

Capítulo 1

Introducción a los sistemas de comunicación en satélites pequeños

1.1. Introducción

El objetivo fundamental de un sistema de comunicaciones es transferir información desde un punto de origen denominado “fuente” hasta otro punto al que se quiere llegar denominado “destino”. Por consiguiente, un sistema de comunicaciones eléctrico/electrónico es aquel conjunto de dispositivos eléctricos/electrónicos cuyo único fin es el de transferir información desde la fuente hasta el destino a través de un medio de propagación. La fuente original de información puede ser analógica o digital; sin embargo, todas las formas de información deben de ser convertidas a energía electromagnética (función de un transductor) antes de ser propagadas.

Existen tres partes esenciales de un sistema de comunicaciones eléctrico/electrónico:

- Transmisor (Tx): Su función principal es la de adecuar la señal de entrada a las características del medio de propagación (amplificación, atenuación, filtrado, codificación, modulación, multiplexación, conversión de frecuencias).
- Medio de propagación (Canal de Transmisión): Conjunto de elementos y fenómenos electromagnéticos asociados que permiten el enlace entre

el transmisor y el receptor. Existen dos tipos de medios de propagación: ondas guiadas (líneas de transmisión, fibra óptica) y ondas no guiadas (antenas).

- Receptor (Rx): Sus funciones principales son seleccionar la señal deseada de entre las varias que pueden existir en el medio de propagación y adecuarla al transductor de salida para su correcta interpretación (amplificación, atenuación, filtrado, decodificación, demodulación, demultiplexación).

A continuación se indican fechas y eventos destacados en el campo satelital y afines.

En 1837 Samuel Morse desarrolló el primer sistema de comunicaciones electrónico a base de inducción electromagnética, el cual fue llamado “telégrafo”. En 1876 Alexander Graham Bell y Thomas A. Watson crearon un sistema de comunicaciones basado en un hilo delgado para transferir voz humana, al cual llamaron “teléfono”. En 1894 Guglielmo Marconi transmitió por primera vez señales de radio, sin hilos, a través de la atmósfera terrestre[31]. En 1945 Arthur C. Clarke publica en la revista *Wireless World* un artículo llamado “Extraterrestrial Relays” (Retransmisión extraterrestre), el cual menciona la idea de un satélite que es colocado a una altura de alrededor de 36 000 [Km] de la superficie terrestre, orbitará de forma síncrona la Tierra y será capaz de recibir y transmitir señales desde un punto en la Tierra a otro punto distinto de la superficie de acuerdo a la vista del satélite. En 1957 el Sputnik 1 se convierte en el primer satélite puesto en órbita terrestre por la URSS. En 1962 el Telstar 1 se constituye en el primer satélite de telecomunicaciones puesto en órbita por EU. En 1981 el UoSat 1 (OSCAR 9) es el primer satélite pequeño (microsatélite, 52 [Kg]) puesto en órbita por la Universidad de Surrey, Inglaterra.

En este capítulo se pretende dar una breve descripción de un sistema de comunicaciones satelital enfocado a satélites pequeños.

1.2. Sistemas de comunicaciones satelitales

Un sistema de comunicación satelital consiste en un satélite artificial que orbita la Tierra y que recibe señales de una estación terrena transmisora, las amplifica y procesa para mandarlas de regreso a Tierra para su recepción en una o más estaciones terrenas receptoras. El satélite es un dispositivo

creado por el hombre y que es puesto en órbita para realizar tareas ya sean de comunicaciones o de captura de imágenes de nuestro planeta.

Las comunicaciones por satélite brindan ciertas características que no se encuentran disponibles en otros medios de transmisión. Algunas de sus ventajas son:

- Área de cobertura: De acuerdo a la órbita, un satélite puede tener una cobertura regional, nacional, internacional, continental o global. De ésta manera, se puede brindar servicio a lugares de difícil acceso.

- Alta Capacidad: Los enlaces satelitales involucran portadoras de alta frecuencia, lo que brinda grandes anchos de banda de información en satélites comerciales. Para un satélite pequeño el rango típico de capacidad va desde unos cuantos bauds hasta los 10 [Mbps].

- Costos independientes: El costo de la transmisión satelital es básicamente el mismo, sin importar la distancia del enlace o el número de estaciones terrenas receptoras (radiodifusión).

La implementación exitosa de un sistema de comunicaciones satelital requiere de una robustez en los enlaces por aire (enlace ascendente y enlace descendente) para asegurar que las señales llegarán de forma adecuada a su destino, debido a que la transmisión a través de la atmósfera degrada las características de la señal.

Un sistema de comunicación en satélites pequeños está dividido de manera general en dos áreas o segmentos: segmento espacial y segmento terrestre. Dichos segmentos se muestran en la Figura 1.1.

