y se espera un crecimiento hasta más de 30.000 millones de dólares durante los próximos 10 años. [6]



Aunque originalmente se concibió como una herramienta de navegación para uso militar, el sistema de posicionamiento global se ha trasladado a muchas otras aplicaciones comerciales creando una industria que se prevé alcance 30.000 millones de dólares en ingresos anuales durante la próxima década: en la fotografía, un dispositivo de localización incorporado para automóviles. (Trimble Navigation, Ltd.)

Figura 2.2 Aplicación de la tecnología GPS.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

2.3 Comenzó con una investigación básica...

La historia del GPS demuestra cómo una investigación básica hizo posible en primer lugar el desarrollo de una tecnología de defensa vital y posteriormente una gran variedad de aplicaciones comerciales. Existen muchos otros avances tecnológicos que han contribuido al desarrollo del GPS, entre los que podemos mencionar las tecnologías de control y lanzamiento de satélites, los dispositivos de estado sólido, los microchips, los circuitos de correlación, la tecnología de diferencia de tiempo de llegada, la tecnología de microondas y la radionavegación. Este relato se centra en cómo la búsqueda del conocimiento de la naturaleza del mundo atómico, concretamente, en la creación de relojes atómicos para estudiar las teorías de Einstein y la relatividad, condujo a la creación de relojes de gran precisión, y cómo dichos relojes se pusieron en funcionamiento posteriormente junto con la tecnología de seguimiento de satélites para satisfacer el deseo humano básico de saber dónde estamos y adónde vamos.

Durante siglos, la única forma de orientarse era observar la posición del sol y las estrellas y realizar una estimación. Incluso después del desarrollo de los relojes modernos, que permitían averiguar la longitud, los instrumentos más precisos podían obtener una posición con una exactitud de varias millas solamente. Sin embargo, en el momento en que la Unión Soviética lanzó el Sputnik el 4 de octubre de 1957, se supo que era posible utilizar esta "estrella artificial" como una herramienta de navegación. La noche siguiente, los investigadores del laboratorio Lincoln del Instituto tecnológico de Massachusetts (MIT) pudieron determinar con precisión la órbita del satélite, al observar cómo la frecuencia aparente de la señal de radio aumentaba al acercarse y disminuía al alejarse, efecto que se conoce como efecto Doppler. Al probar que es posible determinar con precisión la órbita de un satélite desde la tierra, se dio el primer paso para establecer la posibilidad de determinar las posiciones en la tierra mediante la localización de señales emitidas por satélites.[6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

Durante los años siguientes, la marina estadounidense realizó experimentos con una serie de sistemas de navegación por satélite, que comenzó en 1965 con el sistema Transit, desarrollado para satisfacer las necesidades de navegación de los submarinos que transportaban misiles nucleares Polaris. Estos submarinos debían permanecer ocultos y sumergidos durante varios meses, pero el sistema de navegación basada en giroscopio, conocido como navegación inercial, no podría mantener su precisión durante períodos tan largos. El sistema Transit estaba formado por media docena de satélites que girarían alrededor de la tierra continuamente en órbitas polares. Al analizar las señales de radio transmitidas por los satélites; es decir, al medir el efecto Doppler de las señales, un submarino podía determinar su ubicación con precisión en un período de 10 ó 15 minutos. En 1973, el Departamento de defensa intentaba descubrir un método infalible para la navegación por satélite. Durante una reunión para poner ideas en común realizada el fin de semana del día del Trabajo en el Pentágono, se desarrolló el concepto de GPS, basado en la experiencia del departamento con todos los satélites anteriores. Los componentes esenciales del GPS son los 24 satélites Navstar fabricados por Rockwell International. Cada uno de estos satélites tiene el tamaño de un vehículo de gran tamaño y pesa alrededor de 1.900 libras (900 kilogramos). Todos los satélites giran alrededor de la tierra cada 12 horas en una formación tal que cada punto del planeta siempre se encontrará en contacto por radio con 4 satélites como mínimo. El primer satélite GPS en funcionamiento se lanzó en 1978 y el sistema alcanzó su capacidad completa de 24 satélites en 1993. [6]



Veinticuatro satélites Navstar, del tamaño de un automóvil y unas 1.900 libras (900 kilos) de peso, giran alrededor de la tierra en órbitas de 18.000 kilómetros de altura. El sistema de satélites, construido por Rockwell International y operado por la Fuerza Aérea estadounidense, se completó en 1993, 20 años después de ser concebido en el Pentágono. (Lockheed Martin Astro Space)

Figura 2.3 Satélites Navstar.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

Si consideramos lo extremadamente sofisticada que es la tecnología, el principio de funcionamiento del GPS resulta extraordinariamente simple. Cada uno de los satélites transmite de forma continua una señal de radio digital que incluye su propia posición y la hora, con una precisión de un nanosegundos. Un receptor de GPS capta esta información, procedente de cuatro satélites, y la utiliza para calcular su posición en el planeta con una precisión de metros. El receptor compara su hora y la hora que ha enviado el satélite y utiliza la diferencia entre ambas horas para calcular su distancia con respecto al satélite. (La luz viaja a una velocidad de 300.000 kilómetros por segundo: si, por ejemplo, la hora del satélite es una centésima de segundo anterior a la hora del receptor GPS, los cálculos del receptor indicarán que se encuentra a 300 kilómetros del satélite.) Al contrastar su hora con la de tres satélites de posiciones conocidas, el receptor podrá ubicar con exactitud su longitud, latitud y altitud.

Para emplear el método descrito anteriormente es necesario que tanto los satélites como el receptor dispongan de relojes de gran precisión. Sin embargo, el hecho de que el receptor capte la señal de un cuarto satélite, le permite conseguirlo con un reloj de cuarzo relativamente simple, como el que se utiliza en la mayoría de los relojes de pulsera. Una vez que el receptor ha contactado con cuatro satélites, el sistema toma el control y computa su posición de forma casi instantánea.

Para que el sistema funcione, es necesario que el receptor sepa la posición exacta de los satélites y que éstos puedan mantener la hora con una precisión extraordinaria y fiable. Dicha precisión se consigue mediante la incorporación de cuatro relojes atómicos en cada satélite, estos relojes constituyen los dispositivos para medir el tiempo más precisos jamás contruidos. La fiabilidad se consigue mediante las órbitas de 18.000 kilómetros de altura de los satélites, que los aleja de la atmósfera y los mantiene en movimiento a lo largo de trayectorias muy previsibles. El Departamento de defensa realiza un seguimiento de los satélites según sobrevuelan dos veces al día y realiza una medición precisa de su velocidad, posición y altitud. Esta información se vuelve a enviar a los satélites y éstos la transmiten junto con sus señales de tiempo. [6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

2.4 Una herramienta para estudiar la naturaleza.

El GPS se concibió como una herramienta militar, pero los relojes atómicos que lo hicieron posible se originaron en una investigación básica realizada poco antes de la Segunda Guerra Mundial. En aquel tiempo, los científicos descubrieron que las técnicas de gran precisión desarrolladas para estudiar la estructura atómica fundamental podían utilizarse para construir un reloj atómico. Esta genial idea no estaba relacionada lo más mínimo con la navegación ultraprecisa, si no con el sueño de crear un reloj lo suficientemente bueno para estudiar la naturaleza del tiempo en sí mismo y, en particular, el efecto de la gravedad sobre el tiempo que Einstein había predicho en su teoría de la gravedad, conocido como corrimiento al rojo gravitacional.

