



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

CALCULO DE ENLACES DE SATELITES DE ORBITA BAJA

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES
PRESENTA:

CECILIA FLORES MOZO

DIRECTOR DE TESIS:

DR. SALVADOR LANDEROS AYALA



MEXICO, D. F.

2002

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

**CÁLCULOS DE ENLACES
DE SATÉLITES DE
ÓRBITA BAJA**

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por todos los años que estuve en sus aulas y la oportunidad de ser parte de ella.

A mi papá, mi mamá y mis hermanos: Omar, Odina y Ruben.

Al Dr. Salvador Landeros por su paciencia, su tiempo y su guía durante todo este trabajo.

A todos mis profesores

A mi generación de Ingeniería en Telecomunicaciones por su amistad durante el tiempo que estuvimos juntos, gracias Roberto y Alejandro.

A las personas que estuvieron conmigo, y a las que son parte de mi vida: Omar, Eduardo, David, Javier, MO, Cipactli, José Rafael, Marco, Erika, Iván, Francisco, Armando, y quienes no menciono, pero están incluidos, Gracias.

A James Alan, Kirk, Jasón, Rikki y Lars.

Cecilia

ÍNDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN	
Satélites LEO (Low Earth Orbit).	1
CAPITULO I: PANORAMA GENERAL	5
1.1 Elementos del sistema.	5
1.1.1 Antenas.	5
1.1.2 Amplificadores de Potencia.	6
1.1.3 Pérdidas del sistema.	6
1.2 Dinámica Orbital.	7
1.3 Cobertura terrestre para una órbita no geoestacionaria.	11
CAPITULO II: MODELO DE UN SISTEMA	19
2.1.1 Efecto Doppler.	19
2.1.2 Áreas de servicio, cobertura e interferencia.	21
2.1.3 Confiabilidad y disponibilidad.	21
2.1.4 Parámetros de tráfico.	23
2.1.5 Parámetros del enlace.	24
2.1.6 Parámetros de Desempeño.	26
2.1.7 Enlaces intersatelitales.	26
2.1.8 Tecnología Bent Pipe.	36
CAPITULO III: ACCESO MULTIPLE	37
3.1 FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia).	39
3.1.1 Esquemas de transmisión.	40

3.1.2 Ruido de intermodulación.	41
3.1.3 Frecuencia de back off.	41
3.1.4 Tasa real de datos de FDMA	42
3.2 TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo).	43
3.2.1 Ciclo de sincronización cerrado.	46
3.2.2 Sincronización de ciclo abierto.	46
3.2.3 Adquisición de la sincronización.	47
3.2.4 Asignación por Demanda.	47
3.2.5 Haz conmutado y TDMA de haces de satélite conmutados.	47
3.2.6 Tasa real de datos de TDMA.	48
3.3 CDMA (Acceso Múltiple por División de Código).	48
3.3.1 Protección contra trayectorias múltiples.	50
3.3.2 Realización de accesos múltiples.	50
3.3.3 Protección contra interferencia.	50
3.3.4 Sincronización.	50
3.3.5 Tasa real de datos CDMA.	50
3.3.6 Máximo número de accesos.	51
3.4 Comparación entre las diferentes técnicas de acceso.	51
3.4.1 Características de las técnicas de acceso.	52
CAPITULO IV: ECUACIONES DE ENLACE	53
4.1.1 Potencia Isotrópica Radiada Efectivamente (EIRP).	53
4.1.2 Pérdidas de Feeders.	54
4.1.3 Pérdidas por apuntamiento de la antena.	54
4.1.4 Pérdidas Ionosféricas y atmosféricas.	55
4.1.5 Pérdidas por efecto de la lluvia.	55
4.2 Ecuación de Enlace.	55

4.2.1 Enlace de subida.	56
4.2.2 Enlace de bajada.	57
4.2.3 Back off de salida.	58
4.2.4 Margen de desvanecimiento por la lluvia en el enlace de bajada.	58
4.3 Cálculos de Enlace.	60

CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFÍA.

INTRODUCCIÓN

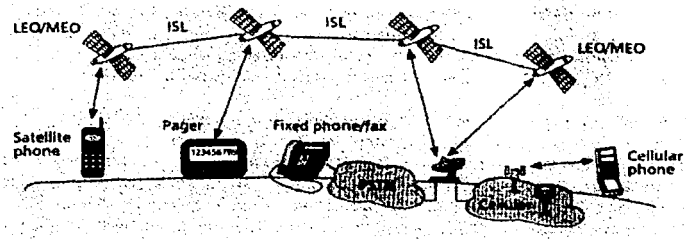
Satélites LEO (Low Earth Orbit).

Los satélites LEO se ubican entre los 500 y 3,000Km de altitud, es decir, entre la conocida como altura de densidad atmosférica constante y los cinturones de radiación de Van Allen, los ángulos de inclinación varían desde 30° hasta 90°. La principal ventaja de una órbita baja es que el satélite está más cerca de la tierra, se necesitan amplificadores de menos potencia y menor tamaño, antenas de menor tamaño, además de que la cercanía disminuye el tiempo de retraso de la señal. La principal desventaja es que su periodo es de solo unas horas, el satélite está en movimiento por lo que se necesita rastreo o antenas omnidireccionales además de un gran número de satélites para tener continuidad en el servicio, la cobertura está limitada por la baja altitud. Sin embargo se pueden utilizar enlaces intersatelitales o utilizar un sistema de almacenamiento y envío.

Relacionado con la órbita de un satélite se pueden considerar algunos parámetros, que son:

- **Altura de la Órbita**, es la distancia de separación entre la superficie de la Tierra y la órbita del satélite.
- **Radio de la Órbita**, es el radio que describe la trayectoria del satélite alrededor de la Tierra.
- **Periodo Orbital**, es el tiempo que tarda el satélite en una órbita determinada en volver a un punto de referencia sobre la órbita habiendo dado una vuelta a la Tierra.
- **Velocidad Tangencial**, que es la velocidad lineal del satélite considerando que se encuentra rotando en una órbita cuyo centro de rotación es la Tierra.
- **Efecto Doppler Máximo**, son las partes por millón de la frecuencia de la portadora que dicha frecuencia, recibida en una estación terrena, puede variar debido a la distancia y el movimiento del satélite.
- **Radio del Área de Cobertura**, es el radio de la huella del satélite sobre la superficie de la Tierra, considerando que se proyectara como una circunferencia sobre ésta.

Entre mayor sea la altura del satélite, es decir, entre más alta esté su órbita, el área de cobertura se incrementa pero se reduce su velocidad relativa (la diferencia en la frecuencia debido al efecto Doppler), y se observa durante menor periodo de tiempo el satélite sobre el horizonte. Asimismo, las condiciones de propagación se deterioran.



**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Bandas de Frecuencia.

Los rangos de frecuencia de los servicios satelitales se dividen como siguen:

- Los rangos de frecuencias de las bandas de VIII^a y VIII^a asignados a los servicios satelitales (entre 137 y 401 MHz) son los asignados a sistemas LEO pequeños con la finalidad de proveer servicios de transmisión de datos a bajas velocidades, y no son apropiados para servicios multimedia de banda ancha.
- En las bandas L, ubicada en el rango de frecuencia de 1610 a 1626.5 MHz, y la banda S, en el rango de frecuencia de 2483.5 a 2500 MHz, se ubican los grandes sistemas LEO empleados para telefonía pública y servicios de mensajes cortos (SMS), así como para posicionamiento de terminales (como ejemplo Globalstar o el sistema Iridium)
- La banda C, ubicada entre los 4 y 8 GHz, se emplea principalmente para transporte de enlaces.
- La banda Ku, ubicada entre los 10 y los 18 GHz, esta siendo empleada en la actualidad para transmisión vía satélite así como para conexiones de Internet transportadas por una variedad considerable de satélites. Algunos diseños de satélites LEO hacen uso de la banda Ku para transmisión de datos desde y hacia el suscriptor; en este caso se emplea una separación por espaciamiento del haz, que resulta una solución que hace al sistema compatible con cualquier otro sistema operando en las mismas bandas, como el ejemplo de SkyBridge. Compañías como SES Astra, Hispasat y Eutelsat están usando actualmente frecuencias en la banda Ku con planes para sistemas multimedia.
- La banda Ka que se emplea en comunicaciones satelitales, en el rango de los 18 a los 31 GHz, ofrece el potencial de emplear aproximadamente 1.5 GHz en el rango de frecuencia de 19.7 a 21.2 GHz (en el *downlink*) y de 29.5 a 31 GHz (*uplink*) para transmisiones multimedia. La mayor parte de los sistemas de satélites multimedia (como Arabsat, Astrolink, Chinasat, Euroskyway, GE Star, Genesis, Hughes Spaceway, Intelsat, Korecasat, Morningstar, Orion, Palapa, PanAmSat, Teledesic, Thaicom, Turksat, Videosat, Voicestar, West, Yamal) emplean esta banda. Debido al efecto considerable de atenuación producida por la precipitación atmosférica, las terminales que comparten esta banda se suponen funcionando apropiadamente en condiciones de desvanecimiento de hasta 20 dB.
- La banda V, ubicada de 40 a 75 GHz, ofrece un ancho de banda mucho más amplio para sistemas multimedia. Existen planes de empleo de esta banda para provisión de servicios satelitales en frecuencias cercanas a los 40 a 50 GHz. La tecnología de fabricación de los elementos para operar en este rango no está tan avanzada como debería, por lo que se requiere más investigación en este sentido. El efecto de la precipitación atmosférica en el balance del enlace en la banda V es bastante diferente comparado con la banda Ka, complicando la construcción de terminales. Se anticipa que la banda V se empleará para comunicaciones con plataformas estratosféricas localizadas a una altitud de aproximadamente 20 Km, en el *downlink* de 47.2 a 47.5 GHz y en el *uplink* de 47.9 a 48.2 GHz, que servirán para sistemas de multimedia regionales.

Los enlaces utilizados para interconexiones son diseñados para enviar mensajes a un destino determinado con fidelidad aceptable, existe un compromiso entre cantidad y calidad de los mensajes limitados por algunos factores como el costo y la tecnología. Para enviar una gran cantidad de información con una gran calidad puede tener costos demasiado altos que no son aceptables. Los factores que se necesitan considerar en el diseño del enlace incluyen la frecuencia, efectos de propagación, una complejidad aceptable del satélite y estaciones terrestres, efectos de ruido y requerimientos regulatorios.

Cada componente del enlace tiene características individuales, por ejemplo cuando la estación terrestre destino es una terminal móvil, el tamaño de la antena receptora es pequeño, lo que da como resultado un bajo nivel de la portadora recibida. Para aplicaciones como esta el diseño de un enlace satélite-terminal es crítico. Se tiene que tomar en cuenta para el diseño las características de cada componente del enlace.

Los sistemas de satélites son susceptibles al ruido ya que inherentemente los niveles de las portadoras son bajos, por lo tanto las principales fuentes de ruido son identificadas y sus efectos combinados se cuantifican en el funcionamiento del sistema.

Algunos ejemplos de los sistemas que se encuentran dando servicio actualmente son:

CONSTELACIONES DE SISTEMAS LEO			
	Pequeños LEOS	Grandes LEOS	LEOS de Banda ancha.
	ORBCOMM (operando)	Iridium	Teledesic (Se espera para el 2004)
	Odysee (cancelado)	Globalstar (operando)	Celestri (incorporado a Teledesic)
	VITA-Sat	ICO (Cambia de diseño con mayor ancho de banda uniéndose a Teledesic)	Skybridge (Se espera para el 2003)
	Aries (cancelado)	Ellipso (se espera para el 2002)	M-Star
	Final Analysis (se espera para el 2002)	Constellation	
	Gonets	E-Sat	
	Leo-One (se espera para el 2003)	Leo-Sat courier	
	Starsys (cancelado)		
	Gemnet (incluido en el sistema Orbcomm)		
Contraparte Terrestre	Radiolocalización	Celular	Fibra óptica

[1]

[1] Tesis "Ingeniería de Satélites LEO de Banda Ancha" Ciudad Universitaria México, Noviembre 2001.

Reference is made to the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54, and the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54, and the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54.

The above information was obtained from the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54, and the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54, and the report of the Special Agent in Charge, New York, dated 1/15/54.

Very truly yours,

Special Agent in Charge

CAPITULO I: PANORAMA GENERAL

1.1 Elementos del sistema.

1.1.1 Antenas.

Las antenas son un elemento fundamental en el enlace, por lo tanto sus características tienen gran influencia en el diseño del enlace.

Una antena es un dispositivo recíproco y por lo tanto sus propiedades de transmisión y recepción son idénticas a una frecuencia dada.

Una antena de estación terrestre se puede considerar representativa para definir varios parámetros. Se requieren más antenas con movimientos en los dos ejes para poder seguir al satélite.

El patrón de radiación de una antena también puede ser representado como un contorno de ganancia constante, que define el área de cobertura del satélite.

La mitad de potencia del ancho de haz está definida como la separación angular entre la potencia media de la señal en algunos puntos (-3dB) en el patrón de radiación.

Además de la potencia recibida o transmitida por la antena en una dirección deseada a través de su lóbulo principal, también se recibe o transmite energía en direcciones no deseadas a través de los lóbulos laterales. La potencia transmitida a través de los lóbulos laterales puede causar interferencia a otros sistemas de radio y también recibirlos. Esto nos da un límite importante en la utilización de las antenas, por lo tanto se hacen muchos esfuerzos para minimizar el lóbulo lateral de las antenas.

Las antenas de corneta o parabólicas son las que se utilizan comúnmente en aplicaciones de satélites de comunicaciones debido a su habilidad de enfocar su transmisión a una área determinada. La apertura del patrón de radiación depende del patrón de campo a través de la apertura. La mitad de potencia del ancho de haz depende de la distribución en la apertura, el diámetro y frecuencia de operación.

La distribución de apertura esta gobernada por la curvatura del plato, determinada por el diámetro focal del plato junto con el patrón de radiación en la alimentación.

La intensidad de radiación de una antena, en una dirección determinada está definida por la potencia radiada en la antena por unidad de ángulo sólido en esa dirección.

El valor máximo de la función de ganancia es llamado ganancia de la antena, y ésta es una medida de la potencia radiada por la antena relativa a una antena isotrópica sin pérdidas emitiendo la misma potencia de RF.

La polarización de una onda electromagnética describe la orientación del vector de campo eléctrico en el espacio. La polarización es determinada por la forma en que la señal de RF sale de la antena hacia el espacio, esta función es definida por un polarizador que es parte del sistema de alimentación de la antena, y la antena es capaz de recibir o transmitir señales a las cuales este polarizada.

Una onda polarizada linealmente tiene un vector de campo eléctrico orientado a un ángulo constante con respecto a los ejes horizontal o vertical, y esta viaja en el espacio. Para un satélite, horizontal es tomado como paralelo al ecuador y vertical paralelo al eje polar.

El vector de campo eléctrico de una onda polarizada circularmente sobre un plano a ángulos rectos en la dirección de propagación. Si la rotación es como las manecillas del reloj, la polarización es circular a mano derecha, y si es al contrario de las manecillas del reloj, es una

onda polarizada circularmente a mano izquierda, el sentido de polarización se caracteriza observando la dirección de propagación. También hay polarización elíptica.

Teóricamente una antena con polarización dual puede aislar por completo las ondas viajando con polarizaciones ortogonales, permitiendo que cada polarización se reciba en canales separados, debe notarse que la frecuencia para ambos canales es la misma, y por lo tanto se hace una doble utilización del ancho de banda. En la práctica no se acoplan perfectamente a cada polarización y alguna energía ser acopla siempre al otro puerto. Una antena con polarización dual es caracterizada por un patrón de radiación co-polar y un patrón cross-polar.

La propiedad de una antena que discrimina entre energía de RF viajando con polarización ortogonal es llamada discriminación cross-polar. Para una onda polarizada linealmente la discriminación cross-polar es el radio de la señal co-polar a la componente cross-polar. Para una onda polarizada elípticamente una onda cross polarizada tiene el sentido de rotación opuesto el mismo eje de radio y un ángulo de inclinación de 90° más que la onda original.

1.1.2 Amplificadores de Potencia.

La función del amplificador de potencia es incrementar la potencia de la señal para transmitirla hacia el espacio. En un Satélite las restricciones de masa y potencia de DC, limitan la potencia del amplificador de 10 a 100W. En una estación terrestre las restricciones son menores y se alcanzan potencias de hasta 1000W.

Muchos satélites tienen amplificadores TWT (Tubos de Ondas Progresivas), estos trabajan en el vacío con un haz de electrones interactuando con una onda de RF. Algunos satélites de comunicaciones también utilizan amplificadores SSPAs (Smaller and lighter solid state power amplifiers). Los amplificadores de potencia disipan considerablemente el calor. Disipar este calor en el espacio es más difícil, debido a la falta de aire. Las estaciones terrestres frecuentemente tienen mayor potencia de entrada, utilizan amplificadores Klystron y TWT.

1.1.3 Pérdidas del sistema.

La pérdida de transmisión es la más grande, está representada por la gran distancia desde las estaciones terrestres hasta el satélite, esta es nombrada pérdida de espacio libre, que está basada en el cuadrado del radio de la distancia, para una longitud de onda dada.

Pérdidas de feeder, representadas por las conexiones, entre la antena los demás dispositivos, que constan de filtros, acopladores, y guías de onda. Pérdidas de error de apuntamiento de antena, la máxima ganancia ocurre cuando están alineadas la antena del satélite y la estación terrestre, por lo tanto hay que considerar pérdidas cuando esto no ocurre, estas pérdidas pueden ocurrir en la antena de la estación terrestre y en la del satélite, estas pérdidas pueden ser por apuntamiento o pérdida de Faraday por polarización o rotación (presentes únicamente en el caso de polarización lineal), aunque generalmente no son muy considerables.

Existen otras pérdidas mucho menores, pérdidas ionosféricas y atmosféricas, que son pequeñas pero significativas, además de que se incrementan con las frecuencias altas y con la precipitación en el aire debido al efecto de esparcimiento, absorción centelleo, especialmente en climas tropicales con nubes.

Otro punto a considerar es el back off que disminuye la potencia efectiva radiada en el enlace de subida cuando existe más de una portadora, este, referido al nivel de saturación de una sola portadora.

1.2 Dinámica Orbital

Debido a su cercanía con la superficie de la Tierra, de 3,000 Km o menos, las órbitas para LEOs se consideran círculos perfectos que tienen a la Tierra como centro, es decir, elipses con una excentricidad nula ($e = 0$).

Considerando una órbita con semi-eje mayor a y altura instantánea h , las velocidades lineal y angular del satélite están dadas por:

$$v_s = \sqrt{\mu \left(\frac{2}{r_E + h} - \frac{1}{a} \right)}$$

$$\omega_s = (r_E + h)v_s$$

Siendo r_E el radio de la Tierra y μ la constante gravitacional cuyo valor es $\mu = 398,600.5 \times 10^9$ [m³/s²]. El valor del radio de la Tierra empleado en las ecuaciones (1) y (2) anteriores puede ser ya sea el valor polar, $r_{Ep} = 6356.75$ [km] o el valor ecuatorial, $r_{Ee} = 6378.14$ [km].

La distancia entre el centro de la Tierra y el centro de la elipse orbital es igual a ae , tal que e es el valor de la excentricidad de la órbita.

Considerando que el ángulo de trayectoria de vuelo instantáneo η se define como el ángulo subtendido entre el centro de la Tierra en el plano orbital entre el semi-eje mayor y la dirección del satélite. Entonces la altura instantánea del satélite está dada por:

$$h = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \eta} - r_E$$

El periodo orbital del satélite es:

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{a^3}{\mu}}$$

Considerando una órbita circular, como la ilustrada en la figura 2, las velocidades y el periodo están dadas por:

$$v_s = \sqrt{\frac{\mu}{r_E + h}}$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{\mu}{(r_E + h)^3}}$$

$$T_s = 2\pi \sqrt{\frac{(r_E + h)^3}{\mu}}$$

La velocidad de un satélite LEO relativa a la Tierra considera el radio orbital satelital tanto del satélite LEO como de un satélite GEO, ya que este último mantiene una posición que puede considerarse fija, con respecto a la Tierra, y está dada por:

$$V_l = \omega \cdot \frac{\sqrt{R_s^3}}{\sqrt{R_t}}$$

De la cual R_g es el radio orbital de un satélite GEO, R_l es el radio orbital de un satélite LEO y ω es el periodo de rotación angular de la Tierra cuyo valor está dado por la ecuación:

$$\omega = \frac{2\pi \text{ [radianes]}}{24 \text{ [horas]}} = 0.2618 \text{ [rad / hora]}$$

El radio orbital de los satélites es una función de suma de la distancia del radio ecuatorial de la Tierra más la altura del satélite.