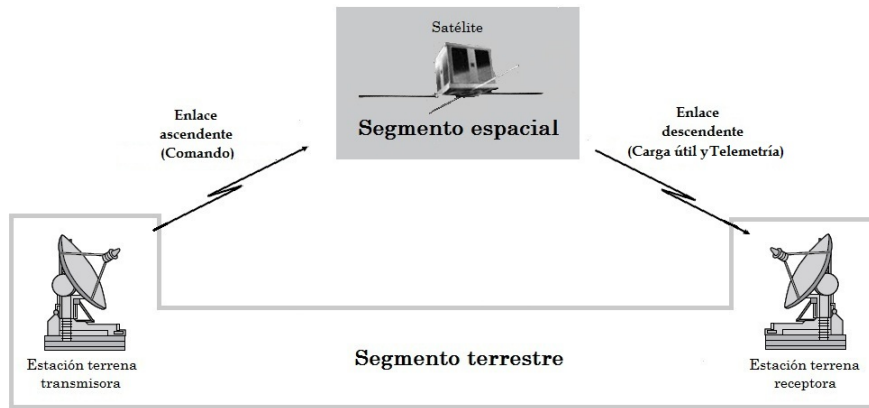


Figura 1.1: Segmentos de un sistema de comunicación en satélites pequeños.

1.2.1. Segmento espacial

Como se puede observar en la figura anterior, éste segmento contiene al satélite (o satélites) en órbita del sistema.

Un satélite realiza dos funciones principales: ejecuta las órdenes que son enviadas en el enlace ascendente, y envía información por el enlace descendente. Un satélite está conformado por diversos subsistemas, en el caso de un satélite pequeño los principales subsistemas son:

- Estructura: Su función principal es mantener a los subsistemas en una posición fija (chasis del satélite).
- Potencia: Su función principal es almacenar, regular y proveer energía eléctrica a todos los subsistemas (baterías, celdas solares).
- Estabilización: Su función principal es mantener el satélite estable y en una posición fija para asegurar las comunicaciones (ruedas inerciales, bobinas de torque magnético).
- Computadora de Vuelo: Su función principal es coordinar las diversas acciones entre los subsistemas (microprocesadores, memorias satelitales).
- Telemetría y Comando: Su función principal es conocer el estado del satélite y comandarlo (sensores, comunicaciones RF).

- Comunicaciones: Su función principal es asegurar la correcta recepción/transmisión de la información desde/para Tierra (antenas, transmisor, receptor).
- Carga útil (Payload): Define la misión o aplicación del satélite (transpondedor en satélites de comunicaciones).

1.2.2. Segmento terrestre

El segmento terrestre consiste de las estaciones terrenas terminales, las cuales conectan los equipos del usuario por medio de redes terrestres. La estación terrena transmisora recibe la telemetría y envía el comando al satélite, y en ocasiones también funciona como estación terrena receptora para la carga útil. Existen tres tipos de estaciones terrenas terminales[20]:

- Fijas: Éstas estaciones están diseñadas para mantenerse fijas en un lugar, es decir, que no exista movimiento mientras se realiza la comunicación vía satélite. Un ejemplo de estas terminales son pequeñas terminales utilizadas en redes privadas (VSAT's fijas, Very Small Aperture Terminal).
- Transportables: Son diseñadas para ser movibles, pero una vez ubicada en un lugar se deben de mantener fijas para realizar la comunicación vía satélite. Un ejemplo de estas terminales son las utilizadas en camiones (SNG, Satellite News Gathering).
- Móviles: Son diseñadas para comunicarse con el satélite mientras están en movimiento. Son definidas de acuerdo a su localización en la superficie terrestre, tal como móvil terrestre, móvil aeronáutico o móvil marítimo. Un ejemplo de estas terminales son VSAT's móviles.

Como se mencionó anteriormente, las misiones de pequeños satélites lanzadas hasta hoy, dependen de su autonomía a bordo; por lo que no se necesita que la estación terrena lo esté monitoreando continuamente, lo que simplifica y reduce el costo del segmento terrestre.

Para satélites pequeños, los enlaces ascendentes y descendentes sufren de una menor atenuación en comparación a grandes satélites (debido a una menor distancia de recorrido). Además, debido a su autonomía a bordo, los enlaces ascendentes solo son para cuestión de comando (menor capacidad de información) y los enlaces descendentes son para la transmisión de datos

y carga útil (mayor capacidad de información). Por tal motivo, en satélites pequeños, el enlace ascendente suele operar en frecuencias de VHF y UHF, mientras que el enlace descendente suele operar en bandas VHF, UHF, en muy pocos casos en banda L, y la actual tendencia es la banda S. Algunas de las frecuencias asignadas a las comunicaciones vía satélite, en satélites pequeños, se muestran en la Tabla 1.1[2].