Hasta finales de la década de 1920, los relojes de mayor precisión se basaban en la oscilación regular de un péndulo. Fueron desbancados por unos relojes de mayor precisión basados en las vibraciones regulares de un cristal de cuarzo, que tenían un margen de error inferior a una milésima de segundo al día. Pero esta gran precisión tampoco era suficiente para los científicos que deseaban estudiar la teoría de la gravedad de Einstein. Según Einstein, un campo gravitacional podía deformar el espacio y el tiempo. Por lo tanto, si, por ejemplo, se situase un reloj en la cima del Everest, éste avanzaría al día 30 millonésimas de segundo más rápido que un reloj idéntico situado al nivel del mar. La única forma posible de realizar mediciones con este grado de precisión consistía en controlar el reloj mediante las oscilaciones infinitesimales del propio átomo. [6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

2.5 El reloj de Rabi.

De acuerdo con las leyes de la física cuántica, los átomos absorben o emiten energía electromagnética en cantidades diferenciadas que se corresponden con las diferencias de energía entre las distintas configuraciones de electrones de los átomos, es decir, las distintas configuraciones de electrones que rodean sus núcleos. Cuando un átomo sufre una transición de un “estado de energía” a otro más bajo, emite una onda electromagnética con una frecuencia característica discreta, conocida como frecuencia de resonancia. Esta frecuencia de resonancia es idéntica en todos los átomos de un tipo determinado; por ejemplo, todos los átomos de cesio 133 tienen una frecuencia de resonancia de exactamente 9.192.631.770 ciclos por segundo. Por esta razón, es posible utilizar un átomo de cesio como metrónomo que proporcione la hora con extraordinaria precisión.

El primer progreso sustancial en el desarrollo de un reloj basado en dicho cronómetro atómico se consiguió durante la década de 1930 en un laboratorio de la Universidad de Columbia, en el que I.I. Rabi y sus alumnos estudiaban las propiedades fundamentales de átomos y núcleos. Durante el transcurso de esta investigación, Rabi inventó la técnica conocida como resonancia magnética, que permitía medir las frecuencias de resonancia naturales de los átomos. Rabi recibió por su trabajo el premio Nobel en 1944. En ese mismo año, Rabi sugirió (o, como dijeron sus estudiantes, “dejó caer la idea”) por primera vez que la precisión de estas resonancias era tal que podrían utilizarse para crear un reloj de extrema fiabilidad. Concretamente, propuso el uso de las frecuencias del tipo conocido como “transiciones hiperfinas” de los átomos, que son transiciones entre dos estados de energías ligeramente diferentes que se corresponden a distintas interacciones magnéticas entre el núcleo de un átomo y sus electrones.

En este tipo de reloj, un haz de átomos con un estado hiperfino determinado atraviesa un campo electromagnético oscilante. [6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

Cuanto más próxima esté la frecuencia de oscilación del campo a la frecuencia de la transición hiperfina del átomo, habrá mayor cantidad de átomos que absorban la energía del campo y, por lo tanto, sufrirán una transición del estado hiperfino original al otro. Un bucle de retroalimentación ajusta la frecuencia del campo oscilante hasta que prácticamente todos los átomos realicen la transición. El reloj atómico emplea la frecuencia del campo oscilante, que ahora se encuentra perfectamente sincronizada con la frecuencia de resonancia exacta de los átomos, como metrónomo para generar impulsos de tiempo.

Rabi no perseguía el desarrollo de un reloj de este tipo, pero hubo otros investigadores que continuaron el estudio para mejorar la idea y perfeccionar la tecnología necesaria. En 1949, por ejemplo, la investigación llevada a cabo por Norman Ramsey, alumno de Rabi, sugirió que si se hacía que los átomos atravesaran el campo magnético oscilante dos veces, se podría obtener un reloj mucho más preciso. Ramsey recibió el premio Nobel por su trabajo en 1989. [6]

2.6 Aplicaciones prácticas.

Después de la guerra, el National Bureau of Standards (oficina nacional de normalización) de EE.UU. y el British National Physical Laboratory (laboratorio nacional de física británico) intentaron crear los estándares de la hora atómica basándose en el trabajo sobre la resonancia atómica realizado por Rabi y sus alumnos. El primer reloj atómico fue creado por Louis Essen y John V.L Parry en el National Physical Laboratory, pero para albergar este reloj era necesaria una habitación llena de equipos. Otro de los antiguos colaboradores de Rabi, Jerrold Zacharias, del MIT, consiguió convertir los relojes atómicos en dispositivos prácticos. Zacharias planeaba construir lo que denominaría una fuente atómica, un tipo visionario de reloj atómico que sería lo suficientemente fiable para estudiar el efecto de la gravedad sobre el tiempo que había predicho Einstein.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

Durante el proceso desarrolló un reloj atómico lo suficientemente pequeño como para transportarse de un laboratorio a otro. En 1954, Zacharias se unió a la National Company de Malden, Massachusetts, para construir un reloj atómico comercial basado en su dispositivo portátil. La compañía fabricó el Atomichron, el primer reloj atómico comercial, 2 años después y vendió 50 en 4 años. Todos los relojes atómicos de cesio que se utilizan actualmente en sistemas GPS descienden del Atomichron.

Los físicos continúan experimentando con nuevas variaciones de las ideas sobre la resonancia atómica de Rabi y sus alumnos, y las ponen en práctica en los relojes atómicos. Existe una técnica que, en vez de utilizar imanes, hace uso de un fenómeno conocido como bombeo óptico para seleccionar los niveles de energía de los átomos encargados de registrar la hora y emplea un haz de luz para conseguir que todos los átomos del haz alcancen el estado deseado. Alfred Kastler, del Ecole Normal Supérieure de París, obtuvo por este trabajo el premio Nobel. Hoy en día, existen muchos relojes atómicos que utilizan átomos de rubidio bombeados de forma óptima en lugar de cesio. Los relojes de rubidio resultan bastante más baratos y pequeños que los relojes de cesio, aunque no son tan precisos.

Otro tipo de reloj atómico es el conocido como máser de hidrógeno. El máser se originó durante la investigación que Charles Townes y sus colegas de la Universidad de Colombia realizaron sobre la estructura de las moléculas en 1954, trabajo por el que Townes compartió el premio Nobel de física en 1964. El máser, precursor del láser, es un dispositivo de microondas que genera su señal mediante la emisión directa de la radiación procedente de átomos o moléculas. Mientras que el máser original de Townes empleaba amoníaco, Ramsey y sus colegas de Harvard desarrollaron un máser en 1960 que funcionaba con hidrógeno y podía utilizarse como un reloj atómico de extrema precisión.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

En 1967, las investigaciones realizadas sobre los relojes atómicos ya habían resultado tan fructíferas que el segundo se volvió a definir en función de las oscilaciones de un átomo de cesio. Hoy en día, los relojes atómicos suelen tener un margen de error inferior a 1 segundo cada 100.000 años. El principal estándar horario de nuestro país es el recién inaugurado reloj atómico que se encuentra en el National Institute of Standards and Technology (Instituto nacional de normalización y tecnología), denominado NIST-7. Tiene un margen de error estimado inferior a 1 segundo en 3 millones de años.

Durante años, estos tres tipos de relojes (el reloj de haz de cesio, el de máser de hidrógeno y el de rubidio) se han utilizado en el espacio, ya sea en satélites o en sistemas de control terrestres. En última instancia, los satélites GPS se basan en relojes de cesio semejantes a aquéllos que Rabi ideó hace 60 años.