Por lo tanto el radio orbital de un satélite GEO involucrado en el cálculo de la velocidad de un satélite LEO relativa a la Tierra es,

$$R_g = R_{eq} + h_g = 6378 \text{ [km]} + 35800 \text{ [km]} = 42178 \text{ [km]}$$

Considerando que h_g es el valor de la órbita de Clarke. En el caso de un satélite LEO, este valor está dado por:

$$R_l = R_{eq} + h_l$$

Donde h_l es el valor de la altura orbital en la que se encuentra el satélite LEO. Como ejemplo, el sistema Iridium, considerando una altura orbital promedio de 780 [km] para la constelación, lo cual resulta en $R_g = 7158$ [km], es decir, que un satélite se mueve a una velocidad de $V_l = 26804$ [km/hr] con relación a la Tierra, por lo cual se define el periodo orbital de la constelación de Iridium en 100.13 [min].

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

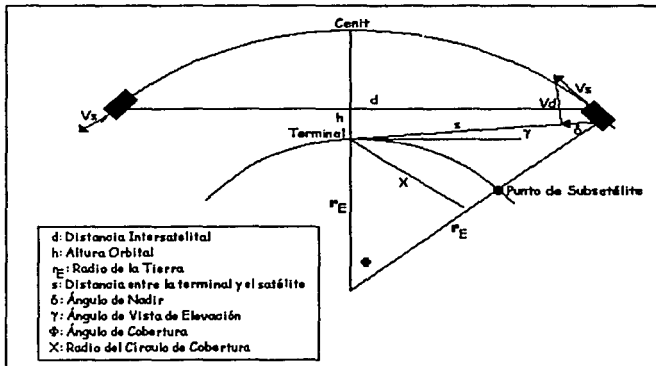


Figura 2. Representación de una sección cruzada en un sistema LEO

Las coordenadas a las que una antena direccional de las estaciones terminales terrenas debe apuntar para comunicarse con el satélite son llamadas ángulos de vista. Estos son especificados como el ángulo de vista de azimuth, α , que es aquel entre el norte y la ruta al satélite en el plano horizontal; y el ángulo de vista de elevación, γ , que es aquel sobre el horizonte al cual la terminal ve al satélite.

Del análisis de la figura 2, se establece que el ángulo de cobertura o ángulo central de la Tierra, es decir la separación angular entre el satélite y la terminal, está dado por:

$$\phi = \arccos \left[\frac{r_E}{r_E + h} \cos \gamma \right] - \gamma$$

Expresado como la diferencia de longitud entre los meridianos del satélite y la terminal (L), la latitud del punto del sub-satélite (l_s) y la latitud de la terminal (l), se tiene que:

$$\cos \phi = \cos L \cos l_s \cos l + \text{sen} l_s \text{sen} l$$

El ángulo de vista de elevación es:

$$\gamma = \arccos \frac{(r_E + h) \text{sen} \phi}{s}$$

El ángulo de vista de azimuth es:

$$\alpha = \arcsen \left[\frac{\text{sen} L \cos l_s}{\text{sen} \phi} \right]$$

Considerando que γ_x es un ángulo de vista mínimo especificado, tal que el índice x ese emplea para representar el límite de la cobertura, entonces, el ángulo de cobertura, que es la separación angular máxima entre el satélite y la terminal, es:

$$\phi_x = \arccos \left[\frac{r_E}{r_E + h} \cos \gamma_x \right] - \gamma_x$$

El ángulo de vista de elevación mínimo γ_x es un ángulo característico para el sistema. Es el ángulo al cual una terminal ubicada en el límite de cobertura del satélite ve al satélite. Este ángulo determina la disponibilidad del enlace y debe ser tomado en cuenta para considerar handoffs de llamadas de satélite a satélite.

De la Figura 2, la distancia entre la terminal y el satélite es:

$$s = \sqrt{r_E^2 + (r_E + h)^2 - 2r_E(r_E + h) \cos \phi}$$

En el diseño de sistemas de comunicaciones empleando LEO, un aspecto crítico a considerar es el número de satélites en la constelación, en conjunto con el retraso de la propagación de la señal y las pérdidas en la trayectoria. Considerando un incremento en la altura de la órbita, el área de cobertura se incrementa y el número de satélites requerido es menor, sin embargo ambos parámetros de comunicación (el retraso y la pérdida) se deterioran.

Para una constelación satelital en órbitas polares circulares, el número de satélites equiespaciados por plano orbital y el número de planos orbitales equiespaciados, considerando una cobertura global completa y sin traslapes es, respectivamente:

$$N_s = \frac{\pi}{\phi - \varepsilon} \quad N_p = \frac{\pi - 2 \arccos[\cos \phi / \cos(\phi - \varepsilon)]}{\phi + \arccos[\cos \phi / \cos(\phi - \varepsilon)]} + 1$$

teniendo que

$$\phi = \arccos \left[\frac{r_E \cos \gamma}{r_E + h} \right] - \gamma$$

y,

$$\varepsilon \cong \frac{(-\phi + \sqrt{\phi^2 + 6\phi \tan \phi})^2}{18 \tan \phi}$$

El número total de satélites LEO en la constelación será $N_t = N_p N_s$.

En la gráfica de la Figura 3, se muestran diferentes valores de N_t contra la altura de la órbita para tres diferentes valores de ángulo de vista. El uso de un ángulo de vista más grande reduce la probabilidad de bloqueo de trayectorias de comunicación, debido a árboles y otros obstáculos. Sin embargo, un incremento considerable de dicho ángulo incrementa el número de satélites requeridos.

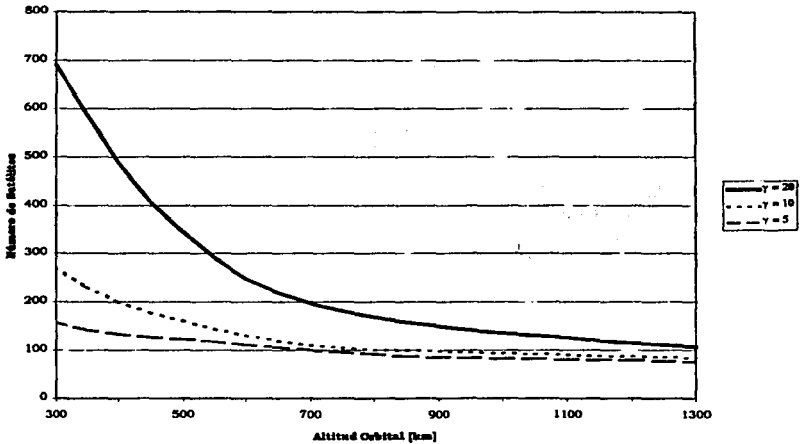


Figura 3. Gráfica del Número de Satélites Requerido para la Cobertura Total en la Tierra

Los enlaces de comunicación de satélites móviles, principal aplicación de los LEOs, son particularmente sensibles a bloqueo por árboles, colinas y edificios. Los enlaces requieren ángulos de vista tan grandes como sean posibles para mantener un buen margen de calidad. De forma alternativa, requieren márgenes de calidad muy altos si los enlaces se mantienen con ángulos de vista bajos.

En este sentido, una deficiencia de los satélites GEO es el pequeño valor del ángulo de vista en latitudes altas tales como la península escandinava, el norte de Asia, Alaska y el norte de Canadá. En éstas áreas en particular se requieren márgenes de enlace de entre 20 y 30 dB para evitar bloqueos. También por esta razón, en la mayor parte de las regiones Árticas y Antárticas no se puede establecer una comunicación satelital por medio de satélites GEO puesto que no proveen cobertura; en contraparte, órbitas polares circulares y elípticas inclinadas pueden mantener una buena cobertura y ángulos de vista considerablemente altos para estas regiones lo que significa una punto a favor en el servicio empleando satélites LEO.

A partir de estos mismos parámetros de ángulo de cobertura, ángulo de elevación mínimo y radio de la Tierra, se determina el área de cobertura de un satélite LEO como:

$$A_{cob} = 2\pi R_c^2 (1 - \cos \phi)$$

En comparación con un satélite geostacionario, los satélites de órbita baja tienen ventajas tales como áreas de cobertura amplias (huella del satélite entendida como el área de una célula, si se considera su uso para comunicaciones personales), la trayectoria del enlace de radio es directa, arquitectura de red más flexible, y algunas ventajas adicionales considerando la provisión de servicios de redes de comunicación global: relativamente poco retraso en la propagación, baja pérdida por propagación, y un elevado ángulo de elevación en latitudes altas, como se mencionó anteriormente. [2]

1.3 Cobertura terrestre para una órbita no geostacionaria.

En el caso de satélites de órbita baja, una cobertura continua está dada por una constelación de satélites, no por uno solo. Aunque se requieren más satélites, el costo relativo de los satélites de comunicación pueden ser menores que de un satélite geostacionario, ya que cada satélite es más pequeño, y los satélites pueden ser diseñados para un periodo de vida más corto, así que el costo de lanzamiento se reduce, en general las órbitas cercanas a la tierra son más fáciles de alcanzar y se pueden enviar varios satélites en un solo vehículo de lanzamiento, por otra parte, el área cubierta por los satélites es menor y se hacen mayor número transferencias de llamada por lo que el sistema es más complejo.

La primer consideración para elegir una constelación de satélites es obtener una multiplicidad específica de cobertura con el menor número de satélites. El área de cobertura que da un solo satélite es determinada por un ángulo mínimo de elevación por la altitud del satélite, cuya elección esta basada en consideraciones de visibilidad, potencia del satélite y tamaño de la antena, tiempo de propagación de la señal, periodos de eclipse, y la distribución de los cinturones de Van Allen. En la figura 1.3.1 se muestra una cobertura de círculo típica. En una constelación de satélites, el plan más eficiente es tener satélites con igual fase dentro de un plano orbital y planos igualmente espaciados alrededor del ecuador. El número total de satélites es el producto del número de planos orbitales y el número de satélites por plano. Este es un problema geométrico complejo para determinar la mejor configuración tal que un número determinado de satélites puedan ser visibles simultáneamente desde un punto de la tierra.

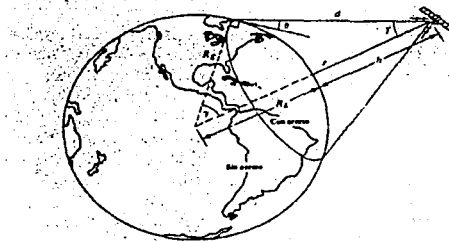


Fig. 1.3.1 Cobertura de un satélite a una altitud h.

Para altitudes bajas, una constelación de satélites en órbitas polares circulares es preferible. Para cada altitud existe un valor óptimo para el número de planos orbitales y el número de satélites por plano. En la figura 1.3.2 se muestra la cobertura continua por un solo satélite con un ángulo de elevación mínimo de 10° como función de altitud.

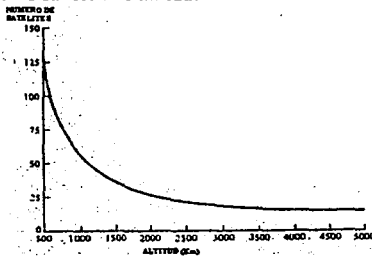


Fig. 1.3.2 Tamaño de la constelación contra altitud para cobertura global ininterrumpida de un sólo satélite con un ángulo de elevación mínimo de 10°.

Los parámetros de cobertura para un satélite en alguna órbita están en relación a la fig. 1.3.1. para un ángulo central dado y el rango de inclinación esta dado por:

$$d = \sqrt{R_E^2 + r^2 - 2R_E r \cos \gamma} \quad \dots(1.3.3)$$

y el ángulo mínimo de elevación está dado por:

$$\cos \theta = \frac{r}{d} \text{sen} \gamma \quad \dots(1.3.4)$$

donde $r=R_E+h$ es el radio de órbita, R_E es el radio de la tierra (6378 km), y h es la altitud de la órbita. Cuando se especifica θ en lugar de γ , la elevación del ángulo está determinada por:

$$d = \sqrt{r^2 - (R_E \cos \theta)^2} - R_E \text{sen} \theta \quad \dots(1.3.5)$$

y el ángulo central está dado por:

$$\cos(\theta + \gamma) = \frac{R_E}{r} \cos \theta = \frac{\cos \theta}{1 + (h/R_E)} \quad \dots(1.3.6)$$

El ángulo de nadie T a la orilla de la cobertura está dado por:

$$\text{sen} T = \frac{R_E}{r} \cos \theta = \frac{R_E}{d} \text{sen} \gamma \quad (1.3.7)$$

y: $T + \gamma = 90^\circ$.

La cobertura obtenida por satélites sucesivos en un plano de órbita dado se describe por una cobertura, como se muestra en la figura 1.3.8.

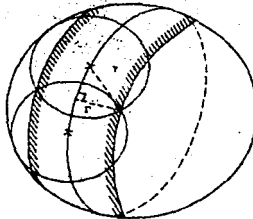
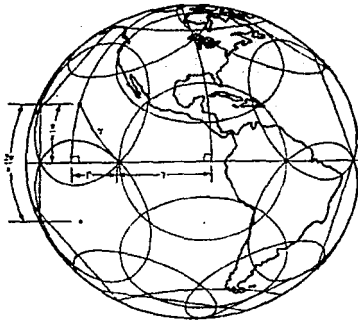


Fig.1.3.8 Cobertura

La cobertura total de la tierra es generada por el traslape de caminos de cobertura. El número total de satélites en la constelación esta dado por $N=ps$, donde p es el número de planos orbitales y s el número de satélites por plano.

Si analizamos las constelaciones polares. Utilizando una geometría esférica, como se ve en la figura 1.3.9, la mitad de ancho angular Γ del camino terrestre con la cobertura de un solo satélite



está dada por:

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

Fig. 1.3.9 Geometría para cobertura global continua por un solo satélite con desfaseamiento óptimo.

$$\cos \Gamma = \frac{\cos \gamma}{\cos(\pi/s)} \quad \dots(1.3.10)$$

Para cobertura global con fase óptima, el punto de intersección de traslape de círculos de cobertura en un plano coincide con la frontera de un círculo de cobertura en un plano vecino y se ubica en el ecuador. En una constelación óptima, los satélites en planos adyacentes giran en la misma dirección. El análisis indica que debido a la presencia de planos rotando en la dirección contraria entre el primer y el último plano, el espaciamiento entre planos α es de alguna más grande que π/p para satisfacer la coacción adicional $(p-1)(\Gamma+\gamma)+2\Gamma=\pi$ entonces:

$$\alpha = \Gamma + \gamma \geq \pi/p \quad \dots(1.3.11)$$

Estas ecuaciones se pueden generalizar para la cobertura provista por más de un satélite sobre un punto dado. Si j es igual al nivel múltiple de cobertura provista por satélites en un solo plano, y k igual al nivel múltiple de cobertura provista por satélites en planos vecinos. El nivel total de cobertura n puede ser factorizado como $n=jk$. En la mitad de ancho angular Γ_j de la Cobertura está dado por:

$$\cos \Gamma_j = \frac{\cos \gamma}{\cos(j\pi/s)} \quad \dots(1.3.12)$$

El espaciamiento inter plano para el óptimo desfaseamiento entre satélites está dado por:

$$\alpha = \Gamma_j + \gamma \geq \frac{k\pi}{p} \quad \dots(1.3.13)$$

Para un α dado, sustituyendo $\Gamma_j = \alpha - \gamma$, se obtiene:

$$\tan \gamma = \frac{1 - \cos \alpha \cos(j\pi/s)}{\text{sen} \alpha \text{sen}(j\pi/s)} \quad \dots(1.3.14)$$

Esta relación nos da el mínimo ángulo central de la tierra que en una constelación desfasada óptimamente nos de cobertura global ininterrumpida, para s , p y $\alpha \geq k\pi/p$.

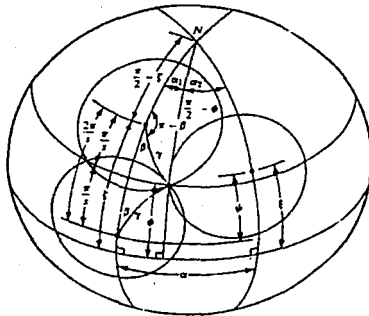


Fig. 1.3.15 Geometría para cobertura continua de un solo satélite arriba de una latitud ϕ .

El análisis se vuelve complicado cuando sólo se requiere una cobertura en una latitud específica. La geometría de la cobertura de un solo satélite se muestra en la figura 1.3.15. La cúspide que se forma por la intersección de múltiples círculos de cobertura a partir de dos satélites sucesivos en un plano y un círculo de cobertura de un satélite en un plano vecino se encuentra en la línea de latitud específica, esta latitud no puede verse con formulas trigonométricas ya que no se trata de un círculo. El satélite guía en el primer plano se encuentra a una latitud ζ con desbalance de fase $\psi = \pi/s$. El ángulo β se localiza en la posición de la cúspide con respecto al círculo de cobertura en el primer plano. Por trigonometría esférica se tiene:

$$\cos \gamma = \cos(2\pi / s) \cos \gamma + \text{sen}(2\pi / s) \text{sen} \gamma \cos \beta \quad \dots(1.3.16)$$

$$\text{despejando: } \cos \beta = \frac{\tan(\pi / s)}{\tan \gamma} \quad \dots(1.3.17)$$

Para determinar ζ , por trigonometría esférica:

$$\cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) = \cos \gamma \cos\left(\frac{\pi}{2} - \zeta\right) + \text{sen} \gamma \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \zeta\right) \cos(\pi - \beta) \quad \dots(1.3.18)$$

$$\text{Simplificando y sustituyendo: } \zeta = \text{angsen}\left(\frac{\text{sen} \phi}{\cos \Gamma}\right) + \frac{\pi}{s} \quad \dots(1.3.19)$$

Entonces, para ψ dado y la configuración mostrada, $(\pi/2 - \zeta) + 2\pi/s = (\pi/2 - \xi) + \psi$, o:

$$\xi = \zeta + \psi - \frac{2\pi}{s} \quad \dots(1.3.20)$$

$$\text{tal que: } |\xi - \zeta| = |\psi - 2\pi/s| \leq \gamma$$

La separación interplanos α es la suma de dos ángulos, α_1 y α_2 , para calcular α_1 , observamos que:

$$\cos \gamma = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \zeta\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + \text{sen}\left[\frac{\pi}{2} - \zeta\right] \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cos \alpha 1 \quad \dots(1.3.21)$$

simplificando y reordenando:

$$\cos \alpha 1 = \frac{\cos \gamma - \text{sen} \zeta \text{sen} \phi}{\cos \zeta \cos \phi} \quad \dots(1.3.22)$$

$$\cos \gamma = \cos\left(\frac{\pi}{2} - \xi\right) \cos\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) + \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \xi\right) \text{sen}\left(\frac{\pi}{2} - \phi\right) \cos \alpha 2 \quad \dots(1.3.23)$$

$$\cos \alpha 2 = \frac{\cos \gamma - \text{sen} \xi \text{sen} \phi}{\cos \xi \cos \phi} \quad \dots(1.3.24)$$

$$\alpha = \alpha 1 + \alpha 2 \geq \frac{\pi}{p} \quad \dots(1.3.25)$$

Se requiere un análisis mas profundo para obtener el valor óptimo de α para tener cobertura en la orilla de la constelación. Para γ y ϕ dados, se hacen iteraciones para encontrar los valores óptimos de p , s y ψ de forma que N sea mínimo. Este proceso puede generalizarse para un nivel de cobertura n dado, donde j y k también están determinados.