Banda	Rango de frecuencias [GHz]	Frecuencia utilizada [GHz]	Enlace
VHF	0.03 - 0.3	0.1458250	Ascendente
		0.1459250	Ascendente
		0.1458700	Descendente
		0.1459300	Descendente
UHF	0.3 - 3	0.4321250	Ascendente
		0.4357650	Descendente
		0.435900	Descendente
		0.436000	Descendente
L	1 - 2	0.4375050	Descendente
		1.2666870	Ascendente
		1.2676000	Ascendente
S	2 - 4	1.2687000	Ascendente
		2.2500000	Descendente
		2.3041000	Descendente
		2.4012000	Descendente

Tabla 1.1: Algunas frecuencias utilizadas en satélites pequeños.

1.3. Antenas

Las antenas en satélites pequeños son utilizadas para recibir y transmitir señales de RF que conforman los enlaces del canal de comunicación. Las antenas son una parte importante del sistema de comunicación satelital debido a que es el elemento esencial en el incremento de la potencia de las señales recibidas o transmitidas para permitir la comunicación. A continuación se describen los parámetros más importantes para conocer el comportamiento de una antena.

1.3.1. Ganancia

La ganancia, $G(\theta, \phi)$, en una dirección específica, (θ, ϕ) (coordenadas esféricas), se define como la razón de la intensidad de radiación¹, $U(\theta, \phi)$, en una dirección dada, a la intensidad de radiación que sería obtenida si la potencia aceptada por la antena fuera radiada isotrópicamente², P_T .

$$G(\theta, \phi) = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_T}$$

El valor donde $G(\theta, \phi)$ tiene máxima radiación es simplemente llamado ganancia de la antena y suele expresarse en [dBi] (decibeles referidos a una antena isotrópica). Este valor de G , está relacionado con la apertura física de la antena, A_f , con la longitud de onda, λ , y con la eficiencia de la antena, η , por la expresión:

$$G_{max} = 10 \log \left(\frac{4\pi}{\lambda^2} \eta A_f \right) \text{ [dBi]}$$

En el caso de una antena de apertura circular de diámetro, D , la ganancia se calcula como:

$$G_{max} = 10 \log \left[\eta \left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \right] \text{ [dBi]}$$

Comúnmente en comunicaciones satelitales, suele utilizarse el término de PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Efectiva) y se define como el producto de la potencia de transmisión y la ganancia de la antena. Si la ganancia ya se conoce en [dBi], entonces la PIRE es:

$$PIRE \text{ [dBW]} = 10 \log(P_T \text{ [W]}) + G \text{ [dBi]}$$

1.3.2. Polarización

Se refiere a la polarización de la onda radiada por la antena, que se define como la dirección y magnitud relativa, variante en el tiempo, del vector de campo eléctrico; específicamente la figura trazada por el extremo del vector.

Existen tres tipos de polarizaciones:

¹Potencia radiada por unidad de ángulo sólido (ángulo en el espacio por el cual se radia toda la energía).

²Una antena isotrópica es una antena hipotética que radia uniformemente en cualquier dirección.

- Lineal: El vector de campo eléctrico se mantiene orientado en un solo plano a lo largo de la dirección de propagación.
- Circular: El vector de campo eléctrico cambia su dirección a lo largo de la dirección de propagación. Puede cambiar hacia el lado derecho RHCP (Right Hand Circular Polarization) o hacia el lado izquierdo LHCP (Left Hand Circular Polarization).
- Elíptica: El vector de campo eléctrico cambia su dirección y su magnitud a lo largo de la dirección de propagación.

Es importante mencionar que una antena solo puede transmitir y recibir en la misma polarización, y que la antena receptora debe de tener la misma polarización de la onda transmitida para recibir toda la potencia. La Figura 1.2 muestra una onda con LHCP.

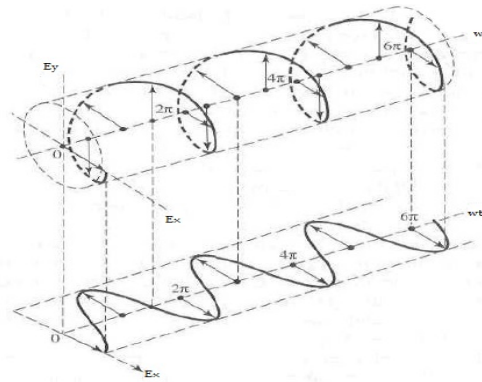


Figura 1.2: Onda que viaja en el tiempo con LHCP.

1.3.3. Patrón de radiación

Es la representación gráfica o mediante una función matemática de las propiedades de radiación de la antena en función de las coordenadas del espacio. De acuerdo a su patrón de radiación una antena se puede clasificar como:

- Direccional: Tiene la propiedad de transmitir o recibir ondas electromagnéticas de manera más eficiente en algunas direcciones que otras.
- Omnidireccional: Tiene la propiedad de transmitir o recibir ondas electromagnéticas por igual en todas direcciones.