En 1993, 2 décadas después de su concepción en el Pentágono, el GPS pasó a ser completamente funcional con la puesta en órbita de su vigesimocuarto satélite. La Fuerza aérea estadounidense se encarga de dirigir y controlar estos satélites desde 5 estaciones terrestres repartidas por todo el mundo. Los datos obtenidos se analizan en el Air Force Consolidated Space Operations Center (Centro de operaciones espaciales de la Fuerza aérea) de Colorado, que se encarga de transmitir diariamente actualizaciones a cada uno de los satélites para corregir sus relojes y datos orbitales. [6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

2.7 GPS y el futuro.

En ocasiones, nos olvidamos de que el GPS sigue siendo un dispositivo militar construido por el Departamento de defensa que costó 12.000 millones de dólares y fue diseñado para uso militar principalmente. Este hecho ha desencadenado varias polémicas respecto al exitoso sistema. Al igual que sucede con cualquier otra tecnología, el progreso conlleva riesgos y el GPS podría beneficiar a contrabandistas, terroristas y fuerzas enemigas. El Pentágono sólo accedió a poner a disposición el sistema GPS para uso comercial tras ser presionado por las compañías que construyeron los equipos y vieron el enorme potencial de mercado. Sin embargo, se acordó que el Pentágono desarrollara una política conocida como disponibilidad selectiva, por la que las señales de mayor precisión emitidas por los satélites del GPS quedan estrictamente reservadas para militares y otros usuarios autorizados. En la actualidad, los satélites GPS emiten dos tipos de señales: una señal civil, con una precisión de hasta 30 metros, y una segunda señal que únicamente pueden decodificar los militares y que tiene una precisión de 18 metros. Además, el Pentágono se reserva el derecho a introducir errores en cualquier momento en la señal civil para reducir su precisión a unos 90 metros.

En marzo de 1996, la Casa Blanca anunció que se pondría a disposición de todo el mundo un nivel mayor de precisión GPS y que la degradación de las señales GPS civiles dejaría de llevarse a cabo dentro de una década. Además, la Casa Blanca reafirmó el compromiso del gobierno federal de proporcionar servicios de GPS para uso civil, comercial y científico en todo el mundo y de forma gratuita.

El futuro del GPS parece no tener límites y abundan las fantasías tecnológicas. El sistema proporciona una dirección disponible nueva, única e instantánea para cada metro cuadrado de la superficie del planeta: un nuevo estándar internacional que permite determinar ubicaciones y distancias. Al menos para las computadoras de todo el mundo, nuestras direcciones

pueden no estar determinadas por una calle, una ciudad y un estado, si no mediante una longitud y latitud. Con la ubicación GPS de servicios almacenados con números de teléfonos en las "páginas amarillas" informatizadas, será posible buscar en un instante un restaurante local o la estación de servicio más cercana en cualquier población. Gracias al sistema GPS, el mundo dispone de una tecnología sin límites, nacida en los laboratorios de científicos motivados por su propia curiosidad para comprender la naturaleza del universo y de nuestro mundo, basada en los resultados de investigaciones básicas realizadas con apoyo público. [6]

2.8 Cronología.

Este esquema cronológico de eventos seleccionados enfatiza las primeras investigaciones realizadas en física, especialmente los relojes atómicos, que contribuyeron al desarrollo del sistema de posicionamiento global GPS e ilustra el gran valor de este tipo de tales investigaciones básicas a largo plazo en la consecución última de importantes beneficios para la sociedad. No constituye un retrato completo del desarrollo del GPS.

1938-1940

I.I. Rabi inventa la resonancia magnética de haz molecular en la Universidad de Columbia en 1938. Él sus colegas aplican la resonancia magnética a los estudios fundamentales de átomos y moléculas. Se plantea la posibilidad de construir un reloj atómico para medir el corrimiento al rojo gravitacional. Rabi recibe el premio Nobel en 1944 por este trabajo.

1949

Norman Ramsey inventa el método de resonancia del campo oscilante separado en la Universidad de Harvard, por el que se le concedió el Premio Nobel en 1989. Jerrold Zacharias proponer utilizar el método de Ramsey para crear un reloj atómico de "fuente" de haz de cesio con la precisión suficiente para medir el corrimiento al rojo gravitacional.

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

1949

La oficina National Bureau of Standards pone en funcionamiento un reloj atómico basado en la absorción de microondas del gas amoníaco. Comienzan los trabajos sobre el reloj atómico de haz de cesio.

1954

Charles Townes, en la Universidad de Columbia, demuestra el funcionamiento del primer máser basado en la emisión de la radiación procedente de las moléculas de amoníaco. Townes compartió el premio Nobel de física en 1964.

1954-1956

Zacharias y la empresa National Company desarrollan el primer reloj atómico portátil independiente: el Atomichron.

1957

La Unión Soviética pone en órbita en octubre el Sputnik. Se inaugura el seguimiento Doppler por satélite en el laboratorio Lincoln del MIT y en diciembre se pone en marcha el programa Navy Transit en el laboratorio de física aplicada de la Universidad Johns Hopkins

1959

Albert Kastler y Jean Brossel, que se encontraban trabajando en París y en el MIT, desarrollan métodos de bombeo óptico. Kastler recibió el premio Nobel por este trabajo.

1960

Ramsey y los estudiantes Kleppner y Goldenberg ponen en funcionamiento un máser de hidrógeno en la universidad de Harvard.

1960-1965

Se presenta un reloj de rubidio bombeado ópticamente. Se instalan los estándares de frecuencia del cesio en la mayoría de los laboratorios de estandarización del tiempo.

1964-1965

Se computa la primera posición fija desde un satélite Transit a bordo de un submarino Polaris.

1967

El sistema Transit se pone a disposición de la comunidad civil.

1968

Se definen los estándares de un sistema de navegación por satélite de defensa.

1973

El Departamento de defensa aprueba el desarrollo del GPS Navstar.

1974

Se lanza el primer satélite de prueba de GPS, que pertenece al programa Timation, para probar los relojes de rubidio y las técnicas de diseminación del tiempo.

1977

Se lanza un satélite de prueba que incorpora las principales características de los satélites GPS más recientes, entre las que se incluyen los primeros relojes de cesio en el espacio.

1978-1985

Se ponen en órbita diez prototipos de satélites GPS, fabricados por Rockwell International.

1989-1993

Se realiza el lanzamiento de la serie de 24 satélites, con una media de 6 al año. El lanzamiento del último satélite se realiza el 26 de junio de 1993.

1996

La Casa Blanca anuncia un mayor nivel de precisión del GPS disponible para todo el mundo. [6]

[6] ver referencia bibliográfica, beyond discovery...

Capítulo 3

COMO FUNCIONA GPS.

En el siguiente capítulo se desarrolla el funcionamiento de GPS, también se modela matemáticamente para analizar mejor el sistema

COMO FUNCIONA GPS

3.1 triangulación desde los satélites.

Aunque pueda parecer improbable, la idea general detrás del GPS es utilizar los satélites en el espacio como puntos de referencia para ubicaciones aquí en la tierra.

Esto se logra mediante una muy, pero muy exacta, medición de nuestra distancia hacia tres satélites, lo que nos permite "triangular" nuestra posición en cualquier parte de la tierra.

Consideremos primero como la medición de esas distancias nos permiten ubicarnos en cualquier punto de la tierra.

La gran idea, Geométricamente, es:

Supongamos que medimos nuestra distancia al primer satélite y resulta ser de 11.000 millas (20.000 Km.)

Sabiendo que estamos a 11.000 millas de un satélite determinado no podemos, por lo tanto, estar en cualquier punto del universo sino que esto limita nuestra posición a la superficie de una esfera que tiene como centro dicho satélite y cuyo radio es de 11.000 millas. [7]



Figura 3.1 Triangulación desde los satélites, 1.