Si se utiliza el método de multiplicadores de Lagrange, y se considera el caso de cobertura total de la tierra $\phi=0$, donde se utiliza una aproximación tal que s es grande y γ pequeña:

$$\gamma^2 = \left(\frac{j\pi}{s}\right)^2 + \Gamma_j^2 \quad \dots(1.3.26)$$

$$y \quad p(\Gamma_j + \gamma) = k\pi \quad \dots(1.3.27)$$

Los valores óptimos de s y p que minimizan $N=ps$ están determinados considerando s , p y Γ_j como variables independientes sujetas a restricciones.

$$g1 = \gamma^2 - \left(\frac{j\pi}{s}\right)^2 - \Gamma_j^2 = 0 \quad \dots(1.3.28)$$

$$g2 = p(\Gamma_j + \gamma) + k\pi = 0 \quad \dots(1.3.29)$$

Las condiciones para minimizar N son:

$$\frac{\partial N}{\partial p} + \lambda 1 \frac{\partial g1}{\partial p} + \lambda 2 \frac{\partial g2}{\partial p} = 0 \quad \dots(1.3.30)$$

$$\frac{\partial N}{\partial s} + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial s} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial s} = 0 \quad \dots(1.3.31)$$

$$\frac{\partial N}{\partial \Gamma_j} + \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \Gamma_j} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \Gamma_j} = 0 \quad \dots(1.3.33)$$

Donde λ_1 y λ_2 son los multiplicadores indeterminados de Lagrange. Sacando las diferenciales y eliminando los valores λ_1 y λ_2 , se obtiene la siguiente ecuación.

$$\Gamma_j + \gamma = \frac{1}{\Gamma_j} \left(\frac{j\pi}{s} \right)^2 \quad \dots(1.3.34)$$

Resolviendo las ecuaciones:

$$\Gamma_j \approx \frac{\lambda}{2} \quad \Gamma_j \text{ es dependiente de } j, \text{ los valores para } s \text{ y } p \text{ son:}$$

$$s \approx \frac{2}{\sqrt{3}} j \frac{\pi}{\gamma} \quad \dots(1.3.35)$$

$$p \approx \frac{2}{3} k \frac{\pi}{\gamma} \quad \dots(1.3.36)$$

Donde $n=jk$, también N se minimiza si $j=n$ y $k=1$. [3]

[2] Jamalipour, Abbas et. al. "Traffic Characteristics of LEO-Based Global Personal Communications Networks". IEEE Communications Magazine. Febrero, 1997.

[3] Wilbur L. Pritchard "Satellite Communication Systems Engineering". Prentice Hall, Second Edition, 1999. pp. 115.

$$\begin{aligned}
 & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(1 \right) = \frac{1}{2} \\
 & \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(1 \right) = \frac{1}{2}
 \end{aligned}$$

... ..

$$\left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

... ..

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{2}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(1 \right) = \frac{1}{2}$$

$$\left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

$$\left(\frac{1}{2} \right)^2 = \frac{1}{4}$$

... ..

... ..

... ..

CAPITULO II: MODELO DE UN SISTEMA

2.1.1 Efecto Doppler.

Tantos los enlaces de comunicaciones vía satélite LEO como los HEO se ven afectados de forma inherente por un corrimiento por efecto Doppler que resulta considerable. El corrimiento por Doppler es el resultado del movimiento relativo entre el satélite y la terminal, la estación base u otro satélite. Su efecto en las comunicaciones depende del tipo de modulación, la técnica de multiplexaje empleada y también del método de acceso al transpondedor del satélite. El efecto Doppler es mucho más perjudicial para los enlaces que transportan comunicaciones digitales, mismas que requieren una demodulación altamente coherente.

En los sistemas satelitales LEO, los satélites se mueven a una velocidad, relativa a la superficie de la Tierra, de aproximadamente 7.5 [km/s], sin considerar en primera instancia la velocidad de las terminales satelitales con respecto a la superficie de la Tierra debido a su valor no representativo en comparación con la velocidad de los satélites. Debido a la rotación de la Tierra, los puntos sobre su superficie y por consiguiente las terminales se mueven a 0 [km/s] en los polos y a 0.46 [km/s] en el ecuador.

Para usuarios localizados en la superficie de la Tierra, el corrimiento en la frecuencia por el efecto Doppler cambia conforme el satélite se mueve sobre ellos. Su valor depende tanto de la latitud como de la posición de la terminal en la zona de cobertura del satélite en movimiento. Si el satélite está en la parte ascendente de la órbita, el corrimiento de frecuencia en la Tierra corresponde a un valor máximo positivo como si el satélite apareciera en el horizonte sur. Asimismo, el corrimiento de frecuencia por Doppler se va a un valor absoluto mínimo cuando el satélite está cerca del cenit, y alcanza un valor máximo negativo en el ángulo de elevación mejor antes de que el satélite desaparezca por el horizonte norte.

En una órbita de tipo circular, el valor del corrimiento en frecuencia por el efecto Doppler está dado por:

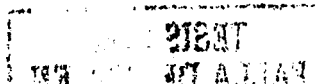
$$\Delta f_D = f_0 \frac{v_D}{c}$$

Tal que,

$$v_D = \left[\sqrt{\frac{\mu r_E^2}{(r_E + h)^3}} \cos \gamma \sin \psi - \frac{2\pi}{86164} \cdot r_E \cos l, \cos \gamma \cos \psi \right]$$

Siendo l , la latitud geográfica de la terminal, y ψ el ángulo entre la línea de proyección entre el satélite y la terminal en el plano tangencial al púnico del sub-satélite y la tangente en el punto del sub-satélite.

No es posible obtener una expresión para el corrimiento Doppler en una forma de expresión cerrada para órbitas elípticas.



El corrimiento Doppler es un efecto que debe ser compensado en los sistemas de comunicaciones por LEO, y puede ser una fuente útil de información en sistemas de localización y posicionamiento: si la posición del satélite se conoce con precisión, entonces se puede determinar una posición relativamente precisa en Tierra con base en el corrimiento en la frecuencia y el número de celular.

El corrimiento Doppler de la ecuación anterior alcanza un valor mínimo (o valor máximo absoluto) para una terminal ubicada en el ecuador, en el límite de la zona de cobertura y con un ángulo ψ dado por:

$$\psi = \psi_x = \arctan \left[-\frac{43082}{\pi} \sqrt{\frac{\mu}{(r_E + h)^3}} \right]$$

La figura 2.1 muestra una vista tridimensional del efecto Doppler y su cambio pendular en la zona de cobertura de un satélite LEO ubicado justo sobre el ecuador. En dicha zona de cobertura se puede identificar una curva en forma de S (punteada, en la figura), que pasa por el punto del sub-satélite en el que todos los puntos tienen un corrimiento Doppler de cero. Dicha curva está atravesada, a un ángulo de 90° , por una curva que contiene todos los puntos de máximo corrimiento Doppler, tanto positivo como negativo.

El ángulo entre los puntos de corrimiento Doppler máximo, mínimo y cero de un satélite LEO ubicado sobre el polo Norte o Sur, y estos mismos en el caso de un satélite ubicado sobre el ecuador es de aproximadamente 4° .

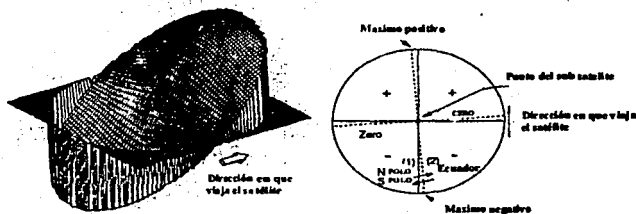


Figura 2.1 Efecto de Corrimiento Doppler dentro de la zona uno, y su oscilación.

Los métodos básicos para una compensación del efecto Doppler son:

- Ciclo cerrado de control de frecuencia entre el satélite y la terminal.
- Corrección del efecto Doppler a bordo del satélite.
- Pre-corrección en el extremo del receptor del enlace, y
- Pre-corrección en el extremo del transmisor del enlace.

El primer método ofrece un control muy preciso sobre el corrimiento de frecuencia para cada usuario, pero requiere un equipamiento complicado, ya sea en el satélite o en las terminales. El

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

segundo es independiente de las terminales dado que no las involucra y requiere un equipamiento más simple, pero introduce errores de frecuencia en el receptor en una célula de cobertura.

2.1.2 Áreas de servicio, cobertura e interferencia.

Para la provisión de servicio, en constelaciones de satélites LEO se debe distinguir entre el área de cobertura de un satélite y su área de interferencia.

Como se mencionó anteriormente, el área de cobertura está determinada por el ángulo de elevación mínimo aceptable, θ_{min} , el cual es un diseño del sistema; cualquier usuario en ésta área puede conectarse con el satélite.

Por otra parte, el área de interferencia se determina por la línea de vista final del satélite; todas las señales de las terminales de usuarios provenientes de ésta área se suman al nivel de interferencia, es posible que el destino de estas señales sea el satélite que las recibe o bien otro satélite vecino.

El área de servicio está comprendida dentro del área de cobertura, y significa el área real en la cual les es permitido a los usuarios conectarse con el satélite, de tal forma que se minimice el efecto de la interferencia debida a señales de terminales en la Tierra. La anchura de ésta área es un parámetro de diseño, pero es correcto considerar el caso en el cual el tamaño de las áreas de servicio para todos los satélites es el mismo y con igual separación entre satélites, $2\pi/N_s$.

La relación entre las áreas de servicio, cobertura e interferencia de un satélite, se muestra en la figura 2.2

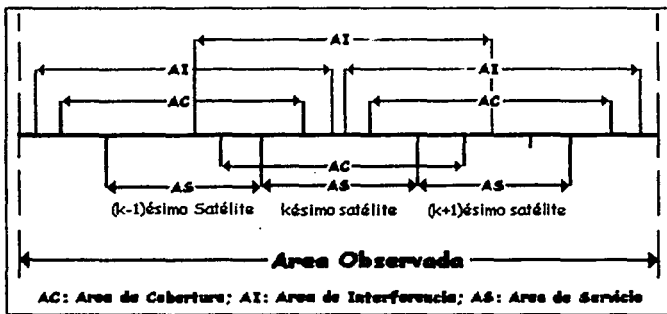


Figura 2.2. Relación entre las áreas de servicio, cobertura e interferencia.

2.1.3 Confiabilidad y disponibilidad.

La confiabilidad y disponibilidad satelitales son mediciones que pueden ser definidas ya sea para un sistema de comunicación satelital, para un satélite por sí mismo o para un enlace de comunicaciones.

La confiabilidad de un sistema es la probabilidad de que permanezca en operación después de un periodo de empleo. Esta medida se determina por la propia confiabilidad de los componentes vitales del sistema. Para eliminando los puntos únicos de falla e incrementar la confiabilidad de los componentes vitales del sistema, usualmente se cuenta con configuraciones de arreglos redundantes.

La disponibilidad de un sistema es el porcentaje de tiempo, sobre un determinado periodo, que el sistema puede llevar a cabo sus funciones en un nivel determinado de desempeño.

La confiabilidad de un satélite es a menudo el factor dominante en la disponibilidad total del sistema de comunicaciones satelitales. Un satélite con falla, un subsistema o una unidad no pueden ser reparadas. Las fallas en los satélites pueden ser ya sea aleatorias, por mal funcionamiento de los componentes o por término del combustible.

La disponibilidad del sistema de comunicaciones y la disponibilidad del enlace están relacionadas, pero son características diferentes. La disponibilidad del sistema, A_S , depende de la disponibilidad de las terminales, A_{term} , la disponibilidad del satélite, A_{SAT} , y la disponibilidad de la estación terrena, A_{gt} , y puede ser expresada como:

$$A_S = A_{term} \cdot A_{SAT} \cdot A_{gt}$$

La parte más crítica en la disponibilidad del sistema de comunicaciones es la disponibilidad del satélite. Asumiendo un modelo de probabilidad exponencial para la falla del satélite, la disponibilidad de un satélite en una sola posición orbital y el número n de satélites requeridos en un periodo T_L están dados, respectivamente, por las siguientes expresiones:

$$A_{SAT} = 1 - \frac{T_R}{p T_F} \quad n = \frac{T_L}{T_F \left(1 - e^{-\frac{T_L}{T_F}} \right)}$$

Considerando que un sistema está separado en k segmentos de órbita por posición orbital, las expresiones anteriores quedan como:

$$A_{SAT} = 1 - k \frac{T_R}{p T_F} \quad n = k \frac{T_L}{T_F \left(1 - e^{-\frac{T_L}{T_F}} \right)}$$

Siendo T_L la duración del sistema, T_R el tiempo en que es necesario reemplazar un satélite en la órbita, T_M el tiempo de vida de la misión (el tiempo de duración del combustible), T_F el tiempo promedio entre fallas de un satélite y p denota la probabilidad de éxito en el lanzamiento y colocación del satélite en su órbita.

La disponibilidad de un salto simple en un enlace de comunicación A_L depende de la disponibilidad del equipo, A_{eq} , y de la disponibilidad de la trayectoria de propagación, A_{prop} , como:

$$A_L = A_{eq} \cdot A_{prop}$$

La disponibilidad de la trayectoria de propagación, A_{prop} , está determinada por las pérdidas atmosféricas, las sombras debidas a obstáculos, los efectos multitraectoria y la interferencia. La disponibilidad del equipo, A_{eq} , depende de la confiabilidad de todo el equipo que interviene en el proceso de comunicación satelital, principalmente de las terminales transmisora y receptora, el transpondedor del satélite y las estaciones terrenas transmisora y receptora.

En el caso de un sistema multi-satelital, independientemente de contar o no con enlaces intersatelitales, la disponibilidad del enlace depende también del número de satélites con línea de vista en cualquier instante por lo cual se entiende que sistemas con cobertura doble o múltiple tienen una disponibilidad mucho más alta que sistemas de cobertura simple.

En lo que respecta a confiabilidad, la principal diferencia entre los satélites LEO y los GEO es que, debido al menor peso, se puede proporcionar equipo de redundancia que hace posible el uso de unidades de menor costo y simplifica el sistema de pruebas.

2.1.4 Parámetros de tráfico.

Suponiendo el uso de una constelación de satélites LEO para comunicaciones personales, y debido a las grandes áreas de cobertura implícitas en cada célula, un solo satélite puede cubrir, a la vez, extensiones continentales donde se ubiquen grandes ciudades o poblaciones medianas, o bien puede cubrir una porción vasta e inhabitada de océano. Por consiguiente la distribución de tráfico entre los satélites de la red está desbalanceada ya que un satélite en la porción continental manejará una cantidad mucho mayor de tráfico que su vecino cuya área de cobertura se construye a aguas abiertas (océano) Esta característica de desbalance en el tráfico es inherente a la red de satélites LEO.

En un área observada de la constelación de satélites LEO, como la ilustrada en la figura 4 previamente, el desbalance de tráfico se modela considerando una cantidad de usuarios grande pero finita, N_U , cuya localización particular está considerada en términos de una variable aleatoria α tal que su función de densidad de probabilidad es:

$$P(\alpha) = \frac{A}{\nu} \exp\left(\frac{-\alpha^2}{2\nu^2}\right)$$

De la cual ν es un parámetro para expresar la uniformidad en la distribución del tráfico, y A es el factor por medio del cual se cumple la condición de que la probabilidad total de la existencia de un usuario en ésta área de observación sea igual a 1.

Cabe hacer notar que un valor de n infinito equivale a una distribución de tráfico uniforme. Se considera que el valor de $\alpha = 0$ se refiere al origen de la localización angular de un usuario, relativo al cual se considera la distribución de tráfico.

En una situación de tráfico no uniforme, durante el movimiento de los satélites la calidad del k -ésimo satélite se degrada al peor caso cuando éste se localiza justo por arriba del punto de pico de

tráfico, en $\alpha = 0$, en comparación con los satélites vecinos cuya calidad de señal resulta alta, lo anterior se esquematiza en la figura 2.3.

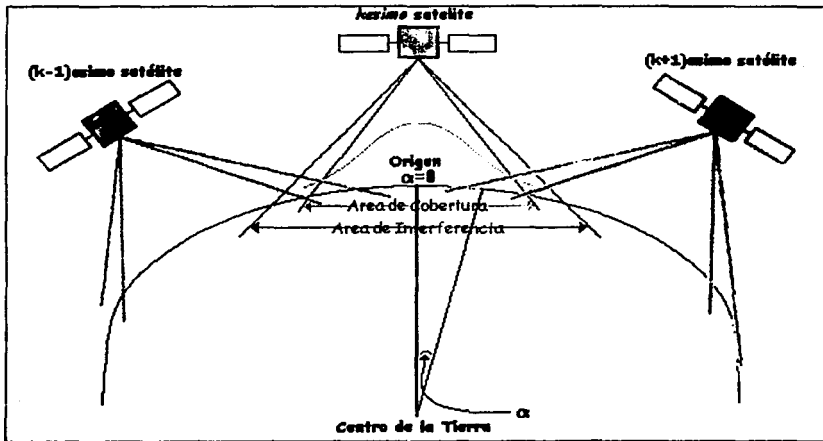


Figura 2.3. Representación esquemática del modelo de tráfico en un sistema LEO.

2.1.5 Parámetros del enlace.

En cualquier sistema de comunicación satelital, ya sea que lleve a cabo un papel sólo como repetidor o bien desempeñe funciones adicionales en concentración y procesamiento de tráfico, se tienen que considerar parámetros del enlace. En el segundo caso pueden determinarse parámetros adicionales para los enlaces intersatelitales e inter orbitales. Para un sistema de satélites LEO, la distancia S de satélite a la terminal tiene un valor máximo de:

$$S_{\max} = (r_E + h) \frac{\text{sen } \phi}{\text{cos } \gamma}$$

Es decir que:

$$S_{\max} = \sqrt{(r_E + h)^2 - r_E^2 \text{cos}^2 \gamma} - r_E \text{sen } \gamma$$

Donde los parámetros son r_E el radio de la Tierra, h la altura instantánea, ϕ el ángulo de cobertura y γ el ángulo de vista de elevación, definidos con anterioridad.

La pérdida por propagación en el espacio libre, L_f y el retraso en la propagación τ_p , considerando medio salto, están dados por:

$$L_f = 20 \log \frac{4\pi s f_o}{c}$$

$$\tau_p = \frac{s}{C}$$

El retraso total en comunicaciones consiste de retraso en la propagación además de retraso en el procesamiento de las señales digitales, o en los circuitos tratándose de señales analógicas. También hay que considerar un retraso por conmutación.

Los retrasos en el tiempo pueden implicar un problema en comunicaciones de voz, especialmente en presencia de eco debido a reflexiones. En un sistema de comunicaciones GEO, el máximo retraso en la comunicación por propagación en un medio salto no debe exceder 138.9 ms, y el mínimo 119.3 ms. Para sistemas LEO, el rango de distancias, retrasos, pérdidas por propagación y tiempo de avistamiento del satélite en comparación con la altura orbital a las que es posible la comunicación.

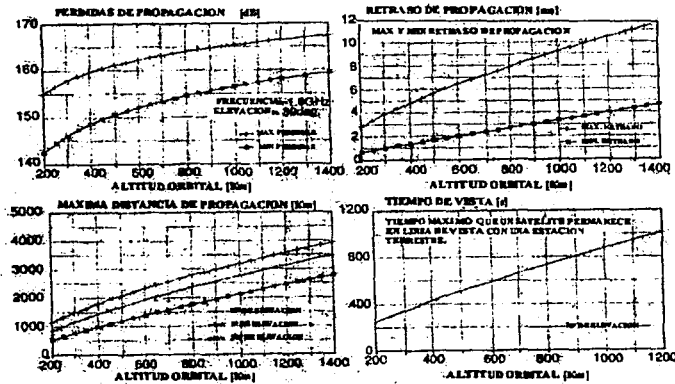


FIGURA 2.4. Gráficas de distancia, retraso, pérdida por propagación y tiempo de avistamiento. La figura 2.4 ilustra el tiempo de avistamiento máximo del satélite, es decir, el máximo tiempo en que un solo satélite puede ser visto por una terminal de usuario. Este máximo se alcanza ante el paso por el cenit y se denota que el valor de este máximo observa una fuerte dependencia con la altura de la órbita. Este tiempo determina la frecuencia con que se realizan handoffs en el sistema e involucra señalización intersatelitaria.

Una medida de la calidad del enlace, conveniente para comparar enlaces analógicos con enlaces digitales, es la relación de portadora a densidad de ruido, C/N_0 , que está dada por:

$$\frac{C}{N_0} = PIRE - 20 \log \frac{4\pi s f_o}{c} + 10 \log \frac{G}{T} + 10 \log L_d - 10 \log k$$

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

2.1.6 Parámetros de Desempeño.

Un sistema de satélites LEO puede ser analizado empleando dos parámetros usados de forma común en radiocomunicaciones por paquetes: el throughput y el retraso promedio en el canal de subida.

El throughput de un solo satélite LEO, considerando la distribución de tráfico, es:

$$\xi_{i, norm} = \frac{\xi_i}{E\{N_i\}} \text{ [paquetes/ranura/usuario]} \quad i = k-1, k, k+1$$

Donde ξ_i es el número esperado de paquetes transmitidos exitosamente para el i ésimo satélite en una sola ranura de tiempo (time slot), y $E\{N_i\}$ es el número esperado de usuarios en el área de servicio del satélite, el cual puede ser calculado a partir del número total de usuarios, N_U , y la función de distribución de probabilidad del tráfico calculada para los límites de la cobertura.