En la Figura 1.2 se muestra el patrón de radiación de una antena direccional.

1.3.4. Ancho de haz de media potencia (a -3 [dB])

En un plano que contiene la dirección de máxima radiación, es el ángulo que se forma entre dos direcciones donde la intensidad de radiación es la mitad del máximo valor. En la Figura 1.2 se muestra dicho ancho de haz, θ_{-3dB} , y que en caso de un reflector parabólico se puede calcular como:

$$\theta_{-3dB} = 70 \frac{\lambda}{D}$$

donde:

λ es la longitud de onda de la señal

D es el diámetro de la antena

1.3.5. Lóbulos secundarios

Son lóbulos que se radian en cualquier otra dirección diferente a la dirección principal. Usualmente los lóbulos secundarios se encuentran de forma adyacente al lóbulo principal y su intensidad puede interferir con otros sistemas. En la Figura 1.3 se muestran dichos lóbulos[3].

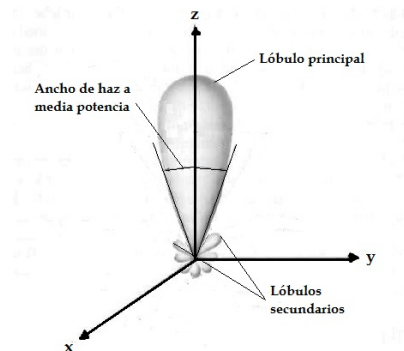
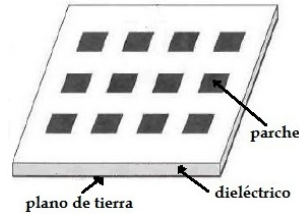


Figura 1.3: Patrón de radiación de una antena direccional.

1.4. Antenas para satélites pequeños

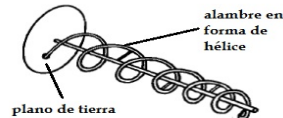
Las antenas para satélites pequeños son generalmente de ganancia modesta, debido a sus limitaciones en tamaño y peso. Son usualmente de polarización circular para facilitar la estabilización, ya que muchos de los satélites pequeños son estabilizados mediante giro. A continuación se mencionan algunas de las antenas más utilizadas[4][13].

1.4.1. Microcinta de parche



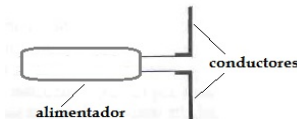
Es una antena de circuito impreso que consiste de parches montados en una capa de dieléctrico sobre un plano de tierra. Sus dimensiones son de cerca de 4 [mm] de espesor y $\frac{\lambda}{2}$ por lado. Utiliza polarización lineal o circular con ganancia entre 5 - 10 [dBi] y un ancho de banda de poco por ciento de la frecuencia central. Para comunicaciones en banda S es la más utilizada.

1.4.2. Antena de hélice



Es un alambre enrollado en forma de hélice sobre un plano de tierra. Sus dimensiones son de cerca de 2λ de largo y $\frac{\lambda}{3}$ de diámetro. Utiliza polarización circular o elíptica con una ganancia de 5 - 20 [dBi] y ancho de banda del 20 % de la frecuencia central.

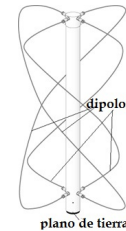
1.4.3. Dipolo



Es una antena consistente de dos conductores que son alimentados en el centro. Sus dimensiones son de alrededor de $\frac{\lambda}{2}$ de largo. Utiliza polarización lineal o circular con 2 [dB] de ganancia y un ancho de banda del 5 % de la frecuencia central.

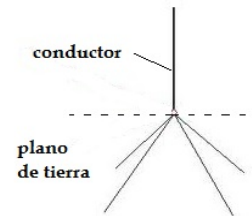
1.4.4. Antena cuadrifilar

Es una antena omnidireccional que en apariencia es similar a una antena de hélice, consiste de dos dipolos cruzados con plano de tierra. Normalmente tiene una relación diámetro/altura de 0.44. Utiliza polarización circular con 5 [dBi] de ganancia y un ancho de banda del 20 % de la frecuencia central.



1.4.5. Monopolo

Es una antena que consiste de un solo conductor sobre un plano de tierra (en este caso, suele ser una serie de conductores que se unen en la base del monopolo). Sus dimensiones son de alrededor de $\frac{\lambda}{4}$ de largo. Utiliza polarización lineal con 2 [dB] de ganancia y un ancho de banda del 5 % de la frecuencia central.