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

A continuación medimos nuestra distancia a un segundo satélite y descubrimos que estamos a 12.000 millas del mismo.

Esto nos dice que no estamos solamente en la primer esfera, correspondiente al primer satélite, sino también sobre otra esfera que se encuentra a 12.000 millas del segundo satélite. En otras palabras, estamos en algún lugar de la circunferencia que resulta de la intersección de las dos esferas.

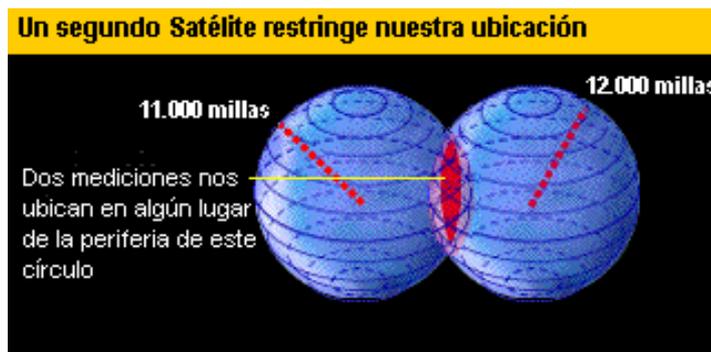


Figura 3.2 Triangulación desde los satélites, 2.

Si ahora medimos nuestra distancia a un tercer satélite y descubrimos que estamos a 13.000 millas del mismo, esto limita nuestra posición aún más, a los dos puntos en los cuales la esfera de 13.000 millas corta la circunferencia que resulta de la intersección de las dos primeras esferas.[7]

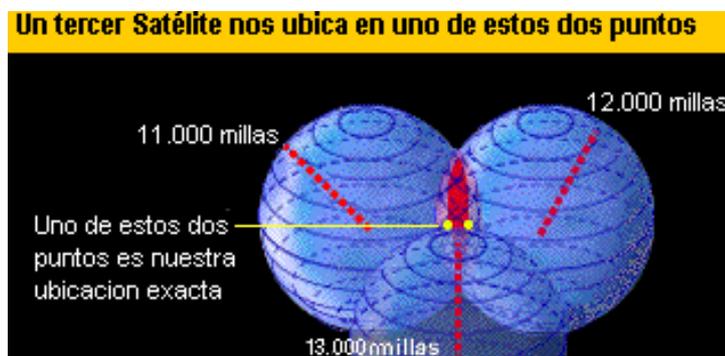


Figura 3.3 Triangulación desde los satélites, 3.

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

O sea, que midiendo nuestra distancia a tres satélites limitamos nuestro posicionamiento a solo dos puntos posibles.

Para decidir cual de ellos es nuestra posición verdadera, podríamos efectuar una nueva medición a un cuarto satélite. Pero normalmente uno de los dos puntos posibles resulta ser muy improbable por su ubicación demasiado lejana de la superficie terrestre y puede ser descartado sin necesidad de mediciones posteriores.

Una cuarta medición, de todos modos es muy conveniente por otra razón que veremos mas adelante.

Veamos ahora como el sistema mide las distancias a los satélites.

Resumen: Triangulación

- Nuestra posición se calcula en base a la medición de las distancias a los satélites
- Matemáticamente se necesitan cuatro mediciones de distancia a los satélites para determinar la posición exacta
- En la práctica se resuelve nuestra posición con solo tres mediciones aplicando el sentido común.
- Se requiere de todos modos una cuarta medición por razones técnicas que luego se verán. [7]

3.2 Midiendo las distancias a los satélites.

Sabemos ahora que nuestra posición se calcula a partir de la medición de la distancia hasta por lo menos tres satélites. Pero, ¿cómo podemos medir la distancia hacia algo que está flotando en algún lugar en el espacio? Lo hacemos midiendo el tiempo que tarda una señal emitida por el satélite en llegar hasta nuestro receptor de GPS. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.2.1 Descripción lógica del método.

Toda la idea gira alrededor de aquellos problemas sobre la velocidad que resolvíamos en la secundaria, Recordemos que "Si un auto viaja a 60 kilómetros por hora durante dos horas, ¿qué distancia recorrió?

Velocidad (60 Km./h) x Tiempo (2 horas) = Distancia (120 Km.).

En el caso del GPS estamos midiendo una señal de radio, que sabemos que viaja a la velocidad de la luz, alrededor de 300.000 Km. por segundo.

Nos queda el problema de medir el tiempo de viaje de la señal (Que, obviamente, viene muy rápido).

A continuación se desarrolla matemáticamente para poder observar como se modela y como se lleva acabo.

Para hallar la solución numérica debemos definir los parámetros de este método.

La triangulación es usada por los GPS's para la ubicación de un punto en la tierra conociendo la ubicación de 4 satélites (S1, S2, S3, S4) y las respectivas distancias (d1, d2, d3, d4) de los satélites al punto buscado (P0).

Paso 1

El GPS envía una señal de radio al primer satélite y este a su vez traza imaginariamente una esfera con centro en las coordenadas de S1 (x1, y1, z1) y radio d1, y supone que el punto se encuentra dentro de esa esfera como ya se había mencionado anteriormente.

Paso 2

Luego el GPS envía una señal de radio al segundo satélite y este traza una segunda esfera con centro en S2 (x2, y2, z2) y radio d2 y determina que el punto se encuentra dentro del círculo que se forma de la intersección de las esferas S1 y S2. como se muestra en la figura 3.2

Paso 3

Luego el GPS hace lo propio con el tercer satélite y este traza una tercera esfera con centro en S3 (x3, y3, z3) y radio d3 la cual, al interceptarla con el círculo ya encontrado nos dará dos posibles puntos como solución. Ver figura 3.3

Paso 4

Por ultimo el GPS manda una ultima señal al cuarto Satélite el cual trazara una cuarta esfera desde S4 (x4, y4, z4) y radio d4 de donde se hallara el punto P0 de coordenadas (x0, y0, z0) con lo cual se encontrara así el punto buscado.

Determinación de las distancias d1, d2, d3, d4

Para determinar las distancias del GPS a los 4 satélites se usa una a de las reglas del movimiento rectilíneo uniforme diferencial

$$d_i = t * c \pm \Delta$$

Donde

t = Diferencia de reloj entre los puntos (tiempo de viaje de la señal)

c= Velocidad de las ondas electromagnéticas, en este caso de radio que es la misma que la de la luz(c=299,792.458 m/s).

Δ = Error que se admite ya que la señal no viaja en el vacío.

SOLUCIÓN

Claro que Lehman nos da una especie de ayuda en su capítulo de circunferencia al hallar la circunferencia que pasa por la intersección de dos circunferencias, claro sin decir exactamente en que puntos se intersecan estas.

Si intentamos resolver el problema tal y como se describe, como primer paso se definiría la ecuación de 4 esferas con centro el S1, S2, S3, S4 y sería así:

$$E1: (x - x1)^2 + (y - y1)^2 + (z - z1)^2 = d1^2$$

$$E2: (x - x2)^2 + (y - y2)^2 + (z - z2)^2 = d2^2$$

$$E3: (x - x3)^2 + (y - y3)^2 + (z - z3)^2 = d3^2$$

$$E4: (x - x4)^2 + (y - y4)^2 + (z - z4)^2 = d4^2$$

Luego intentaremos interceptar $E1 \cap E2$ nos encontraremos con la ecuación de una circunferencia con términos en xy , yz , y xz y ya que no sabríamos los ángulos directores de la circunferencia engendrada y si a su vez se intentase interceptar esta circunferencia con $E3$ de esta forma sería más difícil, así que buscaremos una solución más hábil para este problema.