En un área de observación, por ejemplo para tres satélites, se tendría:

$$\xi_{norm} = \frac{\xi_{k-1} + \xi_k + \xi_{k+1}}{E\{N_{k-1}\} + E\{N_k\} + E\{N_{k+1}\}}$$

El retraso promedio es el tiempo promedio que toma a un paquete generado por una terminal terrena ser recibido de forma exitosa por el satélite. Se consideran dos tipos de retrasos:

- Retrasos en tiempo para paquetes generados en el área de servicio del i ésimo satélite, ΔT_i .
- Retraso en tiempo promedio o normalizado para paquetes generados en cualquier área, ΔT_{norm} .

Para el modelo de tres satélites en un área de observación cualquiera,

$$\overline{\Delta T}_{norm} = \frac{\Delta T_{i-1} E\{N_{i-1}\} + \Delta T_i E\{N_i\} + \Delta T_{i+1} E\{N_{i+1}\}}{N_U}$$

Para $E\{N_i\}$ usuarios esperados en el área de servicio del i ésimo satélite. Si se tiene una distribución de tráfico uniforme, $\Delta T_{norm} = \Delta T_i$, pero en general esto no sucede.

2.1.7 Enlaces intersatelitales

Los enlaces intersatelitales existen cuando los satélites se comunican unos con otros por medio de línea de vista, esto hace tener un soporte para llamadas de móvil a móvil entre diferentes huellas de satélites, estos enlaces son de suma importancia en los retrasos de los análisis de enlaces, además de que se libera una cantidad de tráfico de la infraestructura terrestre, aunque se suman algunas complejidades como handover (tiempo para transferir el mensaje entre una celda y otra)

entre satélites. Con este tipo de enlaces se tiene flexibilidad en el enrutamiento, se construye inherentemente redundancia en la red, y no es necesario tener línea de vista entre los gateways y los usuarios en cada satélite de la constelación.

Algunas de las condiciones para tener enlaces intersatelitales es por ejemplo, tener antenas fijas para los enlaces intersatelitales, esto puede no ser posible para el caso de enlaces interplanos, satélites en diferentes órbitas, tanto la trayectoria de la línea de vista entre estos satélites puede cambiar de ángulo y longitud, como la separación y convergencia entre cruce de órbitas, da lugar a:

- Altas velocidades relativas entre satélites.
- Efecto doppler.
- Problemas de control de rastreo cuando las antenas deben de girar alrededor.

Sin embargo las antenas fijas son posibles en el caso de enlace intraplanos, entre satélites a diferentes fases sobre la misma trayectoria orbital, dada una órbita circular.

Se puede considerar como efecto de la Segunda Ley de Kepler, donde las áreas iguales de un arco de plano orbital son barridas en tiempos iguales. Con órbitas elípticas, un satélite podría ver la posición relativa de los satélites adelante y detrás aparecer o caer considerablemente a través de la órbita, además de considerar el apuntamiento hacia las antenas en intraplanos, sería necesario hacer una compensación. Con órbitas circulares, este problema queda resuelto.

La elección de órbitas circulares tiene también la ventaja de permitir una huella del satélite relativamente constante en forma y en retrasos de los enlaces. Considerando la curvatura de la tierra y otros factores que perturban los enlaces. En base a esto existen diferentes constelaciones basadas en órbitas circulares.

Para la elección de la órbita se consideran los siguientes casos:

- El patrón de estrella.
- La inclinación de la órbita en el ecuador permanece constante a 90°, todas las órbitas cruzan los polos, si se observa desde alguno de los polos, todos los planos se intersectan y forman una estrella.

La correcta ascensión de los nodos ascendentes de los planos orbitales $\Omega_1 \dots \Omega_n$, es tal que están igualmente espaciados, a excepción de dos planos que giran en sentido contrario en las orillas del anillo, donde no puede haber enlaces intersatelitales debido a la velocidad relativa alta (el doble de la velocidad orbital) de los satélites moviéndose en direcciones opuestas, en este caso la separación entre los planos girando en dirección contraria es ligeramente menor que entre los otros planos, para asegurar una cobertura completa de la tierra.

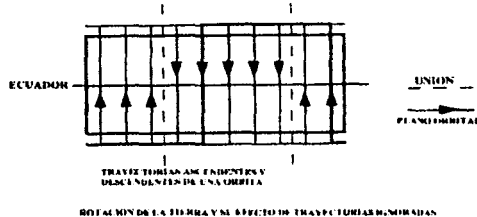


Fig 2.5

En la figura 2.5 se ignora el efecto de la rotación de tierra en las trayectorias orbitales.

A excepción de los polos, cualquier punto en la superficie de la tierra ve a los satélites moviéndose en intervalos iguales de norte a sur y de sur a norte. Como los satélites en planos vecinos están más cerca de los polos que en el ecuador, la cobertura no está igualmente dispersa, con variación que depende de la latitud. En el ecuador se encuentra la máxima cobertura y distancia entre orbitas que puede ser definida. En los polos, las múltiples trayectorias causan interferencia y múltiple cobertura, así que se requiere que algunas huellas sean inhabilitadas y las velocidades relativas altas de los satélites en planos vecinos hacen que mantener el enlace sea muy difícil debido al efecto doppler y la necesidad de girar las antenas alrededor de 180° para seguir a los satélites continuamente en el polo.

Para tener una idea de la forma de la red, se toma la red fuera de la tierra rompiendo el anillo formado por los planos orbitales y se coloca en un plano.

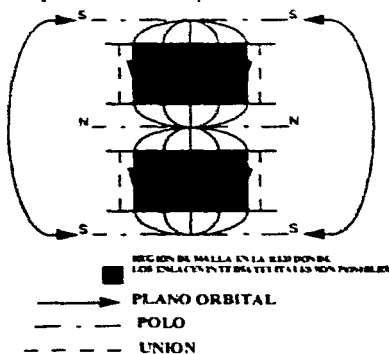


Fig 2.6

Unir un polo a sí mismo (SS a SS) y expandir la red alrededor de forma que las uniones sean adyacentes y la esfera regrese, como se muestra en la Figura 2.6.

Se puede simplificar este diagrama, si se supone que es equivalente topológicamente al mismo diagrama de media vuelta, causado por órbitas entrelazadas unas a otras en los polos, de forma que se puede visualizar un rectángulo. Se asume que no existen enlaces intersatelitales cerca de los polos cuando se hace esto.

Esta constelación de la red tiene la topología de un anillo, cuyas orillas están formadas por la unión. (estrictamente hablando, ahora no tiene vueltas, es un cilindro, como un anillo en una órbita plana, solo en dos dimensiones. Sin embargo, llamaremos anillo a los cilindros uniformes que tienen vueltas de esta forma, así mismo a los cilindros uniformes).

La unión compuesta por los planos que rotan en dirección contraria, donde no existen enlaces intersatelitales, pueden hacer el enrutamiento más largo ya que el tráfico en las partes opuestas de la tierra deben pasar a través de enlaces intraplanos sobre los polos. La distancia en la red entre dos estaciones terrestres en la tierra va a variar, dependiendo de donde se encuentre la unión, y el tiempo de comunicación entre estas, como resultado va a haber un cambio. Aunque las estaciones

terrestres estén físicamente siempre a la misma distancia sobre la superficie de la tierra, la distancia aparente de la red entre ellas cambia con una red unida, como en la Figura 2.7.

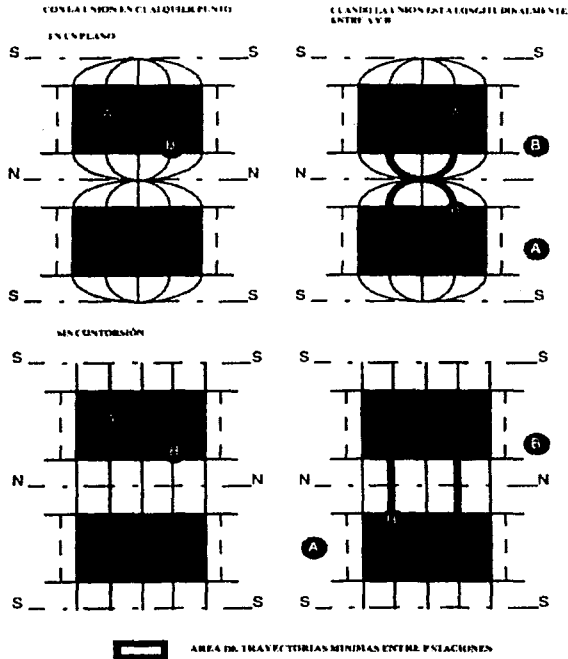


Fig 2.7

Si se duplica el número de planos orbitales de forma que cada plano se traslape con su retrógrado, se puede eliminar esta unión. Sin embargo, se utiliza el doble del número de satélites, y se tienen dos planos de satélites en cada punto. Esta es una cobertura doble de la red, así que cada punto en la red tiene dos áreas de la red distintas y ampliamente separadas donde puede existir comunicación. Estas coberturas son diferentes a las coberturas donde se puede ver a dos satélites al mismo tiempo a latitudes dadas en la tierra.

El anillo ha sido ensanchado, de forma que las uniones longitudinales en las orillas se envuelvan por encima y haya contacto con ellas mismas. Con todas las orillas en contacto, se tiene un toroide. Este toroide mapea en una esfera, para hacerlo, el diámetro del eje del toroide se reduce a

cero, de forma que los dos lados del toroide coincidan: Se puede obtener la misma esfera con cobertura doble de la red desde una malla cuadrada.

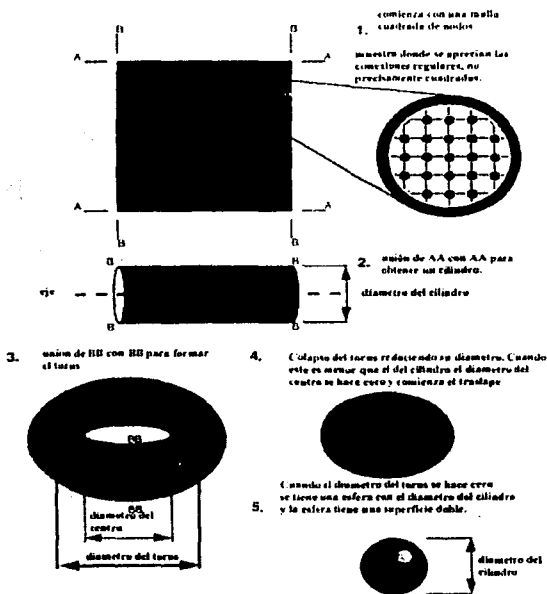


Fig. 2.8

Con un modelo de menor tamaño, existe un cambio, el área de la superficie por alterar los tamaños de los enlaces. Se permite que el grid original cuadrado sea de tamaño n por n . Entonces el cilindro tiene longitud n y circunferencia $n=2\pi r$, y el diámetro del toroide es también r , como el corte del círculo por el diámetro es nuevamente $n=2\pi r$, de la longitud del cilindro. El toroide se contrae entonces para tener una esfera de doble superficie de radio r , la superficie del área $2 \times 4\pi r^2 = 8\pi r^2$. Figura 2.8.

Empezaremos con un grid de área de $n^2 = (2\pi r)^2 = 4\pi^2 r^2$, o un factor de $\frac{\pi}{2}$ más grande. Se conserva el mismo número de nodos; toda la reducción ha sido en los enlaces.

(aquí no se observa unión, no hay cambio de la distancia entre dos puntos, es constante. Una red sin uniones puede tener por lo tanto, un retraso constante entre dos puntos, que será importante como constante de retraso y es muy útil en aplicaciones de multimedia)

Esta esfera de doble superficie, proporciona cobertura doble, cada punto en la tierra ve dos planos de la red y dos puntos en la red separados una gran distancia, uno en cada plano. Si una estación en la tierra puede ver dos puntos, se puede comunicar con ellos. Si estos están en diferentes planos, el punto en la tierra se esta comunicando con dos partes distintas y separadas de la red.

Si existiera la capacidad de poner tráfico en la malla de la red en más de un punto, o nodo visible, desde algún punto de la tierra, se complica el análisis. La amplia separación y relación de dos puntos de entrada, incrementa el número de problemas a analizar, estos son, Cuál será el diámetro de la red, si se mantiene la suposición de dependencia, Cómo se decide a que punto de tráfico se entrará a la red en un momento específico. En el caso de una sola cobertura de red con unión, dándole a la red la topología de un anillo curvo con ejes ecuatoriales, es mejor al ser implementado, como Iridium y teledesic.

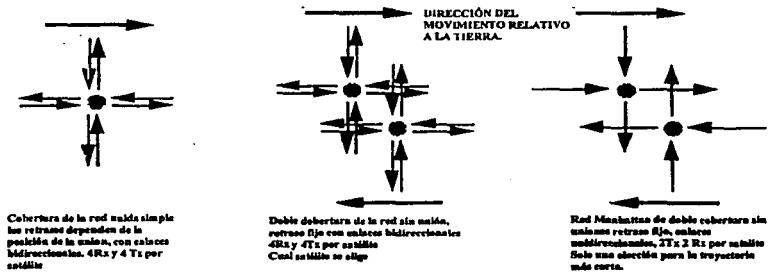
Reduciendo la doble cobertura de red con corte polar, se tiene una cobertura doble en una constelación de estrella, puede ser factible para los satélites tener tráfico solo en la mitad de sus órbitas, de forma que, alrededor de la tierra, el funcionamiento de la red es visto como un flujo de satélites desde un polo hasta el otro, y se cambia la doble cobertura sin unión por una cobertura simple con un cilindro de ejes polares, con flujo unidireccional a lo largo del cilindro y sin uniones longitudinales. Los satélites en la red que alcanzan el polo caen de la red y permanecen apagados mientras regresan en dirección opuesta a los satélites en la red, y se les permite ser parte de la red cuando regresan al primer polo.

Esto da como resultado una comunicación interplanos sencilla completa; mejor que una doble, la posible cobertura de la red, con la necesidad de comunicación en los polos, donde la comunicación entre diferentes órbitas en diferentes direcciones no es posible.

Sin embargo, como esta cobertura de red requiere la mitad de la red sin hacer nada todo el tiempo, y duplica el número de satélites que son lanzados y puestos a operar, esta solución es cara e ineficiente, aunque convertir una red sin uniones de doble cobertura en una red de cobertura cilíndrica con ejes polares, es interesante.

Reducción de la doble cobertura- Manhattan. Hay una forma de resolver la doble cobertura en la red, manteniéndola sin uniones. Esto involucra la red Manhattan, basada en una red de computadoras sobre la superficie de un toroide, como la base de la constelación de satélites.

En la red Manhattan, cada nodo se encuentra en dos anillos en direcciones ortogonales. Los datos viajan alrededor de esos anillos en una sola dirección, de forma que cada computadora tiene dos entradas de red y dos salidas. Si los datos pueden viajar en ambas direcciones en el anillo, tenemos una red Manhattan bi-direccional. Figura 2.9



ENLACES
Fig 2.9

Si se asume que cada satélite se comunica con todos sus vecinos, enviando y recibiendo información directamente, entonces existe una red Manhattan bidireccional. Esto hace que exista una red de cobertura doble y se ven dos planos de la red desde la tierra que envuelve un toroide se obtiene una esfera, y da como resultado redundancia, Figura 2.10.

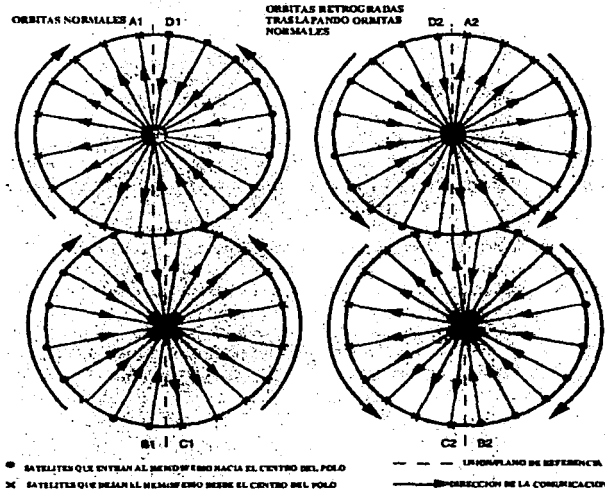


Fig 2.10

Sin embargo, este no es necesariamente el caso, si se tiene una red de doble cobertura o Manhattan bidireccional, tenemos más enlaces de los que se necesitan para asegurar la

comunicación. Si se reducen los enlaces en el caso Manhattan, se mantiene una constelación de red completamente conectada, y la estación en tierra elige el satélite al que va a enviarle dependiendo de donde se quiere comunicar, a fin de obtener la ruta más corta.

Una constelación Manhattan completa sin uniones Fig 2.8; Muestra todos los hemisferios como son vistos desde el polo norte. El hemisferio sur está invertido y visto a través de la tierra, como si la tierra fuera de vidrio, como indican los puntos y cruces en los polos. Esto permite a la ruta del satélite ser seguido hacia la orilla de un hemisferio movido por la misma posición por el hemisferio en que se encuentra, aunque esta vista aproximada significa que hacia adelante y a la derecha en un hemisferio es visto como hacia adelante y a la izquierda en el otro, como estar conmutando entre la vista de un satélite arriba y abajo.

En Ambas órbitas, normal y retrograda, un satélite o nodo viajará entre las mitades de los hemisferios en el orden ABCDA, como todas las comunicaciones en el mismo plano orbital. Con la red Manhattan dos satélites transmisores y dos receptores, la comunicación entre diferentes planos sobre la orilla puede pasar desde el hemisferio (1) al hemisferio (2) de la misma orilla o regresar. Así, las órbitas normales en A1, pasan paquetes alrededor en sentido de las manecillas del reloj sobre la orilla hacia A2, que los pasa de regreso hacia A1, siguiendo los arreglos. (La red Manhattan bidireccional tiene enlaces bidireccionales y así los arreglos bidireccionales indican que se pueden pasar paquetes en dirección de las manecillas del reloj y en dirección contraria).

La orilla no es más larga que una orilla real, dado que las comunicaciones pasan sobre esta debido a la naturaleza de la doble cobertura. En realidad, la orilla es un simple plano de referencia donde los planos de las órbitas están colocados como referencia, y este plano de referencia puede ser a cualquier longitud.

Si vemos desde el ecuador y se observan las órbitas normal y retrograda, en el punto de entrada y salida del hemisferio, se puede observar el toroide que se había discutido con anterioridad.

Una red sin orillas permite tener fijo el retraso de comunicaciones entre dos estaciones terrestres, ya que no existe cambio de posición en las orillas relativo a la estación terrestre. La red Manhattan bidireccional, o constelación de doble cobertura de red, ofrece a la estación terrestre la ruta de satélites de la misma longitud de retraso.

La red Manhattan, que tiene menos enlaces, ofrece la posibilidad de elegir entre una larga trayectoria o una trayectoria corta (no necesariamente tan corta como en el caso bidireccional) a través de diferentes satélites en diferentes planos de red. Sin embargo, para la ruta más corta en comunicaciones entre dos estaciones terrestres esto significa que una estación terrestre debe recibir desde un plano de red y enviar hacia otro plano (El traslape de patrones de radiación viajando en diferentes direcciones hace esto difícil, pero el uso de células fijas en tierra, como en teledesic, puede simplificar la implementación), proviendo de retrasos de igual longitud en ambas direcciones, no son necesarios, solamente se puede utilizar una cabecera para enviar y recibir.

La ausencia de redundancia en la constelación de la red Manhattan significa que si un solo enlace falla, incrementa el tiempo de retraso considerablemente. Esto acoplado con problemas de implementación técnica para la diversidad del satélite, de forma que las trayectorias más cortas pueden mejorarse enviando a una capa de la red y recibiendo desde otra, hace la implementación de esta red muy difícil.

El número de satélites que puede ser lanzado para una red sin orilla y el problema de doble cobertura de red, hacen construir alguna forma de constelación de red sin orillas de pequeños beneficios al menos con retraso fijo entre las estaciones de la red es esencial.

Sin embargo, esto no invalida la red sin orillas como un punto de comienzo para análisis, estando alertas de las limitaciones que estas suposiciones implican.