1.5. Estaciones terrenas de satélites pequeños

La complejidad de una estación terrena depende del tipo de misión del satélite. Se puede decir que hay algunas recomendaciones para el diseño de estaciones terrenas de satélites pequeños, entre las cuales destacan:

- La confiabilidad del sistema debe ser suficiente para asegurar que cuando el satélite sea visible para la estación, no se pierda la transmisión de información.
- El sistema debe ofrecer una rápida respuesta a la información y comandos importantes.

GENSO (Global Educational Network for Satellite Operations) es un proyecto lanzado y coordinado por la Oficina de Educación de la ESA (European Space Agency). El objetivo principal es incrementar la confiabilidad de misiones espaciales educativas mediante la formación de una red mundial de

estaciones terrenas que puedan interactuar con diferentes naves espaciales por medio de un software común.

La Figura 1.4 muestra en un diagrama de bloques las partes que contiene una estación terrena.

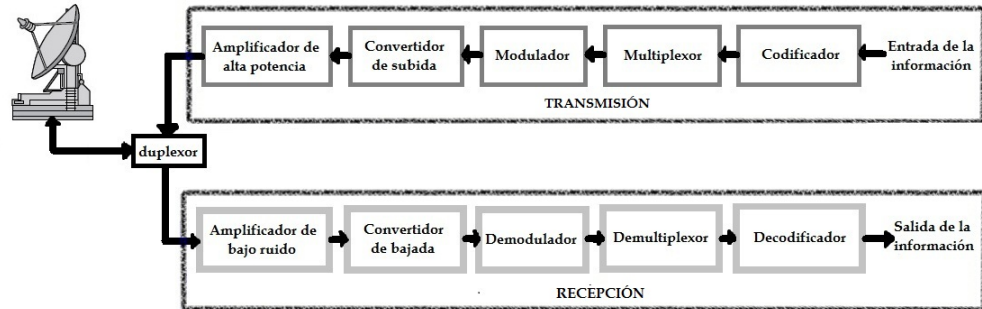
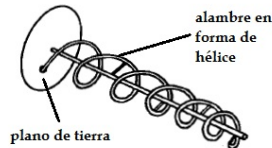


Figura 1.4: Elementos de una estación terrena.

1.5.1. Antenas para estaciones terrenas de satélites pequeños

Las antenas utilizadas en las estaciones terrenas para satélites pequeños usualmente son directivas (ancho de haz estrecho) y con alta ganancia (para compensar la poca ganancia de las antenas del satélite), por esta razón las antenas siguen al satélite cuando está en un rango visible para la estación. Para evitar un desajuste de polarización, dichas antenas usualmente también manejan una polarización circular. Dadas éstas características, las antenas más usadas son:

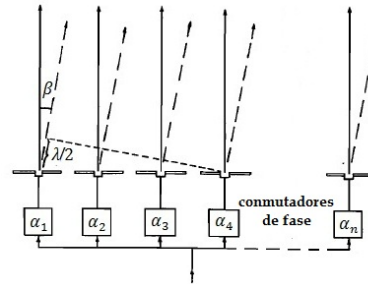
1.5.1.1. Antena de hélice de alta ganancia



Es esencialmente idéntica a la utilizada en los satélites pequeños. Algunas veces se utilizan arreglos de elementos helicoidales para obtener una ganancia mayor en comparación a la que se obtiene al utilizar un solo elemento.

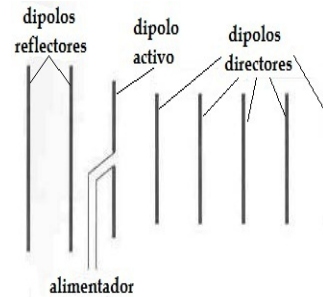
1.5.1.2. Arreglo de antenas en fase

La apertura es excitada por varios elementos radiantes que por sí solos presentan radiaciones débiles. Si todas las fases α_n son iguales, entonces se tiene una interferencia constructiva³ y se produce un haz muy estrecho. Por otro lado, existe un ángulo β para el cual se tiene una interferencia destructiva⁴ por lo que no se tendrá emisión. La principal ventaja es que se puede dirigir el haz solamente cambiando las fases α_n sin mover las antenas; sin embargo su desventaja es la complejidad del arreglo.



1.5.1.3. Antena Yagi-Uda

Es una antena direccional que consiste de un arreglo de dipolos: dipolo activo (conectado al alimentador), dipolos reflectores (se encuentran en la parte anterior del dipolo activo y tienen una mayor longitud para asegurar la disminución del campo electromagnético en su dirección) y dipolos directores (se encuentran en la parte posterior del dipolo activo y tienen una menor longitud para reforzar el campo electromagnético en su dirección y hacer más pequeño el haz de radiación).



1.5.1.4. Antenas de reflector

Son antenas direccionales y las más usuales, formadas principalmente de un plato parabólico. Existen diferentes tipos, de acuerdo al tipo de reflector y al mecanismo de alimentación. El reflector es usualmente un paraboloide, mientras que el mecanismo de alimentación incluye la alimentación de la antena (usualmente un dipolo o una corneta) y es localizada fuera o en el

³Superposición de ondas que se interfieren entre sí creando un nuevo patrón de mayor intensidad.