Esta solución la hallaremos con la ayuda de la mano siempre oportuna del álgebra vectorial, así que definamos la solución.

Primero debemos de conocer ciertos conceptos que nos ayuden a encontrar una relación entre los vectores, lo cual nos permita encontrar el punto buscado.

Una de las cosas que debemos saber es que los satélites orbitan a 20000 Km. de la tierra ósea que a su vez ellos están navegando en una esfera, ahora suponiendo que el centro de la tierra es el origen de coordenadas y que la esfera que contiene a los satélites tiene un radio dado (podemos poner el valor de 20000 si deseamos) que llamaremos R entonces comenzaríamos definiendo que:

$$\|\vec{r}_1\| = \|\vec{r}_2\| = \|\vec{r}_3\| = \|\vec{r}_4\| = R$$

$$\vec{r}_1 = \vec{r}_0 + \vec{d}_1$$

$$\vec{r}_2 = \vec{r}_0 + \vec{d}_2$$

$$\vec{r}_3 = \vec{r}_0 + \vec{d}_3$$

$$\vec{r}_4 = \vec{r}_0 + \vec{d}_4$$

De donde tenemos:

$$\|\vec{r}_1\|^2 = \|\vec{r}_o\|^2 + 2\vec{r}_o \cdot \vec{r}_1 + \|\vec{d}_1\|^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$\|\vec{r}_2\|^2 = \|\vec{r}_o\|^2 + 2\vec{r}_o \cdot \vec{r}_2 + \|\vec{d}_2\|^2 \dots\dots\dots (2)$$

$$\|\vec{r}_3\|^2 = \|\vec{r}_o\|^2 + 2\vec{r}_o \cdot \vec{r}_3 + \|\vec{d}_3\|^2 \dots\dots\dots (3)$$

$$\|\vec{r}_4\|^2 = \|\vec{r}_o\|^2 + 2\vec{r}_o \cdot \vec{r}_4 + \|\vec{d}_4\|^2 \dots\dots\dots (4)$$

Efectuando:

(1) - (2)

$$\vec{r}_o \cdot (\vec{d}_1 - \vec{d}_2) = \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2}{2}$$

(2) - (3)

$$\vec{r}_o \cdot (\vec{d}_2 - \vec{d}_3) = \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2}{2}$$

(3) - (4)

$$\vec{r}_o \cdot (\vec{d}_3 - \vec{d}_4) = \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2}{2}$$

Sabiendo que:

$$\vec{d}_1 = (x_1 - x_0; y_1 - y_0; z_1 - z_0)$$

$$\vec{d}_2 = (x_2 - x_0; y_2 - y_0; z_2 - z_0)$$

$$\vec{d}_3 = (x_3 - x_0; y_3 - y_0; z_3 - z_0)$$

$$\vec{d}_4 = (x_4 - x_0; y_{41} - y_0; z_4 - z_0)$$

Tenemos:

$$\vec{d}_1 - \vec{d}_2 = (x_1 - x_2; y_1 - y_2; z_1 - z_2)$$

$$\vec{d}_2 - \vec{d}_3 = (x_2 - x_3; y_2 - y_3; z_2 - z_3)$$

$$\vec{d}_3 - \vec{d}_4 = (x_3 - x_4; y_3 - y_4; z_3 - z_4)$$

De las ecuaciones 1-2, 2-3, 3-4, tenemos el sistema siguiente:

$$x_0(x_1 - x_2) + y_0(y_1 - y_2) + z_0(z_1 - z_2) = \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2}{2}$$

$$x_0(x_2 - x_3) + y_0(y_2 - y_3) + z_0(z_2 - z_3) = \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2}{2}$$

$$x_0(x_3 - x_4) + y_0(y_3 - y_4) + z_0(z_3 - z_4) = \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2}{2}$$

Y finalmente hallamos los puntos buscados:

$$x_0 = \frac{\begin{vmatrix} \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2}{2} & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2}{2} & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2}{2} & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

$$y_0 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2}{2} & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2}{2} & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2}{2} & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

$$z_0 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2}{2} \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2}{2} \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2}{2} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

Pero, ¿que pasaría si las orbitas de los satélites en lugar de ser circulares fuesen elípticas?

La única variación que la solución tendría es que no podríamos asumir que las distancias del origen a los satélites serian las mismas.

Ósea:

$$\|\vec{r}_1\| \neq \|\vec{r}_2\| \neq \|\vec{r}_3\| \neq \|\vec{r}_4\|$$

Luego en la operación (1)-(2) tendríamos:

$$\vec{r}_0 \cdot (\vec{a}_1 - \vec{a}_2) = \frac{\|\vec{a}_2\|^2 - \|\vec{a}_1\|^2 + \|\vec{r}_1\|^2 - \|\vec{r}_2\|^2}{2}$$

Encontrando la diferencia

$$\frac{\|\vec{r}_1\|^2 - \|\vec{r}_2\|^2}{2}$$

Como única variación en la búsqueda de los puntos; es decir la solución estaría dada por:

$$x_0 = \frac{\begin{vmatrix} A & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ B & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ C & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

$$y_0 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & A & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & B & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & C & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

$$z_0 = \frac{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & A \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & B \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & C \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} x_1 - x_2 & y_1 - y_2 & z_1 - z_2 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 & z_2 - z_3 \\ x_3 - x_4 & y_3 - y_4 & z_3 - z_4 \end{vmatrix}}$$

Donde:

$$A = \frac{\|\vec{d}_2\|^2 - \|\vec{d}_1\|^2 + \|\vec{r}_1\|^2 - \|\vec{r}_2\|^2}{2}$$

$$B = \frac{\|\vec{d}_3\|^2 - \|\vec{d}_2\|^2 + \|\vec{r}_2\|^2 - \|\vec{r}_3\|^2}{2}$$

$$C = \frac{\|\vec{d}_4\|^2 - \|\vec{d}_3\|^2 + \|\vec{r}_3\|^2 - \|\vec{r}_4\|^2}{2}$$

Condiciones finales del problema

Como condición final del problema se debe de aclarar que el problema se ha descrito suponiendo que todos los elementos se encuentran en el vacío.

Esto quiere decir con, que en condiciones normales el tiempo de viaje no será directamente proporcional a la velocidad de la luz sino que variará dependiendo de las condiciones climáticas, la geografía y la infraestructura del sitio donde se encuentre el aparato. [8]

[8] ver referencia bibliográfica, linear algebra, geodesy and GPS.

3.2.2 Sincronizando nuestros relojes.

El problema de la medición de ese tiempo es complicado. Los tiempos son extremadamente cortos. Si el satélite estuviera justo sobre nuestras cabezas, a unos 20.000 Km. de altura, el tiempo total de viaje de la señal hacia nosotros sería de algo más de 0.06 segundos. Estamos necesitando relojes muy precisos. Como ya se ha mencionado.

Pero, aún admitiendo que tenemos relojes con la suficiente precisión, ¿cómo medimos el tiempo de viaje de la señal?

Supongamos que nuestro GPS, por un lado, y el satélite, por otro, generan una señal auditiva en el mismo instante exacto. Supongamos también que nosotros, parados al lado de nuestro receptor de GPS, podamos oír ambas señales (Obviamente es imposible "oír" esas señales porque el sonido no se propaga en el vacío).

Oiríamos dos versiones de la señal. Una de ellas inmediatamente, la generada por nuestro receptor GPS y la otra con cierto atraso, la proveniente del satélite, porque tuvo que recorrer alrededor de 20.000 Km. para llegar hasta nosotros. Podemos decir que ambas señales no están sincronizadas.