El patrón delta, es un caso más general de una constelación que el caso polar. Las órbitas están inclinadas con inclinación constante δ , e incluso los ángulos de espaciamiento de los ángulos rectos de nodos ascendentes $\Omega_1 \dots \Omega_p$ asegura una total cobertura terrestre. No existe cobertura a una cierta latitud dependiendo del valor superior de δ , y para asegurar que no existen periodos sin cobertura terrestre bajo esta latitud, es necesario agregar más planos orbitales y ajustar el espaciamiento hasta que cada dirección envuelva hasta juntarse consigo mismo, dando la doble cobertura de red.

El patrón delta puede verse como equivalente a la estrella de doble cobertura, pero para una banda más estrecha de latitudes cerca del ecuador. Otra vez, sería posible para satélites viajando hacia un polo para "desprenderse" de la red., efectivamente, de esta forma con la topología de un eje polar con cilindro de cobertura sencilla, o para la doble cobertura el patrón delta será dividido en dos coberturas sencillas.

El patrón delta con una gran inclinación y las órbitas extra sin tener doble cobertura de la red es muy parecida a un patrón de estrella. Para Iridium, $\delta=86.4^\circ$, y el problema de mantener enlaces intersatelitales a altas latitudes y velocidades relativas altas simplemente se evita si se tienen solo tres líneas de enlaces intersatelitales interplanos alrededor del ecuador, donde las velocidades relativas de los satélites en diferentes planos orbitales son bajas.

Una red Delta sin orillas da doble cobertura de red en cada punto en la tierra bajo la red, haciéndolo más complejo para el análisis tierra espacio, o se simplifica apagando la mitad de los satélites la mitad del tiempo.

Sería posible colocar las órbitas con una constante de inclinación con un plano de referencia, que no tiene que estar en el ecuador. Sin embargo, si se colocaran las órbitas con una constante de inclinación referidos a otro plano que no fuera el ecuador, se complicarían las trayectorias en tierra, y la variación de precisión debido a la curvatura de la tierra distorsionarían la red, haciendo que el control de la cobertura terrestre y mantener los enlaces intersatelitales a través de apuntamiento mucho más compleja. Como resultado, el Ecuador es el único plano de referencia a considerar.

Existen órbitas circulares de inclinación variable δ y espaciamiento Ω que intentan distribuir la cobertura orbital en todas las dimensiones. Es posible un gran número de constelaciones diferentes. Sin embargo, si se varía la inclinación hay como resultado una variación en la precisión debido a la curvatura de la tierra, haciendo difícil mantener la posición orbital relativa entre planos orbitales y así la topología de la red a través de enlaces intersatelitales.

El problema de la precisión diferencial causada por la variación de inclinación se puede evitar si todas las órbitas tienen la misma inclinación, con excepción de la órbita ecuatorial, que está completamente libre de afectación por la precisión. Sin embargo, los ángulos grandes entre planos orbitales hacen difícil mantener los enlaces intersatelitales en los planos vecinos que tienen altas

velocidades relativas con el incremento del efecto Doppler, y el apuntamiento es difícil. La falta de precisión de la órbita ecuatorial causa que los satélites pierdan sincronía con los demás.

Se concentra en las fronteras la múltiple visibilidad de satélites interpolando múltiples planos de baja inclinación con pocos satélites usando cuidadosamente la fase para llenar los huecos entre las huellas de satélites en el mismo plano. Aunque este sistema lo utiliza Globalstar con interpolación y fase para disminuir el número de satélites requeridos, esto da lugar a severas restricciones en redes intersatelitales.

Como las otras constelaciones, este patrón orbital se repite a intervalos regulares, de forma que el análisis de una constelación cuasi estacionaria es posible. A pesar de la cobertura terrestre plana, estos patrones tienen dificultades para los enlaces intersatelitales, con desventajas que las configuraciones delta y estrella no tienen.

En el caso de una constelación sin orilla contamos con los efectos de cobertura doble, se puede comenzar el análisis de "sin orilla", realmente una red homogénea donde cada nodo de satélites es idéntico, ve la misma red en la misma forma, y se considera a sí mismo el centro de la red. Esta red homogénea es el punto de partida para un análisis matemático, podemos tener una mejor aproximación para el caso de una cobertura única, que proporciona las diferencias entre redes con orilla y sin orilla, y hace diferentes la doble cobertura y la sencilla.

Para comenzar, se considera que la red es homogénea, de forma que el análisis para un nodo es aplicable para todos los demás, también asumiendo que la entrada a la red en cada nodo es homogénea, no es fácil ver esto en un caso real, ya que por ejemplo se originan más llamadas en tierra que en el mar, y estas varían de acuerdo a la región, de acuerdo a densidad de población, el tiempo local (aunque el concepto de "worldwide busy hour" está bien establecido).

Ignorando todo esto, el análisis se simplifica considerablemente, una vez que se ha construido el análisis inicial y la simulación, se pueden introducir sistemas más complejos y más aproximados.

Un cálculo teórico no considera el tiempo de retraso en la transmisión de paquetes, por que es despreciable en comparación con el tiempo de procesamiento o la longitud de los paquetes. Sin embargo las grandes distancias entre nodos en una constelación de red de satélites tiene asociados retrasos de propagación, que es muy importante considerar para el retraso total del retraso de un paquete que pasa a través de la red como parte del tiempo real, se considera un retraso en dos direcciones.

También se puede ver desde la geometría física que la distancia de los enlaces varía alrededor de la tierra y en diferentes direcciones desde el satélite, diferentes rutas pueden favorecer que el retraso de propagación sea más corto.

Las variaciones en el retraso de propagación acarrearán dificultades en sincronización y lapsos entre satélites, si se desea implementar de la misma forma que una red SDH y ATM. El retraso de propagación también puede ser usado como cola de paquetes cortos, que tienen implicaciones interesantes para una red basada en deflexión de enrutamiento.

Una parte de la suposición que la red es homogénea, al igual que la entrada es que en todo el mundo se tienen un número de espacios equivalentes, estaciones Gateway actuando idéntico que un gateway a la estación terrestre, capaz de compartir cantidades iguales de tráfico desde y hacia

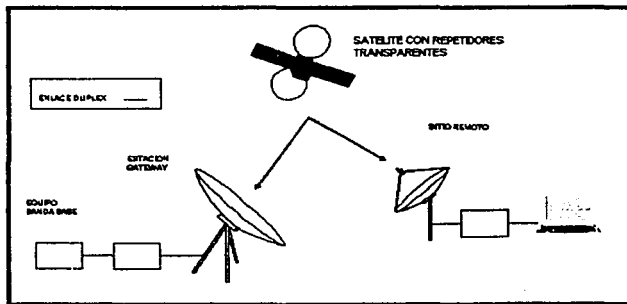
la constelación de red del satélite. Esto ignora condiciones reales, como población demografía influencias del terreno en la elección de estaciones terrestres, además de cielo y tierra.

Matemáticamente, es mucho mejor asumir una estación Gateway por cada nodo de satélite (esto es, si se asume que es mejor una cobertura de red sencilla que una doble) e ignorando la diversidad de muestras tal como una estación viendo a más de un satélite vecino y dispersando tráfico entre nodos visibles o un satélite viendo a más de una estación.

De alguna forma es posible probar que elegir aleatoriamente satélites visibles, si todas las estaciones pueden seleccionar aleatoriamente el mismo número de satélites vecinos, puede ser que no sea afectado el análisis de una red suficientemente grande. Por supuesto en la realidad a diferentes latitudes se ve diferente número de satélites como la distancia entre huellas de órbitas estrechas, así que eso no es muy usual. Un buen punto para comenzar, puede ser investigar como elegir aleatoriamente uno de los satélites vecinos para enviar y recibir resultados que afectan el tráfico, asumiendo que un gateway puede ver a todos los vecinos del nodo conectado al. Puede ser necesario verificar que la suposición de independencia para la entrada y el paso de tráfico se mantenga. [4]

2.1.8 Tecnología Bent Pipe

Esta tecnología tiene como característica utilizar un gran número de estaciones gateway que transmiten hacia un gran número de terminales, en la transmisión de las terminales hacia el gateway se utiliza una baja tasa de transmisión, se utilizan los satélites como repetidores transparentes.



[4] Lloyd Wood, MSc in Satellite Communication Engineering, University of Surrey U.K.

CAPITULO III: ACCESO MULTIPLE

Las Técnicas de acceso permiten a varias estaciones en la misma red intercambiar información a través de un punto nodal representado por el satélite. El satélite tiene un repetidor que consiste de uno o más canales, operando en paralelo en diferentes sub-bandas del ancho de banda total utilizado. La necesidad de acceso múltiple crece debido a que generalmente más de dos estaciones terrestres se encuentran dentro del área de servicio del satélite. Haciendo uso de técnicas de acceso, más de dos estaciones terrestres utilizan simultáneamente un transpondedor del satélite, se explotan las ventajas geométricas del satélite y se utilizan como base de la red de satélites.

La información se transfiere a través de varias estaciones terrestres, esto implica el establecimiento de más de un enlace en el mismo canal del satélite, dependiendo el tipo de acceso que se esté utilizando el canal del satélite amplifica una o más portadoras, esto modifica las expresiones de los enlaces de subida y bajada, donde también se toman en cuenta los efectos de intermodulación resultantes de la no linealidad de las características de transferencia del canal del satélite, además de compartir la potencia de salida del canal del satélite entre todas las portadoras.

El acceso múltiple también puede ser clasificado por la forma en que los canales de comunicación son asignados a los usuarios, estos pueden ser pre-asignados, lo que significa que están localizados en una base fija o parcialmente fija para algunos usuarios y estos no están disponibles para uso general. Este tipo de acceso es fácil de implementar, pero es eficiente solo para circuitos con una carga de tráfico constante. Una alternativa es el acceso múltiple con asignación sobre demanda, en este método todos los circuitos están disponibles para todos los usuarios y son asignados dinámicamente de acuerdo a la demanda. Sus resultados son más eficientes sobre todo para el uso de canales pero es más costoso y más difícil de implementar.

Muchas aplicaciones de comunicaciones satelitales involucran un cierto número de estaciones terrestres comunicándose con todas las demás a través de un canal del satélite. La palabra canal en satélites se utiliza para describir banda de voz, datos, o canal de video, y un canal de RF y se utiliza a través del transpondedor. Un transpondedor puede ser accedido por una o múltiples portadoras. Estas portadoras pueden ser moduladas por uno o varios canales banda base, los canales incluyen voz, datos o señales de video.

En las técnicas de acceso utilizadas en satélites se consideran dos aspectos: Acceso múltiple hacia un canal del repetidor en particular por medio de multiplexaje, y Acceso múltiple al repetidor del satélite en el sentido de que un mismo ancho de banda puede ser compartido por más de una señal. La diferencia esencial entre ambos conceptos consiste en que el acceso múltiple se realiza siempre en radiofrecuencia en tanto el multiplexaje se realiza en banda base. También el multiplexaje se produce ya sea en una estación terrena o en una red terrestre enlazada a una estación terrena, en tanto que el acceso múltiple ocurre en todos los satélites y es originado por medio de enlaces desde distintas estaciones terrenas.

Acceso a un canal en particular. Un transpondedor amplifica cada portadora cuyo espectro se encuentra dentro de su banda de paso en el momento en que el canal está operando. El recurso que ofrece cada canal se puede representar en un rectángulo en un plano de tiempo-frecuencia. Este rectángulo representa el ancho de banda del canal y su tiempo en operación. Si no se toman precauciones, las portadoras ocupan este rectángulo simultáneamente y se interfieren mutuamente, para evitar esta interferencia, es necesario que las estaciones terrestres receptoras sean capaces de discriminar las portadoras receptoras.

La forma en la que se lleva a cabo la discriminación entre portadoras define las diferentes técnicas de acceso múltiple empleadas en satélites, como se muestra en la figura 3.1. Esta discriminación puede ser de tiempo, frecuencia o código:

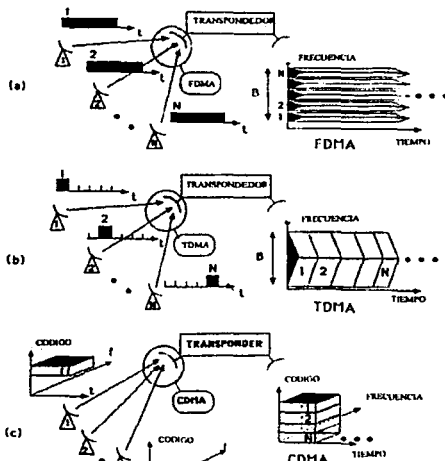


Figura 3.1

En el Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) cada espectro de la portadora ocupa diferente sub-banda, el receptor las discrimina filtrándolas.

El Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA) asigna un valor temporal a la potencia de cada portadora de forma que el receptor puede discriminarlas por tiempos de llegada incluso si ocupan la misma banda de frecuencia, esta discriminación en tiempo provee una mayor capacidad en comparación con FDMA.

El acceso Múltiple por División de Código emplea la asignación de código de una señal, conocida por el receptor y específica para cada portadora, asegura la identificación de cada portadora incluso cuando todas las portadoras ocupan la misma banda de frecuencia simultáneamente y permite emplear un mayor ancho de banda para diversas portadoras logrando un acceso seguro y robusto. Resulta muy común identificar cada señal de acuerdo a códigos pseudo aleatorios.

El uso de tales códigos tiene el efecto de considerables incrementos en el ancho del espectro de la portadora en comparación con los que pudiera tener si solo se modulara la información utilizada. Esto es CDMA también llamada SSMA (*Spread Spectrum Multiple Access*).

Además existen combinaciones de estas técnicas de acceso como se ve en la figura 3.2:

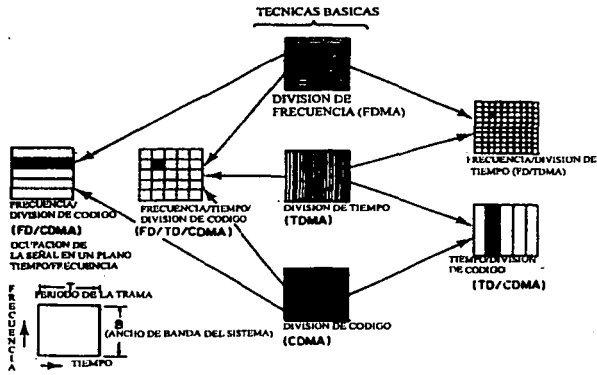


Figura 3.2

Acceso Múltiple al repetidor del satélite.

El acceso múltiple a un canal del repetidor específico combinando las diferentes técnicas de acceso implica un mejor acceso al satélite se mejora como función de la frecuencia, o polarización de la portadora. Lo anterior implica que cada combinación de portadoras no discriminadas tomando en cuenta por lo menos dos técnicas de acceso diferentes, sin embargo cabe considerar que el acceso FDMA es obligatorio en el repetidor y que esto incluye discriminación de la polarización como equivalente a discriminación de frecuencia; entonces este acceso se combina con las técnicas antes descritas FDMA, TDMA o CDMA a cada canal. Las combinaciones correspondientes se pueden considerar como representativas de acceso múltiple a un repetidor del satélite. Sin embargo, la ocupación espectral de una portadora no puede exceder el ancho de banda del canal y esto resulta importante cuando se considera el encabezado de la trama.

3.1 FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia).

Estos sistemas comunican más de dos estaciones a través de un transpondedor usando múltiples portadoras. El ancho de banda asociado con cada portadora puede ser tan pequeño como sea requerido para un canal de voz único. FDMA puede usar transmisión digital o analógica en modo continuo o de bursts.

En FDMA, como se muestra en la figura 3.3. Se pueden emplear ambas transmisiones digitales o analógicas. En el caso de transmisión analógica, los canales individuales se multiplexan en grupos para formar FDM (Múltiplexación por división de frecuencia) ensamblado y luego modulado por una portadora de FM. En el caso de transmisión digital, se utiliza TDM (Multiplexación por División de Tiempo) para combinar canales digitales de banda base individuales, la señal digital compuesta entonces modula una portadora, generalmente utiliza PSK. En ambos casos, se presentan múltiples portadoras en el mismo transpondedor.

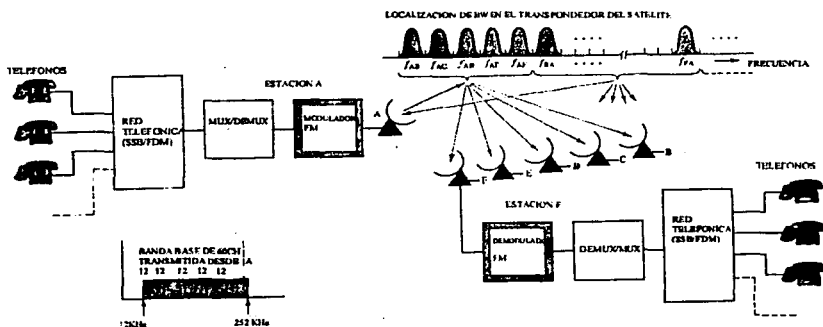


Figura 3.3

El ancho de banda del canal de repetidor se divide en sub bandas; cada sub banda es asignada a la portadora transmitida por una estación terrestre. Con este tipo de acceso, las estaciones terrestres transmiten continuamente y el canal transmite varias portadoras simultáneamente a diferentes frecuencias. Es necesario proporcionar intervalos de guarda entre cada banda ocupada por una portadora evitando que existan interferencias debido a imperfecciones de osciladores y filtros. El enlace de bajada recibido selecciona la portadora requerida de acuerdo con la frecuencia apropiada y posteriormente la señal es pasada a frecuencia intermedia (IF); la IF del amplificador que proporciona el filtrado.

Dependiendo de las técnicas usadas de multiplexación y modulación, se pueden considerar varios esquemas de transmisión. En cada caso, el canal transporta varias portadoras simultáneamente y la característica de transferencia de no-linealidad del canal se considera el mayor problema de intermodulación entre portadoras.

3.1.1 Esquemas de transmisión.

FDM/FM/FDMA. Las señales banda base de la red son analógicas, se combinan para formar una señal de multiplexaje por división de frecuencia. Esta señal analógica multiplexada en frecuencia modula una portadora con accesos que llegan al satélite con una frecuencia en particular, al mismo tiempo que las otras portadoras en otras frecuencias desde las estaciones terrestres. Para minimizar los productos de intermodulación y consecuentemente el número de portadoras, el tráfico enrutado se maneja de acuerdo a una portadora al principio de cada transmisión de las estaciones. La señal multiplexada FDM consiste de todas las frecuencias de señales destinadas para otras estaciones. Como se ilustra en la figura 3.5

TDM/PSK/FDMA. Las señales banda base de la red son digitales. Están combinadas para formar una señal multiplexada de división de tiempo.

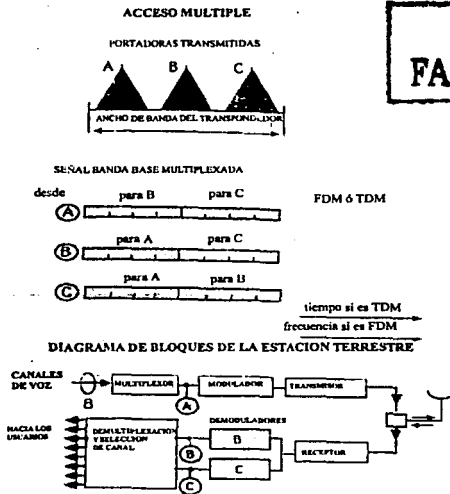


Figura 3.5.

Las portadoras pueden ser filtradas por el receptor en cada estación terrestre, es fácil de realizar cuando el espectro de la portadora es separado de todos los demás por una banda de guarda amplia. Sin embargo, el empleo de bandas de guarda amplias redundan en un uso ineficiente del ancho de banda del canal y por lo tanto, costos elevados de operación, por portadora del segmento de espacio. Se debe hacer entonces un compromiso técnico y económico a fin de obtener bandas de guarda que aseguren no tener interferencia entre portadoras y al mismo tiempo utilizar al máximo el ancho de banda.

De algún modo la opción elegida, toma en cuenta la potencia de la portadora adyacente a una portadora dada que será capturada por el receptor sintonizado a la frecuencia de la portadora considerada, por lo que el ruido de interferencia causado llamado interferencia del canal adyacente (ACI), adicional a la interferencia entre sistemas, puede incluir el término C/N_0 .

3.1.2 Ruido de intermodulación.

Si el número de frecuencias es suficientemente grande, la superposición del espectro de los productos de intermodulación se dirige a un espectro cuya densidad es sensiblemente constante sobre todo el ancho de banda del amplificador y esto justifica el tratamiento de los productos de intermodulación como ruido blanco.