⁴Superposición de ondas que se interfieren entre sí creando un nuevo patrón de menor intensidad.

foco del paraboloide. El diámetro de la antena, D , requerido para cualquier misión se puede calcular como[12]:

$$D = \frac{6 \times 10^3 S}{F} \sqrt{\frac{R}{P}}$$

donde:

S es el rango satelital⁵ [km]

F es la frecuencia de la portadora [Hz]

R es la tasa de transmisión [bits/s]

P es la potencia de transmisión del satélite [W]

La ubicación y orientación de las antenas en la estación terrena hacia al satélite se realiza mediante dos parámetros importantes: *azimut* y *elevación*. El azimut es la dirección del satélite medido desde el norte geográfico en dirección a las manecillas del reloj, la elevación es el ángulo que se forma entre el satélite y el plano horizontal del observador. La Figura 1.5 muestra los ángulos.

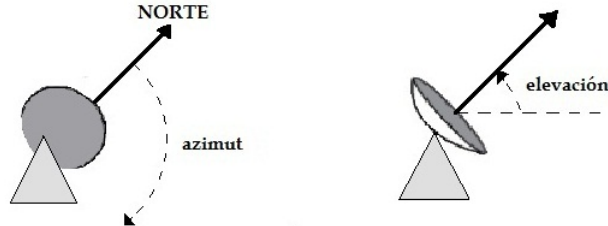


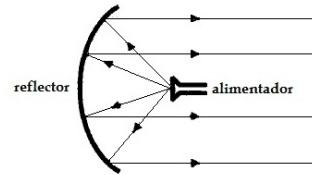
Figura 1.5: Azimut y elevación para una antena.

Algunas de las antenas de reflector más utilizadas son[22]:

⁵Distancia que hay de la estación terrena al satélite.

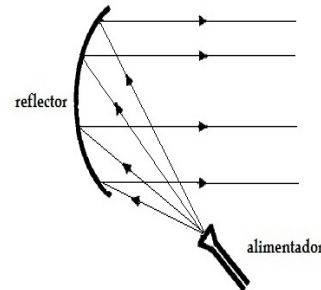
Reflector parabólico con alimentador en el punto focal

Las ondas que viajan del alimentador sufren de una reflexión desde diferentes puntos de la superficie del reflector obteniendo un haz en fase muy concentrado, debido a la longitud de las rutas que recorre cada onda. Sin embargo, la colocación del alimentador significa un obstáculo para la propagación de las ondas.



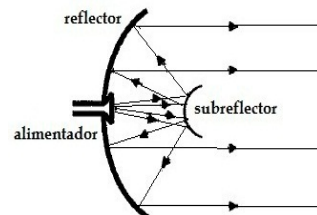
Reflector parabólico seccionado con alimentador desplazado (Offset)

Básicamente opera igual que la antena con alimentador en el punto focal. Sin embargo ésta antena ofrece la ventaja de poder manipular mecánicamente más fácil el alimentador, además de no presentar ningún obstáculo para el viaje de las ondas. Al igual que el caso anterior, se tiene el problema de desborde de señales por las orillas de la superficie, lo que representa pérdidas.



Reflector parabólico Cassegrain

Su configuración geométrica contiene un subreflector con superficie hiperbólica y el alimentador es orientado hacia arriba, por lo que el ruido que se introduce en las señales ya no es por reflexiones en la Tierra sino principalmente por la atmósfera. Esto hace que sea mucho más eficiente que las anteriores y su ganancia es mayor, pero su precio también lo es. Es la antena más utilizada para grandes cantidades de datos.



1.5.2. Amplificador de bajo ruido (LNA, Low Noise Amplifier)

La antena recibe las señales provenientes del satélite y a través del duplexor se las entrega a un amplificador de bajo ruido; dichas señales tienen una intensidad muy baja y son muy vulnerables ante cualquier ruido que se le pueda añadir antes de ser amplificadas a un nivel aceptable (debido a que las señales tienen que recorrer una gran distancia). La principal función de un LNA es amplificar las señales recibidas, agregando la menor cantidad de ruido posible, para que de esta forma en las etapas siguientes no se amplifique el ruido extra añadido y tener una incorrecta interpretación de los datos. Para que un LNA lleve a cabo esa función, hay que tomar en cuenta la propiedad de no linealidad de un amplificador (existe un punto, llamado punto de saturación, en el cual el amplificador en vez de amplificar la señal de entrada, comienza a disminuirla).