Si quisiéramos saber cual es la magnitud de la demora de la señal proveniente del satélite podemos retardar la emisión de la señal de nuestro GPS hasta lograr la perfecta sincronización con la señal que viene del satélite.

El tiempo de retardo necesario para sincronizar ambas señales es igual al tiempo de viaje de la señal proveniente del satélite. Supongamos que sea de 0.06 segundos. Conociendo este tiempo, lo multiplicamos por la velocidad de la luz y ya obtenemos la distancia hasta el satélite.

Tiempo de retardo (0.06 seg) x Vel. de la luz (300.000 km/seg) = Dist. (18.000 km)

Así es, básicamente, como funciona el GPS.

La señal emitida por nuestro GPS y por el satélite es algo llamado "Código Pseudo Aleatorio" (Pseudo Random Code). La palabra "Aleatorio" significa algo generado por el azar. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.2.3 Código Aleatorio

Este Código Pseudo Aleatorio es una parte fundamental del GPS. Físicamente solo se trata de una secuencia o código digital muy complicado. O sea una señal que contiene una sucesión muy complicada de pulsos "on" y "off", como se pueden ver:

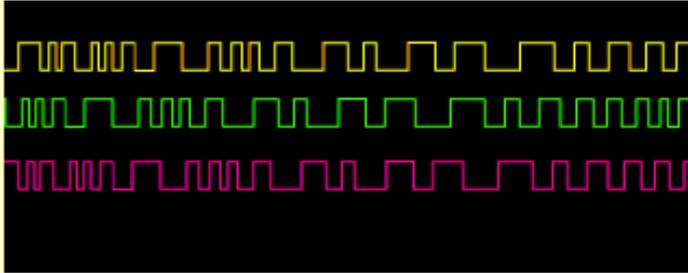


Figura 3.4 Cada satélite tiene un Código Pseudo aleatorio único.

La señal es tan complicada que casi parece un ruido eléctrico generado por el azar. De allí su denominación de "Pseudo-Aleatorio".

Hay varias y muy buenas razones para tal complejidad. La complejidad del código ayuda a asegurarnos que el receptor de GPS no se sintonice accidentalmente con alguna otra señal. Siendo el modelo tan complejo es altamente improbable que una señal cualquiera pueda tener exactamente la misma secuencia.

Dado que cada uno de los satélites tiene su propio y único Código Pseudo Aleatorio, esta complejidad también garantiza que el receptor no se confunda accidentalmente de satélite. De esa manera, también es posible que todos los satélites transmitan en la misma frecuencia sin interferirse mutuamente. Esto también complica a cualquiera que intente interferir el sistema desde el exterior al mismo. El Código Pseudo Aleatorio le da la posibilidad al Departamento de Defensa de EEUU de controlar el acceso al sistema GPS.

Pero hay otra razón para la complejidad del Código Pseudo Aleatorio, una razón que es crucial para conseguir un sistema GPS económico.

El código permite el uso de la "teoría de la información" para amplificar las señales de GPS. Por esa razón las débiles señales emitidas por los satélites pueden ser captadas por los receptores de GPS sin el uso de grandes antenas.

Cuando comenzamos a explicar el mecanismo de emisión de las señales por el GPS y el satélite, asumimos que ambos comenzaban la emisión de la señal exactamente al mismo tiempo. ¿Pero cómo podemos asegurarnos que todo esté perfectamente sincronizado?

Ya veremos...

Resumen: Midiendo la distancia

- La distancia al satélite se determina midiendo el tiempo que tarda una señal de radio, emitida por el mismo, en alcanzar nuestro receptor de GPS.
- Para efectuar dicha medición asumimos que ambos, nuestro receptor GPS y el satélite, están generando el mismo Código Pseudo Aleatorio en exactamente el mismo momento.
- Comparando cuanto retardo existe entre la llegada del Código Pseudo Aleatorio proveniente del satélite y la generación del código de nuestro receptor de GPS, podemos determinar cuanto tiempo le llevó a dicha señal llegar hasta nosotros.
- Multiplicamos dicho tiempo de viaje por la velocidad de la luz y obtenemos la distancia al satélite. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.3 Control perfecto del tiempo.

Si la medición del tiempo de viaje de una señal de radio es clave para el GPS, los relojes que empleamos deben ser exactísimos, dado que si miden con un desvío de un milésimo de segundo, a la velocidad de la luz, ello se traduce en un error de 300 Km.

Por el lado de los satélites, el timing es casi perfecto porque llevan a bordo relojes atómicos de increíble precisión.

¿Pero que pasa con nuestros receptores GPS, aquí en la tierra?

Recordemos que ambos, el satélite y el receptor GPS, deben ser capaces de sincronizar sus Códigos Pseudo Aleatorios para que el sistema funcione.

Si nuestros receptores GPS tuvieran que alojar relojes atómicos (Cuyo costo está por encima de los 50 a 100.000 \$US) la tecnología resultaría demasiado costosa y nadie podría acceder a ellos.

Por suerte los diseñadores del sistema GPS encontraron una brillante solución que nos permite resolver el problema con relojes mucho menos precisos en nuestros GPS. Esta solución es uno de los elementos clave del sistema GPS y, como beneficio adicional, significa que cada receptor de GPS es en esencia un reloj atómico por su precisión.

El secreto para obtener un timing tan perfecto es efectuar una medición satelital adicional.

Resulta que si tres mediciones perfectas pueden posicionar un punto en un espacio tridimensional, cuatro mediciones imperfectas pueden lograr lo mismo.

Esta idea es fundamental para el funcionamiento del sistema GPS. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.3.1 Una medición adicional remedia el desfasaje del timing.

Si todo fuera perfecto (es decir que los relojes de nuestros receptores GPS lo fueran), entonces todos los rangos (distancias) a los satélites se intersectarían en un único punto (que indica nuestra posición). Pero con relojes imperfectos, una cuarta medición efectuada como control cruzado, NO intersectará con los tres primeros.

De esa manera la computadora de nuestro GPS detectará la discrepancia y atribuirá la diferencia a una sincronización imperfecta con la hora universal.

Dado que cualquier discrepancia con la hora universal afectará a las cuatro mediciones, el receptor buscará un factor de corrección único que siendo aplicado a sus mediciones de tiempo hará que los rangos coincidan en un solo punto.

Dicha corrección permitirá al reloj del receptor ajustarse nuevamente a la hora universal y de esa manera tenemos un reloj atómico en la palma de nuestra mano!

Una vez que el receptor de GPS aplica dicha corrección al resto de sus mediciones, obtenemos un posicionamiento preciso.

Una consecuencia de este principio es que cualquier GPS decente debe ser capaz de sintonizar al menos cuatro satélites de manera simultánea. En la práctica, casi todos los GPS en venta actualmente, acceden a más de 6, y hasta a 12, satélites simultáneamente.

Ahora bien, con el Código Pseudo Aleatorio como un pulso confiable para asegurar la medición correcta del tiempo de la señal y la medición adicional como elemento de sincronización con la hora universal, tenemos todo lo necesario para medir nuestra distancia a un satélite en el espacio.

Pero, para que la triangulación funcione necesitamos conocer no sólo la distancia sino que debemos conocer dónde están los satélites con toda exactitud. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

Veremos cómo lo conseguimos.

Resumen: Obtener un Timing Perfecto

- Un timing muy preciso es clave para medir la distancia a los satélites
- Los satélites son exactos porque llevan un reloj atómico a bordo.
- Los relojes de los receptores GPS no necesitan ser tan exactos porque la medición de un rango a un satélite adicional permite corregir los errores de medición. [7]

3.4 Conocer dónde están los satélites en el espacio.

Sabiendo que conocemos dónde están los satélites en sus órbitas y de esa manera podemos utilizarlos como puntos de referencia.