3.1.3 Frecuencia de back off.

Existen dos efectos como consecuencia de utilizar el mismo canal para amplificar varias portadoras:

- La potencia total a la salida del canal es menor a la que existiría en la ausencia de back off.
- La potencia utilizada por portadora se reduce debido a que una parte de la potencia total corresponde a los productos de intermodulación.

3.1.4 Tasa real de datos de FDMA.

Se puede ver en la figura 3.7 que el valor de $(C/N_0)T$ es siempre menor que el valor obtenido en una sola portadora en operación. En este sentido, conforme el valor máximo de $(C/N_0)T$ se hace menor, y debido a que el back off si se incrementa, se tiene el caso en el que el número de portadoras se incrementa.

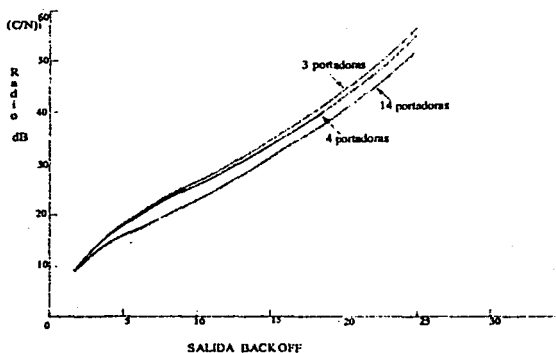


Figura 3.7

Las portadoras se modulan multiplexando señales de igual capacidad. Como el número de portadoras se incrementa el ancho de banda permitido para cada portadora disminuye y esto conduce a una reducción de la capacidad de las señales moduladas multiplexadas. Como el total de la capacidad es el producto de la capacidad de cada portadora por el número de portadoras, se puede suponer que el total de la capacidad pudiera permanecer constante. La razón por la que lo anterior no suceda es que la capacidad total disminuye cuando el número de portadoras se incrementa debido a que cada portadora esta sujeta a una reducción en el valor de $(C/N_0)T$, el back off es mayor cuando el número de portadoras es alto.

FDMA se caracteriza por accesos continuos al satélite en una banda de frecuencia dada. Esta técnica tiene la ventaja de simplicidad y confía en el uso de equipo mejorado, pero también presenta serias desventajas en su empleo, como son:

- Carencia de flexibilidad en caso de reconfiguración; para acomodar las variaciones de capacidad es necesario cambiar el plan de frecuencias y esto implica modificación de frecuencias transmitidas, recibidas y filtros de ancho de banda en las estaciones terrestres.
- Pérdida de capacidad cuando el número de accesos se incrementa debido a la generación de productos de intermodulación por lo que existe la necesidad de operar a una potencia reducida de transmisión del satélite (back off).
- La necesidad de controlar la potencia de transmisión de las estaciones terrestres en las que la forma de la potencia de la portadora a la entrada del satélite sea la misma para evitar el efecto de captura. Este control puede funcionar en tiempo real y se puede adaptar para la atenuación causada por la lluvia en enlaces de subida.

3.2 TDMA (Acceso Múltiple por División de Tiempo).

El primer tipo de acceso es TDMA donde se utiliza todo el ancho de banda del transpondedor, este tipo de esquema es el más común para las redes TDMA y es el más eficiente desde el punto de vista capacidad. El concepto básico de TDMA es que varias estaciones terrestres en la red utilicen una sola portadora de frecuencia digital cuyo ancho de banda ocupe todo el transpondedor. El transpondedor es compartido en tiempo por cada estación que transmite su propio tráfico de información en bursts de la portadora digital a una frecuencia y tasa de datos comunes, quedando los bursts en ranuras de tiempo pre-asignadas para prevenir traslapes. Esto es, una estación recibirá información de una fuente continua, comprimiendo esta en un pequeño intervalo de tiempo, y transmitiéndola dentro de un burst a alta velocidad en el tiempo correcto de forma que los bursts de una estación llegan secuencialmente al satélite. Todos los bursts recibidos de las estaciones son retransmitidos desde el satélite a todas las estaciones. La sincronización se mejora para definir una estación de referencia que tenga información del tiempo y posición de los bursts que sirva como referencia para las otras estaciones en el tiempo.

La figura 3.9 muestra la operación de una red de acuerdo al principio de acceso múltiple por división de tiempo. Las estaciones terrestres transmiten discontinuamente durante un tiempo TB: Esta transmisión es llamada burst. Un burst de transmisión se inserta dentro de una estructura de larga duración de tiempo TF que constituye una cadena de periodo, tal que $TF > TB$, y esto corresponde a la estructura tiempo periódico dentro del cual todas las estaciones terrenas transmiten. Cada portadora representa un burst ocupando todo el ancho de banda del canal. Por lo tanto el canal transporta una portadora a la vez.

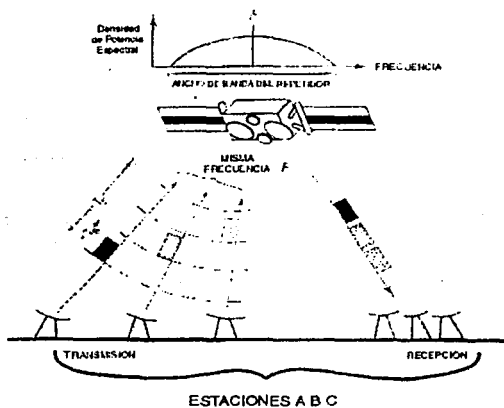


Figura 3.9

El principal problema en el sistema TDMA es la sincronización los bursts, debido al incremento en los usuarios en una red TDMA, dentro de una cadena organizada donde se empaquetan los bursts lo más cercanos posibles dentro de la cadena sin que se traslapen. Hay dos pasos en el proceso de sincronización. El primero es la adquisición de fase, el cuál se refiere al proceso en donde las estaciones terrestres entran a la red. La segunda es la sincronización de la fase, que ocurre después de que el usuario haya entrado en la cadena TDMA y pueda mantener la posición correcta del burst dentro de la cadena durante la operación. El sistema opera dentro de un mismo transpondedor y la misma cobertura de la antena, el problema de la sincronización de la red se simplifica habilitando a cada usuario a recibir los bursts de todos los usuarios en la red. Esto significa que la alimentación se puede establecer a través de un regreso del satélite por cada usuario individual, empleando los bursts recibidos desde cada estación en la red.

Esta información se agrega al burst, y el burst completo se transmite durante el tiempo apropiado dentro de la trama, entre los bursts se provee de un intervalo de tiempo guarda para minimizar la probabilidad de traslape.

En algunos casos TDMA emplea haces múltiples, el ciclo cerrado a través del satélite no existe si los bursts de los otros usuarios no están disponibles para todos los usuarios. Se pueden emplear otros métodos de sincronización, incluyendo el ciclo abierto de sincronización, esto depende de la disponibilidad del cálculo del retraso de tiempo conociendo las coordenadas de las posiciones del satélite y las estaciones terrestres, también las variaciones en el movimiento del satélite en diferentes momentos. Se puede emplear también otro método, conocido como cooperative feedback, en el que la información de la posición del satélite y las variaciones en tiempo real están en comunicación con estaciones que intentan el proceso de adquisición y sincronización a través del control y retraso del canal del burst de referencia. Estos métodos son más complicados porque un usuario de TDMA puede ver solo un pequeño número del total de bursts de la trama.

Es necesaria la sincronización de diferentes estaciones en al red. Su propósito es evitar recuperar bursts de otros en su propia trama que resultaría interferencia, conduciendo a la imposibilidad de que la estación terrestre receptora detecte información bajo condiciones típicas. Antes de considerar la sincronización, es importante establecer el orden de la magnitud de los disturbios asociadas con las imperfecciones de los satélites de órbita estacionaria.

El control de la órbita del satélite se define por una ventana cuyas dimensiones típicas son de 0.1° en longitud y altitud. Por lo tanto la excentricidad de la órbita es a un valor máximo del orden de 0.001.

Relación entre el comienzo de una trama en transmisión y recepción.

Una estación n ($n=1,2,\dots,N$) puede transmitir en forma que este llega al satélite con un retraso d_n con respecto al burst de referencia, el valor del retraso d_n es un valor particular para cada estación. Los valores d_n determinan los arreglos de los bursts en la trama (plan de bursts en el tiempo). El posicionamiento es correcto cuando la estación n transmite con un retraso d_n con respecto al comienzo de la trama siendo transmitida como se define por el tiempo $SOTF_n$ (Start of Transmit Frame). Este tiempo $SOTF_n$ es el instante en el cual la estación puede transmitir en orden para posicionar su burst en la trama la ranura de tiempo ocupada por el burst de referencia. El problema de la sincronización de la estación n es tal que se determina el $SOTF_n$. Una vez que este instante es conocido, es necesario que la estación transmita con un retraso d_n con respecto al $SOTF_n$.

Con un solo satélite transmitiendo, la estación n recibe toda la trama en el enlace de bajada. La detección de la palabra única del burst de referencia determina el comienzo del tiempo de la trama recibida $SORF_n$ (Start of receive frame) La figura 3.13 muestra la relación entre el comienzo de la trama recibida $SORF_n$ y la transmitida $SOTF_n$; $SORF_n$ es igual al tiempo en que comienza la trama (k) al satélite mas el tiempo de propagación del enlace de bajada R_n/c , donde R_n es la distancia del satélite desde la estación terrestre n y c es la velocidad de la luz. El tiempo de comienzo de la trama ($k+m$), donde m es un entero, igual a $SOTF_n$ más el tiempo de propagación del enlace de subida R_n/c . El tiempo que separa el comienzo de la trama k y la trama ($k+m$) al satélite es por definición mTF Por lo tanto la relación es:
 $SOTF_n - SORF_n = D_n = mTF - 2R_n/c$

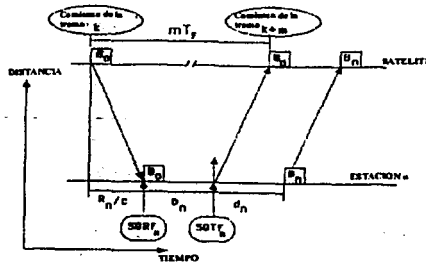


Figura 3.13

Para que esta cantidad sea positiva, es necesario elegir m tal que mTF sea más grande que el valor de $2Rn/c$ para la estación n la cual está más lejos del satélite.

En resumen, la estación n identifica $SORF_n$ por detección de la palabra única del burst de referencia y transmitidos un instante $Dn+dn$ después. Dependiendo del método para determinar el valor de Dn se pueden distinguir dos tipos de sincronización, de ciclo cerrado y de ciclo abierto.

3.2.1 Ciclo de sincronización cerrado.

La figura 3.14 ilustra este método. La estación n observa la posición de su burst en la trama relativa al burst de referencia midiendo el tiempo entre la detección de la palabra única del burst de referencia y la detección de la palabra única de su propio burst. Donde $dn(j)$ es el valor observado en la recepción de la trama para el cual el valor $Dn(j)$ se ha utilizado para determinar el tiempo de transmisión. La diferencia en $(j)-dn$ es el error de posición del burst. La estación entonces incrementa el valor Dn de acuerdo a:

$$Dn(j+1) = Dn(j) - dn(j)$$

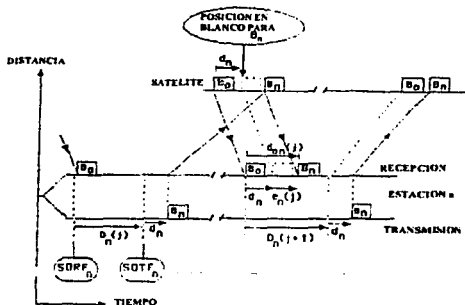


Figura 3.14

Y utilizar el nuevo valor de Dn para determinar el tiempo de transmisión. Nótese que el tiempo mínimo necesario para hacer la corrección es igual al tiempo de propagación de todo el ciclo para la estación más lejos del satélite.

3.2.2 Sincronización de ciclo abierto.

Se utiliza particularmente para redes con asignación sobre demanda donde la posición del burst de tráfico es controlado por la estación de referencia. Este método se confía en el conocimiento de la posición del satélite y el cálculo de la distancia Rn entre el satélite y cada estación terrestre. La posición del satélite puede ser dada por la estación que controla la órbita (segmento de espacio). Si se dividen responsabilidades entre el segmento de espacio y el segmento terrestre se requieren dos estaciones auxiliares que puedan ser provistas para la estación de referencia. Las dos estaciones auxiliares y la estación de referencia miden el tiempo de propagación de sus bursts. Las dos estaciones auxiliares comunican sus valores a la estación de referencia que determina la posición

del satélite por triangulación y calcula la distancia del satélite a cada estación de la red. La estación de referencia envía el valor de D_n calculado, por medio del burst de referencia. Es necesario notar que el tiempo antes de la corrección es igual al tiempo requerido para medir el tiempo de propagación (un ciclo completo) más el tiempo requerido para la transmisión de esta información por las dos estaciones auxiliares a la estación de referencia (un ciclo completo) más el cálculo de tiempo y finalmente el tiempo para radiar los valores de D_n . Este tiempo puede aumentar varios segundos y consecuentemente implica tiempos de guarda más largos que en el caso de sincronización de ciclo cerrado.

3.2.3 Adquisición de la sincronización.

La adquisición de la sincronización por una estación se ajusta cada vez que la estación desea entrar a la red. La operación puede ser de ciclo cerrado o abierto. En ciclo cerrado la estación transmite un burst de baja potencia, generalmente modulado por una secuencia pseudo aleatoria, observa su posición, corrige para dar su posición nominal, y entonces opera con toda la potencia para transmitir la información. La modulación con una secuencia pseudo aleatoria facilita de propiedades de autocorrelación de la secuencia, la cual permite obtener la medida del error de posición, y la dispersión de la energía cuyos límites de interferencia debido a la estación con transmisión de otras estaciones que están transportando tráfico. En un ciclo abierto, toda la estación recibe el valor de D_n de la estación de referencia y lo transmite al instante $D_n + d_n$ después de recibir el burst de referencia.

3.2.4 Asignación por Demanda.

La asignación de recursos por demanda en un sistema TDMA se acumulan para una reasignación de capacidad a través de reorganización o sub bursts dentro de la cadena TDMA. Esto es, durante periodos pico de tráfico, la capacidad total del sistema TDMA puede ser dividida tal que los bursts de las estaciones de alto tráfico sean expandidos, mientras los de las estaciones de menos tráfico son asignados a bursts más cortos.

3.2.5 Haz conmutado y TDMA de haces de satélite conmutados.

Las comunicaciones de satélites actuales están diseñadas con varias antenas con diferentes patrones de radiación que dan servicio a las diversas regiones sobre la superficie de la tierra. Cada haz está asociado a transpondedores receptores y transmisores, y las interconexiones entre transmisores y receptores son conmutables. Estos satélites son ajustados con una red de conmutadores de RF que se pueden controlar desde tierra para establecer el canal requerido para la interconexión. Hay una reconfiguración rápida del sistema de conmutación para maximizar el flujo de tráfico. En tales sistemas esto es generalmente posible para una estación con un haz determinado para comunicarse con otras estaciones en el total de las transmisiones. Puede utilizarse FDMA o TDMA, la utilización de TDMA tiene una ventaja en particular ya que permite el uso de un satélite conmutado para que conecte selectivamente haces de subida con haces individuales de bajada. Las estaciones transmisoras pueden enviar bursts a otra estación operando a través del satélite solamente identificando mediante banderas el burst y la dirección hacia destino. La matriz de conmutación en el satélite se utiliza para ordenar los bursts y dirigirlos a la terminal terrestre adecuada, expandiendo las dimensiones potenciales de la red.

3.2.6 Tasa real de datos de TDMA.

El throughput de una transmisión TDMA puede ser medido por la relación de la capacidad del canal de una sola portadora en operación (acceso simple) y la capacidad del mismo canal para el caso de acceso múltiple. Se asume que se ocupa todo el ancho de banda en ambos casos.

En TDMA, la tasa real de datos permanece alta para un gran número de accesos y no hay necesidad de control de la potencia transmitida en las estaciones. Todas las estaciones transmiten y reciben en la misma frecuencia, el origen o destino del burst. Esto simplifica la sintonización. Pero cabe considerar también que siempre va a existir para TDMA necesidad de sincronización así como necesidad de dimensionar la estación para la transmisión de throughput altos.

Para TDMA el hecho de que el ancho de banda asociado con la portadora es generalmente el ancho de banda de todo del transpondedor maximiza la tasa de transmisión de bits en el mismo. La tasa de errores de la portadora se comparte en el tiempo entre un número de estaciones terrestres tal como la suma de la información de tráfico de tasa de bits, entre estaciones terrestres individuales, por lo que se puede exceder la tasa de transmisión de la portadora. Cada estación terrestre puede transmitir esta información de bursts de datos de acuerdo a la tasa de la portadora en las ranuras de tiempo preasignadas. Aunque la primera ventaja de TDMA es realizar un arreglo de una sola portadora por transpondedor, hay casos donde el ancho de banda de TDMA puede ser una fracción del ancho de banda del transpondedor.

3.3 CDMA (Acceso Múltiple por División de Código).

Como lo indica la palabra, disperso se refiere a las técnicas de modulación que convierten la banda base en una señal modulada con un espectro en el ancho de banda que cubre o dispersa sobre una banda de magnitud más grande de lo necesario para transmitir la señal banda base por sí misma. Esto se puede utilizar para sistemas de acceso múltiple dando a cada usuario un código único pseudoaleatorio, en lugar de una sola portadora de frecuencia o ranura en tiempo, como en TDMA o FDMA. Esto por lo tanto se refiere como acceso múltiple por división de código, o CDMA. Todos los usuarios contribuyen con un fondo de ruido, con sus señales de banda amplia que tienen AWGN. Para detectar la señal deseada en presencia de todas las interferencias, la composición de la señal es cross-correlacionada con la secuencia pseudo aleatoria dispersa. El funcionamiento de la red se mejora básicamente por la razón del ancho de banda de la señal dispersa al ancho de banda de la señal no dispersada.

También utiliza una portadora modulada digitalmente. Cada estación terrestre transmite simultáneamente de acuerdo con una tasa alta de datos, con cada mensaje origen codificado de forma que únicamente el destino con el decodificador adecuado pueda recuperar el mensaje. La tasa de datos de la portadora es muchas veces la proporción del origen individual, y generalmente ocupa todo el ancho de banda del transpondedor.

Con CDMA, las estaciones de la red transmiten continuamente y junto con la misma banda de frecuencia del canal. Hay, por lo tanto, interferencia entre las transmisiones de diferentes estaciones y su interferencia se resuelve por el receptor que identifica la señal de cada transmisor; la señal se representa en la forma de una secuencia binaria, llamada código, el cual es combinado con la información utilizada a cada transmisor. El conjunto de códigos usado puede tener las siguientes propiedades de correlación.

- Cada código puede ser distinguido fácilmente para una réplica de sí mismo combinada en tiempo.

- Cada código puede distinguirse fácilmente en cualquier caso de otros códigos utilizados en la red.

La transmisión del código combinado con la información utilizada requiere la disponibilidad de un ancho de banda de frecuencia más grande del que se requiere para transmitir sólo la información. Esta es la razón por la que se refiere la transmisión como espectro disperso.

Se utilizan dos técnicas en CDMA:

- La técnica descrita como secuencia directa (DS)
- La técnica descrita como frequency hooping. (FH)

La señal compuesta modula una portadora por BPSK cuya frecuencia es la misma para todas las estaciones de la red. Para la señal receptora es demodulada coherentemente por multiplicación de la señal recibida por una replica de la portadora sin importar el ruido termal.

El detector del filtro paso bajas elimina las componentes de alta frecuencia y retiene solo la componente de baja frecuencia. Esta componente se multiplica entonces por el código local en fase con el código recibido. La señal es integrada entonces en el periodo de un bit para filtrar el ruido: El mensaje transmitido se recupera a la salida del integrador. Por propósitos de comparación, este espectro es semicompuesto de tal forma que la portadora puede ser modulada solo por el mensaje. Se puede ver que en la transmisión CDMA tiene un espectro que es radiado en forma dispersa por el canal de radiofrecuencia. Este es el resultado de combinar el mensaje con una secuencia. Ahora veremos como esto permite el acceso múltiple.

La estación terrestre recibe del canal la señal utilizada semicompuesta de señales que otros usuarios transmiten en la misma frecuencia.