Para tener un buen LNA se debe de evitar el ruido de intermodulación⁶, y para ello se debe de aplicar un back-off a la entrada y un back-off a la salida, lo que significa una reducción en la potencia de entrada y salida; de esta manera se estará en el límite de la zona lineal del amplificador (punto de operación) y no habrá ruido de intermodulación[33].

El parámetro principal de un LNA, y que suele brindar el fabricante, es la temperatura de ruido equivalente (T_e) o figura de ruido (F). La temperatura de ruido equivalente es aquella temperatura que genera la misma potencia de ruido a la salida de un amplificador ideal que la generada por un amplificador real cuando éste no tiene ruido a la entrada. La figura de ruido se define como el cociente entre la relación señal a ruido deseada en la entrada del dispositivo y la relación señal a ruido en la salida del dispositivo. A una temperatura ambiente, $T_0 = 290$ [K], ambos parámetros se relacionan de la siguiente manera:

$$NF = 10 \log \left(1 + \frac{T_e}{T_0} \right) [dB]$$

El ruido térmico es aquel ruido producido internamente por cualquier dispositivo. La potencia N [W] del ruido producido por una fuente de ruido térmico puede ser calculada como:

⁶Cuando se trabaja con más de una portadora modulada en su interior, se producen internamente muchas señales adicionales e indeseables que a la salida se suman a la información adicional provocando distorsión.

$$N = kT_e B$$

donde:

$$k = \text{constante de Boltzmann } 1.38 \times 10^{-23} \text{ [J/K]}$$

$$B = \text{ancho de banda de recepción [Hz]}$$

Su característica más importante, es que tiene una distribución plana en el espectro de frecuencias; es decir, la potencia por cada Hertz es constante. Esta propiedad hace que se le conozca también como “ruido blanco” y permite definir una cantidad muy útil, que facilita los cálculos de los enlaces satelitales, conocida como densidad de ruido N_0 [J o W/Hz]

$$N_0 = \frac{N}{B} = kT_e$$

Los principales tipos de LNA son:

- Parámetrotrico (Diodo Varactor): Temperatura de ruido de alrededor de 30 K (en banda S)
- GaAs FET: Temperatura de ruido de alrededor de 30 K (en banda S)
- HEMT: Temperatura de ruido de alrededor de 20 K (en banda S)

Para las demás frecuencias (banda C, Ku y Ka) los amplificadores varían su temperatura de ruido entre un rango de 100 [K] a 500 [K].

1.5.3. Amplificadores de alta potencia (HPA, High Power Amplifier)

Tanto como en la estación terrena y como en un satélite, las señales sufren de varios procedimientos en la etapa transmisora (codificación, multiplexión, modulación, conversión de frecuencia), por lo que su nivel de potencia es bajo para transmitir las; entonces es preciso amplificarlas antes de entregárselas a la antena, para eso se utiliza un amplificador de alta potencia. La principal función de un HPA es amplificar las señales recibidas, agregando la mayor cantidad de potencia como sea posible para que dichas señales puedan viajar grandes distancias y no sufran de una gran atenuación. Para que un HPA lleve a cabo esa función, y al igual que un LNA, hay que tomar en cuenta la propiedad de no linealidad de un amplificador. Debido a que un HPA tiene

como función principal dar la mayor cantidad de potencia sin tomar mucho en cuenta el ruido, y a diferencia de un LNA, un HPA trabaja en el punto de saturación.

El parámetro principal de un HPA es la potencia (ganancia) que pueda brindar a la señal. Básicamente, existen cuatro tipos de HPA[16, 33]:

- Amplificador de Potencia de Estado Sólido (SSPA, Solid State Power Amplifier): Maneja potencias bajas, entre 5 y 50 [W] en banda S y C, y entre 1 y 6 [W] en banda Ku.
- Klystron: Maneja potencias de salida de entre 500 y 5 000 [W] en banda C con una ganancia de 15 [dB], una banda estrecha de 50 [MHz] y una eficiencia del 25%.
- Tubo de Ondas Progresivas (TWT, Traveling Wave Tube): Maneja potencias de salida de entre 100 y 2 500 [W] en banda C con una ganancia de alrededor de 40 [dB], una banda amplia de 500 [MHz] y una eficiencia del 30%.
- Magnetrón: Maneja potencias en banda X de hasta 40 [MW] en alterna y 1 [MW] en continua con una eficiencia del 85%.

1.5.4. Convertidores de frecuencia

El convertidor de bajada convierte las señales a una frecuencia más baja (FI, frecuencia intermedia) para poderlas amplificar. Dicho proceso permite la creación de varios canales de banda estrecha para facilitar muchos tipos de comunicaciones. Éste convertidor incluye un filtro en la entrada y en la salida; el primero es un filtro pasabanda para dar una mejor forma a la señal de RF y eliminar la frecuencia imagen⁷, el segundo se emplea para rechazar las muchas frecuencias indeseadas que son producidas en el proceso de conversión de bajada[11].