¿Pero, cómo podemos saber donde están exactamente? Todos ellos están flotando a unos 20.000 Km. de altura en el espacio.

Un satélite a gran altura se mantiene estable, la altura de 20.000 Km. es en realidad un gran beneficio para este caso, porque algo que está a esa altura está bien despejado de la atmósfera. Eso significa que orbitará de manera regular y predecible mediante ecuaciones matemáticas sencillas como ya se analizó anteriormente.

La Fuerza Aérea de los EEUU colocó cada satélite de GPS en una órbita muy precisa, de acuerdo al Plan Maestro de GPS.

En tierra, todos los receptores de GPS tienen un almanaque programado en sus computadoras que les informan donde está cada satélite en el espacio, en cada momento. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.4.1 Control.

El Control Constante agrega precisión, las órbitas básicas son muy exactas pero con el fin de mantenerlas así, los satélites de GPS son monitoreados de manera constante por el Departamento de Defensa.

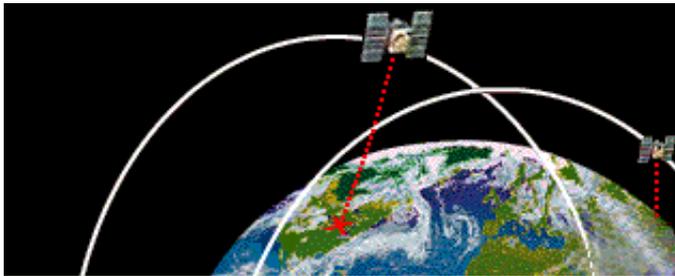


Figura 3.5 Las Órbitas altas son exactas.

Ellos utilizan radares muy precisos para controlar constantemente la exacta altura, posición y velocidad de cada satélite.

Los errores que ellos controlan son los llamados errores de efemérides, o sea evolución orbital de los satélites. Estos errores se generan por influencias gravitacionales del sol y de la luna y por la presión de la radiación solar sobre los satélites.

Estos errores son generalmente muy sutiles pero si queremos una gran exactitud debemos tenerlos en cuenta. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.4.2 Corrigiendo el mensaje.

Una vez que el Departamento de Defensa ha medido la posición exacta de un satélite, vuelven a enviar dicha información al propio satélite. De esa manera el satélite incluye su nueva posición corregida en la información que transmite a través de sus señales a los GPS.

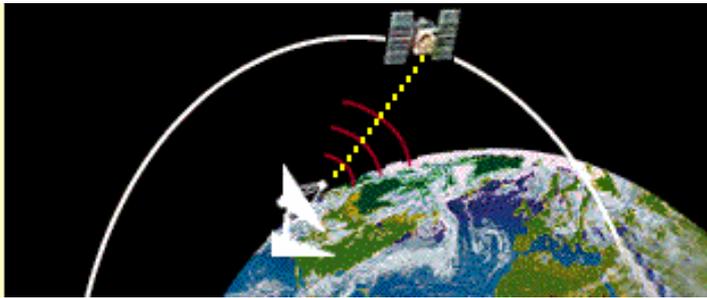


Figura 3.6 El monitoreo constante por Radar, agrega precisión.

Esto significa que la señal que recibe un receptor de GPS no es solamente un Código Pseudo Aleatorio con fines de timing. También contiene un mensaje de navegación con información sobre la órbita exacta del satélite. Con un timing perfecto y la posición exacta del satélite podríamos pensar que estamos en condiciones de efectuar cálculos perfectos de posicionamiento. Sin embargo debemos resolver otros problemas.

Resumen: Posicionamiento de los Satélites

- Para utilizar los satélites como puntos de referencia debemos conocer exactamente donde están en cada momento.
- Los satélites de GPS se ubican a tal altura que sus órbitas son muy predecibles.
- El Departamento de Defensa controla y mide variaciones menores en sus órbitas.
- La información sobre errores es enviada a los satélites para que estos a su vez retransmitan su posición corregida junto con sus señales de timing.

[7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.5 Corrigiendo Errores.

Hasta ahora hemos estado tratando los cálculos del sistema GPS de manera muy abstracta, como si todo el proceso ocurriera en el vacío. Pero en el mundo real hay muchas cosas que le pueden suceder a una señal de GPS para transformarla en algo menos que matemáticamente perfecta.

Para aprovechar al máximo las ventajas del sistema un buen receptor de GPS debe tener en cuenta una amplia variedad de errores posibles. Veamos que es lo que debemos enfrentar. [7]

3.5.1 Un difícil viaje a través de la atmósfera.

En primer lugar, una de las presunciones básicas que hemos estado usando a lo largo de este trabajo no es exactamente cierta. Hemos estado afirmando que podemos calcular la distancia a un satélite multiplicando el tiempo de viaje de su señal por la velocidad de la luz. Pero la velocidad de la luz sólo es constante en el vacío.

Una señal de GPS pasa a través de partículas cargadas en su paso por la ionosfera y luego al pasar a través de vapor de agua en la troposfera pierde algo de velocidad, creando el mismo efecto que un error de precisión en los relojes.

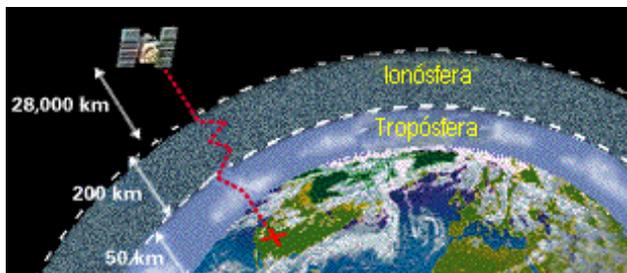


Figura 3.7 viaje difícil a través de la atmósfera.

Hay un par de maneras de minimizar este tipo de error. Por un lado, podríamos predecir cual sería el error tipo de un día promedio. A esto se lo llama modelación y nos puede ayudar pero, por supuesto, las condiciones atmosféricas raramente se ajustan exactamente el promedio previsto.

Otra manera de manejar los errores inducidos por la atmósfera es comparar la velocidad relativa de dos señales diferentes. Esta medición de doble frecuencia es muy sofisticada y solo es posible en receptores GPS muy avanzados. [7]

3.5.2 Un difícil Viaje sobre la tierra.

Los problemas para la señal de GPS no terminan cuando llega a la tierra. La señal puede rebotar varias veces debido a obstrucciones locales antes de ser captada por nuestro receptor GPS.



Figura 3.8 Viaje difícil sobre la tierra.

Este error es similar al de las señales fantasma que podemos ver en la recepción de televisión. Los buenos receptores GPS utilizan sofisticados sistemas de rechazo para minimizar este problema. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.5.3 Problemas en el satélite.

Aún siendo los satélites muy sofisticados no tienen en cuenta minúsculos errores en el sistema.

Los relojes atómicos que utilizan son muy, pero muy, precisos, pero no son perfectos. Pueden ocurrir minúsculas discrepancias que se transforman en errores de medición del tiempo de viaje de las señales.

Y, aunque la posición de los satélites es controlada permanentemente, tampoco pueden ser controlados a cada segundo. De esa manera pequeñas variaciones de posición o de efemérides pueden ocurrir entre los tiempos de monitoreo. [7]

3.5.4 Algunos ángulos son mejores que otros.

La geometría básica por si misma puede magnificar estos errores mediante un principio denominado "Dilución Geométrica de la Precisión", o DGDP, suena complicado pero el principio es simple.