El mensaje es ahora semicompuesto con ruido debido a la interferencia. Si se han tomado las precauciones para elegir códigos con una baja función de correlación este ruido será bajo. La multiplicación en la recepción implica dispersión del espectro de cada mensaje que será disperso. La densidad espectral del ruido es consecuentemente baja: El ruido de interferencia de potencia en el ancho de banda del mensaje usado es también bajo, la secuencia con que se combina el mensaje también se puede obtener multiplicando la portadora de la secuencia bit después de que la portadora ha sido modulada por el mensaje binario. En la misma forma, las operaciones de demodulación y no dispersión pueden ser revertidas por el receptor. La transmisión del espectro disperso es utilizado para realizar la función de acceso múltiple, esto es preferible en recepción para proceder primero con la dispersión y luego con la demodulación.

En otro caso, la demodulación coherente necesita recuperar la portadora de referencia en un espectro que contienen las otras portadoras de referencia con altos niveles de potencia. Produciendo primero la no dispersión del espectro de las portadoras no deseadas y dispersas, recobran la portadora de referencia requerida formada bajo condiciones favorables de señal a ruido. En transmisión, la simplicidad tecnológica tiende a dar preferencia a la dispersión antes de la modulación.

La señal transmitida por el sistema compartiendo la misma banda de frecuencia como la utilizada por la red puede ser una banda estrecha de portadoras. El ruido de interferencia se dispersa en el receptor. La potencia de interferencia del ancho de banda del mensaje utilizado es baja.

3.3.1 Protección contra trayectorias múltiples.

Un enlace tiene múltiples trayectorias cuando el radio de la señal sigue múltiples trayectorias de diferentes longitudes y llegadas al receptor en forma de señales utilizadas acompañadas por réplicas retrasadas en el tiempo. Estos crecimientos, por ejemplo, en enlaces móviles del satélite donde la onda del enlace de bajada es capturado al mismo tiempo que sus reflexiones de objetos alrededor. Las señales reflejadas aparecen como interferencia que puede ser constructiva (sumándose), o negativa (restandose). Si el tiempo de retraso entre la onda directa y la reflejada es más grande que la duración de la secuencia con que se combina el mensaje, no hay correlación entre el código de recepción, el código local de las ondas reflejadas y el espectro de las ondas reflejadas es disperso. De esta forma hay beneficios de protección de interferencia de múltiples trayectorias.

3.3.2 Realización de accesos múltiples.

Las múltiples trayectorias de la red siguen diferentes trayectorias. En el receptor, solo la trayectoria cuya portadora coincide con aquella cuya portadora regenerada por el sintetizador local es demodulada, a la salida del filtro paso bajas se encuentra acompañado por ruido causado por la posible frecuencia de portadoras. La probabilidad de tal evento es pequeño cuando el número de bandas de frecuencia en el grid es alto y por lo tanto la dispersión del espectro factor B/b es largo. La densidad espectral de la interferencia de término largo ruido espectral puede ser pequeño.

3.3.3 Protección contra interferencia.

En una forma similar para el caso de secuencia directa, la interferencia causada por una portadora de frecuencia fija está sujeta a la dispersión del espectro en el receptor el cual limita la potencia del ruido en el ancho de banda del mensaje útil.

3.3.4 Sincronización.

La sincronización del receptor pseudo aleatorio generador de secuencia y la secuencia pseudo aleatoria la cual dispersa el espectro de la portadora receptora es una condición fundamental para la realización del acceso múltiple. Esta condición habilita al receptor a detectar el mensaje utilizado $m(t)$. La sincronización consiste de dos fases: Adquisición de secuencia y Rastreo.

3.3.5 Tasa real de datos CDMA.

El throughput de CDMA puede ser considerado como la relación entre la capacidad total provista por un canal en el caso de un solo acceso, esto es una portadora única modulada dentro de un espectro disperso, y aquel de un canal transmitiendo varias portadoras moduladas en CDMA simultáneamente. La capacidad total del canal es entonces el producto de la capacidad de una portadora y el número de portadoras, que es el número de accesos. La capacidad de una portadora es R_b .

3.3.6 Máximo número de accesos.

CDMA opera con el principio de espectro disperso de transmisión. El receptor recupera la información utilizada para reducir el espectro de la portadora transmitida en su ancho de banda original. Esta operación simultáneamente dispersa el espectro de otros usuarios de forma que aparezca como ruido de baja densidad de espectro.

Tiene las siguientes ventajas:

- Es simple de operar ya que no requiere ninguna transmisión de sincronización entre las estaciones. La única sincronización necesaria es la del receptor con la secuencia de la portadora recibida.
- Ofrece propiedades útiles de protección contra interferencia de otros sistemas e interferencia debido a trayectorias múltiples. Esto lo hace atractivo para redes de estaciones terrenas pequeñas con antenas de haz de radiación amplio y para comunicaciones satelitales con móviles.

La principal desventaja es el bajo throughput; un largo ancho de banda de segmento espacial es utilizado para una red total de baja capacidad con respecto a la capacidad de una sola portadora no dispersa.

3.4 Comparación entre las diferentes técnicas de acceso.

Con TDMA se puede hacer un uso total del satélite ya que la potencia del ruido de intermodulación es mínima, no se requiere control de la potencia en el enlace de subida. La transmisión es fácil de implementar y modificar, la capacidad de manejo es simple y flexible, el formato digital de TDMA permite la utilización de todas las ventajas digitales, solo que requiere sincronización en el tiempo y esto lo hace complejo, al mismo tiempo los sistemas analógicos tienen que ser convertidos a digitales y la interface terrestre analógica tiene un costo alto. Sólo se emplea una portadora de frecuencia y el ancho de banda el cual es equivalente a todo el ancho de banda del transpondedor. Un ancho de banda único es compartido entre varios usuarios. Este tiempo compartido se mejora modulando digitalmente la portadora con QPSK a una tasa dada y compartiendo sólo ésta, recurriendo a las ranuras de tiempo de las estaciones terrestres de acuerdo a sus requerimientos de tráfico en un caso de acceso por demanda variable dinámicamente en la asignación de recursos (ranuras de tiempo). El satélite y las estaciones terrestres funcionan de esta forma como un multiplexor digital en el satélite, donde cada origen que compone la trama proviene de cada estación terrestre que integra la red. Utilizando una sola portadora en todo el ancho de banda del transpondedor, la interferencia mutua entre los transpondedores no lineales esencialmente no existe. Por lo tanto un transpondedor que funciona completamente con TDMA puede tener grandes ventajas sobre FDMA. De algún modo un pequeño porcentaje de la capacidad siempre se necesita para mantener funciones de supervisión, del multiplexor digital y transporte. Ya que todo el ancho de banda es ocupado, no hay pérdidas en la utilización del espectro causada por requerimientos de bandas de guarda, aunque se incrementa la no-linealidad por el hecho de operar a la máxima potencia como un efecto sobre la interferencia ínter símbolo. Otra forma de dar mayor flexibilidad con redes TDMA es construir aplicaciones del sistema con redes TDMA dentro de un sistema FDMA operando en el mismo ancho de banda del transpondedor, aunque la eficiencia del ancho de banda estrecho comparado con una sola portadora es eliminada en este caso, los requerimientos del ancho de banda estrecho puede a veces favorecer la implantación.

CDMA Tiene alta resistencia contra la interferencia, por lo tanto el espaciamiento entre satélites es menor y al mismo tiempo se conserva una calidad aceptable de la señal recibida, es resistente, como

sistema de espectro disperso a las multitrayectorias que suelen ser un caso común en terminales móviles, se pueden utilizar antenas de menor tamaño sin que existan problemas de interferencia con satélites adyacentes, ofrece una forma segura de comunicación.

3.4.1 Características de las técnicas de acceso.

Característica	FDMA	FDMA		
	SCPC	MCPC	TDMA	CDMA
Transmisión	Análogica o digital	Análogica o digital	Digital	Digital
Multiplexación	Ninguna	FDM o TDM	TDM	TDM
Modulación	FM o PSK (continua o voz activa)	FM o PSK	Alta Velocidad PSK (modo del burst)	Secuencia que se combina con el mensaje. Codificado (AM o PSK)
Portadora	0.7xporción de bits	Depende del plan de frecuencias	Todo el transpondedor (típico o de banda angosta)	Todo el transpondedor
Ancho de banda				
Capacidad (por MHz del ancho de banda del transpondedor)	22 canales / MHz (únicamente voz)	16 a 25 / MHz canales (típico)	28 canales / MHz	
Aplicaciones primarias	Muchas estaciones de bajo tráfico	Muchos enlaces punto a punto	Número intermedio de estaciones, tráfico moderado	Aplicaciones de interferencia sensitiva

CAPITULO IV: ECUACIONES DE ENLACE

Los enlaces son diseñados para enviar mensajes con fidelidad aceptable, existe un compromiso en cuanto a cantidad y calidad de los mensajes enviados, estos parámetros, limitados por el costo y la tecnología.

Los cálculos de enlaces en satélites están definidos por dos cantidades en particular: la potencia recibida y la potencia transmitida. En estas cantidades se involucran una serie de ganancias y pérdidas de cada dispositivo involucrado en el enlace, como son antenas, amplificadores, feeders, las pérdidas de la señal en la trayectoria que sigue para completar el enlace, las pérdidas de apuntamiento. De forma que se obtiene una señal recibida con una calidad determinada y una potencia requerida para tener una buena señal en el receptor.

4.1.1 Potencia Isotrópica Radiada Efectivamente (EIRP)

El concepto de Potencia isotrópica radiada efectivamente es uno de los parámetros que se consideran en el cálculo del enlace. La densidad de flujo de potencia a una distancia r de una antena transmisora de ganancia G , se define como:

$$\Psi_M = \frac{GP_s}{4\pi r^2} \dots (4.1)$$

Un dispositivo que radia isotrópicamente con una potencia de entrada definida por GP_s puede producir la misma densidad de flujo. De esta forma es equivalente a la potencia isotrópica radiada.

$$EIRP = GP_s \dots (4.2)$$

ó

$$EIRP = [P_t] + [G] \text{ dBW} \dots (4.3)$$

Para una antena parabólica esta expresión cambia, está en función del diámetro de la antena, la frecuencia y la eficiencia de la antena.

En las ecuaciones de enlaces se consideran las pérdidas que se sufren a lo largo de la trayectoria del enlace, algunas con constantes y otras, como la lluvia, dependen del clima y se determinan por medio de tablas estadísticas.

Las pérdidas de transmisión en el espacio libre están definidas por:

$$\Psi_M = \frac{EIRP}{4\pi r^2} \dots (4.4)$$

La potencia enviada para acoplarse con el receptor es la densidad de flujo de potencia multiplicada por la apertura de la antena receptora. La potencia entonces esta determinada por:

$$P_R = \Psi_M A_{eff} = \frac{EIRP}{4\pi r^2} \frac{\lambda^2 G_R}{4\pi} = (EIRP) G_R \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \dots (4.5)$$

donde:

r es la distancia entre las antenas transmisora y receptora.

G_R es la ganancia de la potencia isotrópica de la antena receptora.

Esta ecuación contiene términos asociados con el transmisor, el receptor y el espacio libre, respectivamente, esta ecuación puede ser escrita como:

$$[P_R] = [EIRP] + [G_R] - 10 \text{Log} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \text{ dBW} \quad \dots(4.6)$$

Esta ecuación representa La potencia recibida en dBW, dada por las pérdidas en el espacio libre, la ganancia de la antena y el valor de EIRP.

La componente de pérdidas en el espacio libre esta dada por:

$$[FSL] = 10 \text{Log} \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2 \quad \dots (4.7)$$

Esta ecuación muestra que las pérdidas en el espacio libre son inversamente proporcionales al cuadrado de la longitud de onda.

Dado que normalmente se tiene como dato la frecuencia, el término en longitud de onda esta dado

por: $\lambda = \frac{c}{f} \quad \dots(4.8)$ donde c es la velocidad de la luz en el vacío cuyo valor es 3×10^8 m/s.

La ecuación (4.7) también puede ser escrita como:

$$[FSL] = 32.4 + 20 \text{Log} r + 20 \text{Log} f \quad \dots(4.8)$$

y la ecuación (4.6) puede escribirse como:

$$[P_R] = [EIRP] + [G_R] - [FSL] \quad \dots(4.9)$$

Esta ecuación muestra que la potencia recibida se incrementa aumentando la ganancia de la antena, la ganancia de la antena es inversamente proporcional al cuadrado de la longitud de onda, por lo tanto también se puede incrementar la potencia recibida aumentando la frecuencia de operación, ya que de esta forma disminuye la longitud de onda. Y consecuentemente para un valor dado de EIRP la potencia recibida es independiente de la frecuencia de operación.

Si la potencia transmitida permanece constante, esta se incrementa aumentando la frecuencia para antenas definidas en el transmisor y receptor.

4.1.2 Pérdidas de Feeders.

Estas Pérdidas tienen lugar entre la antena y el equipo receptor del mismo modo que sucede en transmisión entre la antena y el amplificador de alta potencia, estas ocurren en guías de onda, filtros y acopladores, estas pérdidas denotadas por RFL se suman a la ecuación (4.9).

4.1.3 Pérdidas por apuntamiento de la antena.

La máxima ganancia ocurre cuando las dos antenas, de la estación terrestre y el satélite están alineadas, este es un caso ideal, pero ocurre que en ocasiones las antenas no apuntan sus haces principales en dirección del haz principal de la otra antena, entonces hay un desalineamiento con un ángulo dado. A éstas pérdidas se les llama de apuntamiento, existen valores típicos de tablas y no son muy significativas estas pérdidas.

Además de las pérdidas de apuntamiento, se debe considerar deslineamiento de la polarización, las pérdidas generadas se consideran dentro de las pérdidas por apuntamiento y se denotan con AML.

4.1.4 Pérdidas Ionosféricas y atmosféricas.

Estas pérdidas son resultado de la absorción e introducen una depolarización, se incluyen directamente en las pérdidas de espacio libre.

4.1.5 Pérdidas por efecto de la lluvia.

Los efectos de la lluvia causan sobre las ondas de radio centelleo y absorción, estas pérdidas se incrementan al aumentar la frecuencia y afecta más a la banda Ku y C. Los valores de estas pérdidas se dan en forma de curvas o tablas. Algunas veces la lluvia también causa efectos en la polarización de las ondas de radio, por ejemplo una polarización circular puede volverse elíptica.

4.2 Ecuación de Enlace.

Considerando todas las pérdidas y considerando cielo despejado, la potencia en el receptor está definida por las pérdidas, EIRP y la ganancia de la antena receptora.

Las pérdidas consisten de:

$$[PERDIDAS] = [FSL] + [RFL] + [AML] + [AA] + [PL] \dots(4.10)$$

donde:

FSL, son las pérdidas de dispersión en el espacio libre

RFL, son las pérdidas en el feeder.

AML, son las pérdidas de apuntamiento de la antena.

AA, son las pérdidas por absorción atmosférica.

PL, son las pérdidas por acoplamiento de polarización.

$$Y [P_R] = [EIRP] + [G_R] - [PERDIDAS] \dots(4.11)$$

Volviendo a la ecuación 4.4, para el cálculo de densidad de flujo de saturación e integrarlo en el cálculo del enlace:

$$\Psi_M = \frac{EIRP}{4\pi r^2} = [EIRP] + 10 \text{Log} \frac{1}{4\pi r^2} \dots(4.12)$$

de la ecuación de pérdidas en el espacio libre:

$$-[FSL] = 10 \text{Log} \frac{\lambda^2}{4\pi} + 10 \text{Log} \frac{1}{4\pi r^2} \dots(4.13)$$

sustituyendo en la ecuación (4.12):

$$\psi_M = [EIRP] - [FSL] - 10 \log \frac{\lambda^2}{4\pi} \dots (4.14)$$

El término $\frac{\lambda^2}{4\pi}$ tiene dimensiones de área, el área efectiva de una antena isotrópica esta denotada por:

$$[A_0] = 10 \log \frac{\lambda^2}{4\pi} = -(21.45 + 20 \log f) \dots (4.15)$$

sustituyendo se obtiene:

$$[EIRP] = \psi_M + [A_0] + [FSL] \quad (4.16)$$

esta ecuación solo incluye las pérdidas de espacio libre, pero si se consideran las pérdidas atmosféricas, de apuntamiento de polarización, la ecuación ahora tiene la siguiente estructura:

$$[EIRP] = \psi_M + [A_0] + [FSL] + [AA] + [PL] + [AML] \quad (4.17)$$

En términos de pérdidas totales:

$$[EIRP] = \psi_M + [A_0] + [PERDIDAS] - [RFL] \quad (4.18)$$

4.2.1 Enlace de subida.

Esta ecuación es para condiciones de cielo claro y se obtiene el valor mínimo de EIRP que debe ser dado por la estación terrestre para obtener una densidad de flujo hacia el satélite.

De esta forma, la ecuación que determina el enlace de subida esta dado por:

$$[EIRP]_U = \psi_M + [A_0] + [PERDIDAS]_U - [RFL] \quad (4.19)$$

Donde se presentan un número determinado de portadoras en un TWTA simultáneamente, el punto de operación debe estar situado en una porción lineal de la función característica de transferencia para reducir los efectos de distorsión de intermodulación, tal como ocurre con FDMA con múltiples portadoras, el término back off se debe introducir en los cálculos.

Suponiendo que la densidad del flujo de saturación para una sola portadora en operación es conocido, el back off de entrada será especifico para múltiples portadoras en operación, referidos al nivel de una sola portadora en operación, el EIRP de una estación terrestre será disminuido por el back off de entrada, de forma que el valor en el enlace de subida queda:

$$[EIRP]_U = [EIRP_s]_U - [BO] \quad (4.20) \quad \text{S es el término para denotar densidad de flujo de saturación}$$

El back off de entrada, generalmente se mejora disminuyendo el EIRP de la estación terrestre actualmente accésando el transpondedor.

Incluyendo el término relación portadora a ruido, se obtiene:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_U = [\psi_s] + [A_0] - [BO] + \left[\frac{G}{T} \right] - [k] - [RFL] \quad (4.21)$$

Los márgenes de atenuación no han sido incluidos, sin embargo los más importantes son los causados por la lluvia.

El amplificador de alta potencia en la estación terrestre es el encargado de proveer la potencia radiada, más las pérdidas del feeder en transmisión TFL, estas pérdidas incluyen guías de onda, filtros, y pérdidas de acopladores entre el amplificador de alta potencia y la antena transmisora. La potencia de salida del transmisor de alta potencia está dada por:

$$[P_{HPA}] = [EIRP]_U - [G_T] + [TFL] \quad (4.22)$$

Cabe mencionar que el valor de EIRP que se emplea, es el que contiene el término de BO_i que se requiere en el satélite.

La estación terrestre por sí sola quizá tenga que transmitir múltiples portadoras, y su salida requiera back off $[BO]_{HPA}$. El amplificador de alta potencia de la estación terrestre debe evaluar la potencia de saturación de salida dada por:

$$[P_{HPA, sat}] = [P_{HPA}] + [BO]_{HPA} \quad (4.23)$$

Los cálculos anteriores se hicieron en base a condiciones de cielo claro, las mayores distorsiones de la señal ocurren en banda C y banda Ku, siendo la lluvia la más significativa, como resultado hay atenuación de la señal y un incremento en la temperatura de ruido que degradan la relación

$\left[\frac{C}{N_0} \right]$ en ambas trayectorias. El incremento de ruido, de alguna forma no es un factor importante en el enlace de subida. Esto es debido a que la antena del satélite apunta hacia la tierra que tiene mayor temperatura y esta se suma al receptor de temperatura de ruido del satélite oculta todo ruido adicional inducido debido a la atenuación por lluvia. Lo importante es que la potencia de la portadora en el enlace de subida se mantenga muy cercana a determinados límites para ciertos modos de operación, y alguna forma del control de la potencia en el enlace de subida compense las atenuaciones ocasionadas por la lluvia. La potencia de salida desde el satélite puede ser monitoreada en una estación central de control, o en algunos casos por cada estación terrestre y la potencia de salida en alguna estación terrestre determinada se incrementa si se requiere una compensación por atenuaciones. De esta forma el amplificador de alta potencia tiene que tener un margen de reserva de potencia para compensar estas atenuaciones.