En la realidad suele haber mas satélites disponibles que los que el receptor GPS necesita para fijar una posición, de manera que el receptor toma algunos e ignora al resto.

Si el receptor toma satélites que están muy juntos en el cielo, las circunferencias de intersección que definen la posición se cruzarán a ángulos con muy escasa diferencia entre sí. Esto incrementa el área gris o margen de error acerca de una posición.

Si el receptor toma satélites que están ampliamente separados, las circunferencias intersectan a ángulos prácticamente rectos y ello minimiza el margen de error.

Los buenos receptores son capaces de determinar cuales son los satélites que dan el menor error por Dilución Geométrica de la Precisión. [7]

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

3.5.5 Errores Intencionales.

Aunque resulte difícil de creer, el mismo Gobierno que pudo gastar 12.000 Millones de dólares para desarrollar el sistema de navegación más exacto del mundo, está degradando intencionalmente su exactitud. Dicha política se denomina "Disponibilidad Selectiva" y pretende asegurar que ninguna fuerza hostil o grupo terrorista pueda utilizar el GPS para fabricar armas certeras. Básicamente, el Departamento de Defensa introduce cierto "ruido" en los datos del reloj satelital, lo que a su vez se traduce en errores en los cálculos de posición. El Departamento de Defensa también puede enviar datos orbitales ligeramente erróneos a los satélites que estos reenvían a los receptores GPS como parte de la señal que emiten.

Estos errores en su conjunto son la mayor fuente unitaria de error del sistema GPS. Los receptores de uso militar utilizan una clave encriptada para eliminar la Disponibilidad Selectiva y son, por ello, mucho más exactos. La Disponibilidad Selectiva fue interrumpida por un decreto del presidente Clinton, con efecto desde el 2 de mayo de 2000. El Departamento de Defensa de los Estados Unidos se reserva el derecho de reimplantarla cuando lo considere conveniente a los intereses de la Seguridad de los Estados Unidos y además dispone de la tecnología necesaria para implantarla en áreas geográficas limitadas. Estas condiciones permitieron al Presidente Clinton suspenderla.

Afortunadamente todos esos errores no suman demasiado error total. Existe una forma de GPS, denominada GPS Diferencial, que reduce significativamente estos problemas.

En Resumen: Corrección de Errores

- La ionosfera y la troposfera causan demoras en la señal de GPS que se traducen en errores de posicionamiento.

- Algunos errores se pueden corregir mediante modelación y correcciones matemáticas.
- La configuración de los satélites en el cielo puede magnificar otros errores
- El GPS Diferencial puede eliminar casi todos los errores [7]

Resumen de las fuentes de error del sistema GPS			
Errores típicos, en Metros (Por cada satélite)			
Fuentes de Error	GPS Actual Desde 2/5/2000	GPS Standard Hasta 2/5/2000	GPS Diferencial
Reloj del Satélite	1.5	1.5	0
Errores Orbitales	2.5	2.5	0
Ionosfera	5.0	5.0	0.4
Troposfera	0.5	0.5	0.2
Ruido en el Receptor	0.3	0.3	0.3
Disponibilidad Selectiva	0	30	0
Exactitud Promedio de la Posición			
Horizontal	15	50	1.3
Vertical	24	78	2.0
3-D	28	93	2.8

Tabla 3.1 Resumen de las fuentes de error del sistema GPS.

[7] ver referencia bibliográfica, fundamentals of global positioning system...

CONCLUSIONES

Con este documento podemos concluir que tendremos un panorama amplio del funcionamiento y desarrollo de GPS.

Y como una herramienta que pueda despertar el interés del lector por este tema ya que en este momento no existe información en el idioma español de este tema.

GPS reforzará el conocimiento de los futuros Ingenieros, dando así realce puesto que estaremos mejor documentados en cuanto a tecnología de punta se refiere, de la misma manera al estar bien informados mejoramos la calidad de nuestra máxima casa de estudios.

GLOSARIO

APOGEO: Es la distancia más lejana, de la Tierra, que un satélite orbital alcanza.

ENCRIPCIÓN : Es una base de seguridad. Encriptar es hacer ilegible información por medio de aplicar a esta un algoritmo. La encriptación codifica los paquetes de información que fluyen.

FM (Frequency Modulation): La modulación en frecuencia consiste en variar la frecuencia de la portadora proporcionalmente a la frecuencia de la onda moduladora, permaneciendo constante su amplitud. A diferencia de la AM, la modulación en frecuencia crea un conjunto de complejas bandas laterales cuya profundidad, dependerá de la amplitud de la onda moduladora. Como consecuencia del incremento de las bandas laterales, la anchura del canal de la FM será más grande que el tradicional de la onda media, siendo también mayor la anchura de banda de sintonización de los aparatos receptores. La principal consecuencia de la modulación en frecuencia es una mayor calidad de reproducción como resultado de su casi inmunidad hacia las interferencias eléctricas.

MUX (Multiplexador): Es un circuito usado para el control de un flujo de información que equivale a un conmutador. En su forma más básica se compone de dos entradas de datos (A y B), una salida de datos y una entrada de control.

Cuando la entrada de control se pone a 0 lógico, la señal de datos A es conectada a la salida; cuando la entrada de habilitación se pone a 1 lógico, la señal de datos B es la que se conecta a la salida.

El multiplexor es una aplicación particular de los decodificadores, tal que existe una entrada de habilitación (EN) por cada puerta AND y al final se hace un OR entre todas las salidas de las puertas AND.

En el campo de las telecomunicaciones el multiplexor se utiliza como dispositivo que puede recibir varias entradas y transmitir las a un medio de transmisión compartido. Para ello lo que hace es dividir el medio de transmisión en múltiples canales, para que varios nodos puedan comunicarse al mismo tiempo.

PERIGEO: Es la distancia mínima que un satélite orbital puede alcanzar con respecto de la tierra.

PSK (Phase Shift Keying): Consiste en asignar variaciones de fase de una portadora según los estados significativos de la señal de datos. La modulación PSK consiste en cada estado de modulación está dado por la fase que lleva la señal respecto de la original.

Velocidad de señalización

Velocidad [bps] = Vel[Baudios]*Log₂ n .

Donde: n = corresponde al número de niveles de la señal digital.

QAM (Quadrature Amplitud Modulation):

En este caso ambas portadoras están moduladas en amplitud y el flujo de datos se divide en grupos de 4 bits, y a su vez en subgrupos de 2 bits, codificando cada dibits 4 estados de amplitud en cada una de las portadoras.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Comunicación por satélite: principios, tecnologías y sistemas.

Carlos Rosado

México: Limusa, c1999.

Extensión: 604 Pág.

[2] Sistemas de comunicaciones electrónicas.

Wayne Tomasi.

México: Prentice-Hall Hispanoamericana, c1996.

Extensión: 858 Pág.

[5] Satellite communications.

Timothy Pratt, Charles W. Bostian.

New York: J. Wiley, 1986

Extensión: 472 Pág.

[6] Beyond Discovery®: The Path from Research to Human Benefit

Gary Taubes

© 1997, National Academy of Sciences

[7] Fundamentals of Global Positioning System

James Bao-Yen Tsui.

Wiley, John & Sons, Incorporated, 2004

[8] Linear Algebra, Geodesy and GPS

Gilbert Strang, K. Borre

Wellesley-Cambridge Press., 1997

BIBLIOGRAFÍA ELECTRÓNICA

[3] <http://www.monografias.com>

[4] <http://www.worldbookonline.com/wb/Article>