4.2.2 Enlace de bajada.

Esta parte del enlace es cuando la señal viaja desde el satélite hasta la estación terrestre donde es recibida. Para identificar la ecuación del enlace se tiene:

$$\left[\frac{C}{N_0} \right]_D = [EIRP]_D + \left[\frac{G}{T} \right]_D - [PERDIDAS]_D - [k] \quad (4.24)$$

En esta ecuación se considera el EIRP del satélite, las pérdidas de feeder de la estación terrestre, y el receptor G/T en la estación terrestre. Las pérdidas de espacio libre y otras pérdidas son calculadas en base a la frecuencia del enlace de bajada. La relación resultante densidad de portadora a ruido de la ecuación anterior es la que aparece en el detector del receptor en la estación terrestre. Donde la relación portadora a ruido es mejor que la relación de densidad portadora a ruido, esto sucede si se asume que el ancho de banda de la señal es igual al ancho de banda de ruido B_N .

$$\left[\frac{C}{N}\right]_D = [EIRP]_D + \left[\frac{G}{T}\right]_D - [PERDIDAS]_D - [k] - [B] \quad (4.25)$$

4.2.3 Back off de salida.

Si se utiliza un back off a la entrada, también se debe permitir un back off de salida en el EIRP del satélite, este no es lineal con el back off de entrada. Se utiliza una regla y se toma el back off 5dB bajo al porción extrapolada de la curva, ya que la porción lineal da una relación 1:1 cambio en dB, la relación entre el back off de entrada y salida es:

$$[BO]_D = [BO] - 5dB \quad (4.26)$$

Si el EIRP del satélite para condiciones de saturación esta dado por: $[EIRP_S]_D$, entonces.

$$[EIRP]_D = [EIRP_S]_D - [BO]_D \quad (4.27)$$

Entonces:

$$\left[\frac{C}{N}\right]_D = [EIRP_S]_D - [BO]_D + \left[\frac{G}{T}\right]_D - [PERDIDAS]_D - [k] \quad (4.28)$$

Para el enlace de subida, la saturación de densidad de flujo en el receptor del satélite es una cantidad específica, para el enlace de bajada, no es necesario conocer la saturación de densidad de flujo en el receptor de la estación terrestre ya que es un punto terminal y la señal generalmente no satura al amplificador de potencia.

La potencia del amplificador TWT esta definida por:

$$[P_{TWT}]_D = [EIRP]_D - [G_T]_D + [TFL]_D \quad (4.29)$$

y la potencia de saturación de salida esta dada por:

$$[P_{TWT}]_S = [P_{TWT}]_D + [BO]_D \quad (4.30)$$

4.2.4 Margen de desvanecimiento por la lluvia en el enlace de bajada.

La lluvia introduce en la señal atenuación por absorción y centelleo, la atenuación por absorción introduce ruido. Si A representa la atenuación por lluvia causada por absorción. La

correspondiente relación de potencia esta representada por $A = 10^{\frac{|A|}{10}}$, de aquí obtenemos la temperatura de ruido efectiva de la lluvia:

$$T_{LLUVIA} = T_a \left(1 - \frac{1}{A} \right) \quad (4.31)$$

Donde T_a es el absorbente aparente de temperatura, este parámetro esta en función de muchos factores incluyendo la temperatura física de la lluvia y el efecto de centelleo en la celda de lluvia y el ruido termal que incide en ella. Su valor esta entre los 270 y 290 K. La temperatura de ruido en el cielo esta dada por la temperatura del cielo en condiciones claras mas la temperatura de lluvia.

$$T_{SKY} = T_{CS} + T_{LLUVIA} \quad (4.32)$$

Por lo tanto se observa que la lluvia degrada la señal en dos formas, atenuando la onda de la portadora e incrementando la temperatura de ruido del cielo.

Se tienen que tomar una serie de especificaciones para asegurar que el sistema funcione con la calidad deseada, como son:

Los servicios que se ofrecen, tasas medias o altas, servicios de banda ancha, servicios en tiempo real, no real, y la mezcla de ambos.

EIRP en los usuarios terminales, estándares de seguridad, tamaños y tipos de antenas, costo.

Área de servicio, global o regional.

Tráfico, dispersión geográfica, tráfico total en la red, calidad de la señal recibida, BER o disponibilidad de enlaces, grado de servicio.

Geometría de la constelación, inclinación, excentricidad, altitud.

En el espacio, los tamaños de antenas y complejidad de las mismas, potencia de DC, transparente o regenerativo, tiempo de vida.

El espectro, banda, disponibilidad en el espectro, modulación, codificación y códigos de acceso.

Tipo de red, enlaces intersatelitales, enrutamiento, interface con sistemas terrestres.

Existen algunos valores determinados para las hand held y para las terminales portátiles.

	Hand-Held	Portátil
Tasa de datos (kbps)	4.8	4.8
Ganancia de la antena (dBi)	0	7
Potencia de RF (Watt)	.5	2
EIRP (dBW)	-3	10
Potencia de DC (Watt)	2	8
G/T (dB/K)	-25	-18
Frecuencia (GHz)	1.5/1.6	1.5/1.6

**ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA**

Para la calidad de servicio se tienen los siguientes valores:

- C/N₀ mayor o igual a 42 dB-Hz
- Margen de enlace de aproximadamente 3dB
- Grado de servicio mayor o igual al 10%

Los satélites que más se utilizan tienen la tecnología más avanzada, y el transpondedor es transparente al sistema para minimizar riesgos, de forma que no hay enlaces intersatelitales.

4.3 Cálculos de Enlace.

En los siguientes cálculos de enlace, se consideran valores determinados de algunos sistemas y en base a estos se obtienen análisis de enlace considerando algunos casos.

Cuando no se utilizan enlaces intersatelitales y se pueden eliminar los handovers, ya que los satélites permanecen en línea de vista el tiempo suficiente y no hay una degradación considerable del enlace.

A continuación se muestra un ejemplo de un sistema operando y los valores con los que el enlace se lleva a cabo.

	<i>Parámetros de enlace</i>				
	<i>Satélite-terminal de usuario</i>		<i>Satélite-gateway</i>		<i>Satélite-satélite</i>
	<i>Subida</i>	<i>bajada</i>	<i>subida</i>	<i>bajada</i>	
<i>Multiplexación</i>	TDMA/FDMA		TDM/FDMA		TDMA/FDMA
<i>Modulación</i>	QPSK		QPSK		QPSK
<i>Filtro banda base</i>	Coseno elevado 40%		Filtrado		Filtrado
<i>Tasa (FEC)</i>	Tasas múltiples		1/2	1/2	½
<i>Tasa de datos codificada Mb/s</i>	0.05	0.05	6.25	6.25	25.0
<i>Ancho de banda ocupado por canal</i>	31.5	31.5	4375.0	4375.0	17500.0
<i>Frecuencia central GHz</i>	1.62125	1.62125	20.0	29.4	23.28
<i>Ancho de banda total MHz</i>	10.5	10.5	100.0	100.0	200.0
<i>Espaciamiento entre portadoras MHz</i>	0.04167	0.04167	7.5	7.5	25.0

[5]

Cálculo de la relación C/N_0 en el enlace de subida y en el enlace de bajada en un enlace Satélite-Usuario:

Frecuencia de operación=1616MHz. *En el enlace de subida.*

Distancia al satélite=2215Km.

Pérdidas de apuntamiento=0.5dB

Pérdidas de por efecto de la lluvia=0.5dB

Pérdidas atmosféricas = 0.2dB

Pérdidas Ionosféricas=0.5dB

Ganancia de la antena del satélite=23.9dBi

G/T=-3.1dBi/k

Características de la terminal del usuario:

Amplificador de alta potencia =-4.5dBW

Pérdidas de los circuitos=0.7dB

Ganancia de la antena efectiva =1.0dBi

$$EIRP = -4.5 + 1 - .7 = -4.2 \text{ dBW}$$

Pérdidas de propagación.

$$FSL = 32.4 + 20 \text{Logr}[\text{Km}] + 20 \text{Logf}[\text{MHz}] = 32.4 + 20 \text{Log}(2215) + 20 \text{log}(1616) = 163.5 \text{ dB}$$

Las pérdidas totales de propagación son entonces:

$$Pérdidas = 163.5 + 0.5 + 0.2 + 0.5 + 0.5 = 165.2 \text{ dB}$$

Cuando la señal llega al satélite, considerando los valores anteriores:

$$Potencia \text{ de la señal recibida} = -4.2 - 165.2 = -169.4 \text{ dBW}$$

Si se considera la ganancia de la antena del satélite, entonces el nivel de la señal recibida es:

$$Nivel \text{ de la señal} = -169.4 + 23.9 = -145.5 \text{ dBW}$$

Si calculamos la relación C/N_0 :

$$C/N_0 = -4.2 - 3.1 - 165.2 + 228.6 = 56.1 \text{ dB}$$

Para el enlace de bajada:

En el satélite:

Amplificador de alta potencia =-6.5dBW

Pérdidas de los circuitos transmisores=2.1dB

Ganancia de la antena efectiva=24.3dBi

$$EIRP = -6.5 + 24.3 - 2.1 = 15.7 \text{ dBW}$$

Se consideran las mismas pérdidas de propagación que en el enlace de bajada = 165.2 dB

La terminal del usuario tiene las siguientes características:

$$\text{Ganancia de la antena} = 1 \text{ dBi}$$

$$G/T = -23 \text{ dBi/K}$$

La señal recibida en la terminal del usuario es de:

$$\text{Señal recibida} = -165.2 + 15.7 = -149.5 \text{ dBW}$$

$$\text{Nivel de la señal} = -149.5 + 1 = -148.5 \text{ dBW}$$

$$C/N_0 = 15.7 - 23 - 165.2 + 228.6 = 56.1 \text{ dBHz}$$

Se puede observar que el valor de C/N_0 es igual para el enlace de subida y el de bajada, esto es un caso específico en que se ha ajustado la potencia para obtener un valor óptimo de C/N_0 , generalmente el valor de C/N_0 es mayor en el enlace de subida.

Si se supone una tasa de transmisión de datos de 50 Kbps

Se calcula el C/N_0 total del enlace.

$$\frac{N_0}{C} = \frac{N_0}{C_D} + \frac{N_0}{C_U}$$

haciendo las sustituciones correspondientes, se obtiene que el C/N_0 global es:

$$\frac{C}{N_0} = 10 \text{Log}(10^{5.6} + 10^{5.6}) = 52.98 \text{ dBHz}$$

Sustituyendo:

$$E_b/N_0 = C/N_0 - 10 \text{Log}R = 5.99 \text{ dB}$$

Donde R representa la tasa de transmisión de datos.

En este sistema un valor requerido es de $E_b/N_0 = 6.1 \text{ dB}$, por lo que el valor obtenido es aceptable y nos garantiza una buena calidad en el enlace.

Este valor, como se observa está dentro de los valores permitidos para transmisión de datos, ya que un valor aceptable es de 12 dB. Por lo tanto este enlace con los valores determinados es aceptable para un sistema de comunicación satélite-usuario, este cálculo se realizó utilizando algunas pérdidas y algunos valores obtenidos de Motorola, estas cantidades pueden variar dependiendo en gran medida de las condiciones ambientales y del lugar donde se realice el enlace, es decir debido a condiciones climáticas y posición geográfica.

Cálculo de potencia en la señal recibida en un enlace satélite - Gateway*Frecuencia de operación=29.4GHz. En el enlace de subida.**Distancia al satélite=2326Km.**Pérdidas de apuntamiento=-0.3dB**Pérdidas de los circuitos=-1dB**Potencia del transmisor=13dBW**Pérdidas de propagación y efectos atmosféricos=-30.9dB**Pérdidas de polarización=-0.2dB**Ganancia de la antena del satélite=56.3dB**En el transmisor:*

$$EIRP=56.3+13-.3-1=68dBW$$

Pérdidas de propagación.

$$FSL=32.4+20\text{Logr}[\text{Km}]+20\text{Logf}[\text{MHz}]=32.4+20\text{Log}(2326)+20\text{log}(29400)=-189.1dB$$

Las pérdidas totales de propagación son entonces:

$$Pérdidas=189.1+30.9+0.2=220.2dB$$

Cuando la señal llega al receptor, considerando los valores anteriores:

$$Potencia de la señal recibida=68-220.2=-152.2dBW$$

*Las pérdidas de apuntamiento son=0.8dB**La Ganancia de la antena en el receptor es=30.1dB*

$$La señal recibida=-152.2-0.8+30.1=-122.9dB$$

*En el enlace de bajada:**Frecuencia de operación=20 GHz. En el enlace de subida.**Distancia al satélite=2326Km.**Pérdidas de apuntamiento=-0.5dB**Pérdidas de los circuitos=-3.2dB**Potencia del transmisor=0dBW**Pérdidas de propagación y efectos atmosféricos=-15.19dB**Pérdidas de polarización=-0.2dB**Ganancia de la antena=26.9dB**En el transmisor:*

$$EIRP=26.9-3.2-0.5=23.2dBW$$

Pérdidas de propagación.

$$FSL=32.4+20\text{Logr}[Km]+20\text{Logf}[MHz]=32.4+20\text{Log}(2326)+20\text{log}(20000)=-185.8dB$$

Las pérdidas totales de propagación son entonces:

$$\text{Pérdidas}=185.8+15.5+0.2=201.5dB$$

Cuando la señal llega al receptor, considerando los valores anteriores:

$$\text{Potencia de la señal recibida}=23-201.5=-178.5dBW_i$$

Las pérdidas de apuntamiento son=0.2dB

La Ganancia de la antena en el receptor es=53.2dB

$$\text{La señal recibida}=-178.5-0.2+53.2=-125.5dBW$$

En este cálculo se puede observar que algunos valores son similares, como son las pérdidas en el medio de propagación, aunque el nivel de la señal se mejora debido a las características del gateway que no son tan limitadas como una terminal de usuario, con estos factores se mejora la calidad de la señal recibida con respecto al cálculo anterior.

Para enlaces intersatelitales:

$$\text{Distancia} = 4400 \text{ Km E/W}$$

Transmisor

$$\text{Potencia}=5.3dBW$$

$$\text{Ganancia de la antena}=36.7dB$$

$$\text{Pérdidas de los circuitos}=-1.8dB$$

$$\text{Pérdidas de apuntamiento}=-1.8dB$$

$$\text{EIRP}=36.7+5.3-1.8-1.8=38.4dBW_i$$

Pérdidas en el espacio=FSL

$$FSL=32.4+20\text{logr}+20\text{Logf}=32.4+72.86+86.02=191.2dB$$

En el receptor:

$$\text{La potencia recibida}=38.4-191.2=-152.8dBW_i$$

Si:

$$\text{Pérdidas de apuntamiento}=-1.8dB$$

$$\text{Ganancia de la antena}=36.7dB$$

$$\text{La señal recibida}=-117.9dBW$$

Este es un caso especial en el cálculo de enlaces ya que se considera una distancia menor en el cálculo y las pérdidas de propagación tienen características diferentes, el nivel de señal requerido

es determinado y está relacionado con las pérdidas la potencia y la ganancia de las antenas en los satélites, este es un caso específico, que puede hacerse más general cuando se trata de enlaces reales que requieren más de un enlace intersatelital y el seguimiento de trayectorias determinadas, ya sea por la topología de la red y la cantidad de satélites involucrados en el enlace.

En general los tres tipos de enlaces tienen una función específica y para ello algunas características determinadas, en ocasiones estos enlaces se apoyan entre ellos para lograr la comunicación deseada y obtener un desempeño óptimo con la mejor calidad posible. Cabe destacar que estos enlaces están limitados de alguna forma por las características de la tecnología y el diseño de estos sistemas.

[5] Roddy, Dennis. "Satellite Communications". Mc Graw Hill, Second Edition, 1996. pp. 428.

CONCLUSIONES

Los satélites de órbita baja están diseñados para establecer comunicación del satélite con las estaciones terrestres, con las terminales de los usuarios, y si la tecnología empleada así lo requiere, también se establecen enlaces entre los satélites.

Estos sistemas se caracterizan por la distancia más corta a la tierra que los sistemas de satélites Geoestacionarios, el tiempo de retraso de la señal, la cobertura y servicio en zonas donde no existen sistemas de comunicación terrestres. Debido a sus características se necesitan sistemas que cuentan con un número determinado de satélites para brindar una cobertura total a la tierra, estos se definen de acuerdo a la altura de los satélites, su ángulo con respecto a la tierra, y entre otros factores la geometría que utilizada para determinar la cobertura de cada satélite.

Un enlace lleva una señal desde un punto, que puede ser una terminal de usuario, un gateway o incluso otro satélite, hasta otro punto como pudiera ser otra terminal de usuario, o un satélite. El análisis se realiza desde el punto que se encuentra en la tierra hasta el satélite y del satélite hasta el punto final. En el caso de comunicación entre satélites se refiere a los enlaces intersatelitales que se utilizan para llevar la comunicación entre diferentes satélites sin tener que contar con comunicaciones terrestres intermedias para llegar nuevamente a un punto en la tierra.

En el enlace es importante considerar los factores atmosféricos que en condiciones determinadas van a influir sobre el sistema y en algunos casos a tal grado de ser necesarios algunos ajustes en los dispositivos para completar la comunicación con una calidad deseada. Esta calidad se refiere a los niveles de bit erróneos recibidos y la relación portadora a ruido, existen algunos valores definidos para una calidad determinada, de voz y datos, y en base a ellos se ajustan los dispositivos para cumplir con los requerimientos. Se pudo observar que estos valores son más críticos en el enlace de subida cuando se trata de una terminal de usuario al satélite, y esto es por que estamos limitados a las características técnicas de la terminal de usuario.

Algunos sistemas de satélites emplean diferentes bandas de frecuencia para los diversos enlaces, esto debido a las pérdidas de propagación que se presentan utilizando una u otra frecuencia. En el caso que se analizó se utilizan mayores frecuencias en enlaces intersatelitales y en enlaces satélite-gateway.

También depende que clase de enlace sea, ya que en los cálculos se consideran ganancias de las antenas, que son mayores en los satélites y gateways que en las terminales de usuario, al igual que las potencias de los mismos que nos dan un nivel de señal determinado y el enlace se ajusta a estas características. La distancia entre ambos puntos es un factor importante ya que de eso depende la intensidad de la señal dado un punto y por ejemplo en el caso de satélites de órbita baja, la distancia entre satélites es mayor que la distancia de un satélite a la tierra y pueden presentarse más pérdidas de propagación.

Cada parámetro y dispositivo que interviene en un enlace es importante ya que de ello depende una calidad en el sistema, por lo que se hace un análisis de cada uno para ajustar los niveles de la señal en las condiciones que éste se realice.

En un caso general, los niveles de la señal a través del enlace varían de la siguiente forma: Cuando se transmite la señal desde una estación terrestre se tiene una potencia de salida determinada por los dispositivos que la componen, la señal sufre una disminución de nivel debido a las condiciones ambientales y atmosféricas, así es como llega al satélite, en este, gracias a los

amplificadores y ganancia de las antenas esta señal se recupera con cierto nivel, en esta parte de la trayectoria sufre pérdidas debido a algunos dispositivos, con esta intensidad es como se proyecta hacia la estación terrestre sufriendo pérdidas de espacio libre y atmosféricas, finalmente llega a la estación terrestre donde la señal se recupera. A lo largo de esta trayectoria se observa que el nivel de la señal varía de acuerdo a condiciones del ambiente y dispositivos que son los que actúan principalmente en este tipo de sistemas.

BIBLIOGRAFÍA

Jamalipour, Abbas et. al. "Traffic Characteristics of LEO-Based Global Personal Communications Networks". IEEE Communications Magazine. Febrero, 1997.

Roddy, Dennis. "Satellite Communications". Mc Graw Hill, Second Edition, 1996.

Richharia, M. "Satellite Communication Systems". Mc Graw Hill, Second Edition, 1999.

Hirshfield, Edward "Globalstar's Performance" Space Technol, Vol 19, No 1, pp. 5-38, 1999.

Wilbur L. Pritchard "Satellite Communication Systems Engineering". Prentice Hall, Second Edition, 1999.

Schwartz, Misha "Transmisión de información, modulación y ruido" Mc Graw Hill. Tercera edición.

Pratt, Timothy "Satellite Communications" John Wiley and Sons Inc. 1986.

Rosado, Carlos "Comunicación por satélite" Editorial Limusa, Primera edición, 1999.

Gordon D., Gary and Morgan L., Walter "Principles of Satellite Communications" John Wiley and Sons Inc. 1993.

Sklar, Bernard "Digital Communications" Prentice Hall, 1988.

Freeman, Roger "Radio System Design for Telecommunications" John Wiley and Sons Inc. 1987.

<http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/>

<http://www.satelliteonthenet.co.uk/vhite/bband.sys.html>

<http://www.ee.surrey.ac.uk/Personal/L.Wood/constellations/tables/>