El convertidor de subida realiza la función contraria al convertidor de bajada mediante el traslado de las señales amplificadas de FI a frecuencias más altas donde serán transmitidas. Al igual que el convertidor de bajada, durante el proceso se generan muchas frecuencias indeseadas en la salida por lo que es necesario colocar una etapa de filtración antes de enviar las señales a

⁷Frecuencia de entrada no deseada que es capaz de producir la misma FI que la que produce la señal de entrada deseada.

la etapa de amplificación final. La Figura 1.6 muestra la configuración de un convertidor ascendente de una sola etapa (doble conversión o con dos etapas se utiliza para mayores volúmenes de información).

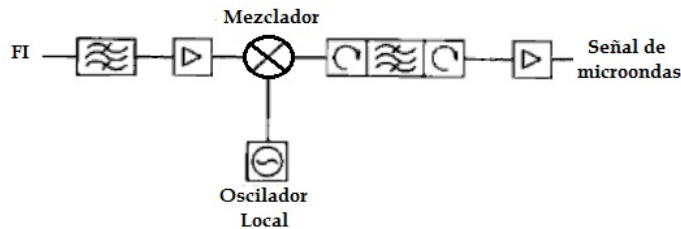


Figura 1.6: Configuración típica de un convertidor ascendente de una sola etapa.

1.5.5. Modulador/Demodulador

La función de un modulador en una estación terrena es sobreponer la información analógica o digital en la portadora FI. El demodulador extrae la información analógica o digital de la portadora FI.

En transmisiones digitales por satélite, la modulación más utilizada es la modulación en fase, específicamente BPSK(Binary Phase-Shift Keying) y QPSK (Quadrature Phase-Shift Keying). El tipo de modulación define la medida de calidad para enlaces digitales, es decir, la probabilidad de bit en error o BER(Bit Error Rate) que se define como la comparación entre el número de bits en error recibidos y el número de bits transmitidos en un intervalo de tiempo. Éste valor depende de la energía de bit, E_b [J], y de la densidad de ruido, N_0 [J o W/Hz], cuyo cociente se relaciona con la relación señal a ruido (medida de calidad para enlaces analógicos). De esta manera, por ejemplo el BER para una modulación QPSK o BPSK (ambos poseen el mismo) se calcula como[28]:

$$BER = Q \left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right)$$

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{x}{\sqrt{2}}\right) = \text{Función complementaria de error}^8.$$

$$\frac{E_b}{N_0} [dB] = \frac{C}{N_0} [dB] - 10 \log(R)$$

$$\frac{C}{N_0} = \text{Relación portadora a densidad de ruido}$$

1.5.6. Multiplexor/Demultiplexor

Un multiplexor combina diferentes canales de información para tener un solo canal en la etapa de modulación, mientras que el demultiplexor realiza el proceso inverso. La multiplexación facilita el proceso de la comunicación ya que permite tener un solo enlace compuesto ascendente o descendente que es transmitido o recibido, respectivamente, en una antena común. Existen diferentes técnicas de multiplexación, entre las que destacan: división de frecuencia y división de tiempo.

La capacidad del (los) multiplexor (es) depende de la cantidad de información a transferir (ancho de banda).

1.5.7. Codificador/Decodificador

La codificación es una técnica de procesamiento de la señal para mejorar la comunicación mediante la introducción de redundancia en la representación de la información, de tal forma que se puedan soportar problemas del canal de transmisión como el ruido y la interferencia.

Un codificador toma una trama de información de k símbolos en la entrada y calcula la correspondiente trama de salida, conteniendo un gran número de símbolos n . La relación entrada a salida de símbolos, k/n , se conoce como tasa de código (r). Algunos de los códigos más utilizados en comunicaciones satelitales son [28, 11]:

- Códigos convolucionales: Incorporan memoria de las tramas de información previas y las utiliza, junto con la información actual, para determinar la trama de salida. Su tasa de código es $r=1/2$ e implementa el algoritmo de Viterbi. Este método modela el codificador como una

⁸Posee valores que son descritos en tablas.

máquina de estados finitos, los estados son los contenedores de memoria. La secuencia entrante es comparada, trama por trama, con cada posible secuencia de código. La codificación convolucional ofrece una elevada ganancia en la corrección de errores.

- Turbo-códigos: Se basan en la concatenación paralela de dos codificadores, iguales o diferentes, separados por un dispersor (técnica consistente en organizar la información digital de forma no contigua para mejorar el sistema). El dispersor es pseudo-aleatorio, mueve los bits de una posición a otra posición de acuerdo a una regla que es generada aleatoriamente. La tasa general de un turbo código formado por la concatenación en paralelo de dos tasas de $1/2$ es $r = 1/3$. Los turbo-códigos mejoran aún más la probabilidad de bit en error.
- FEC (Forward Error Correction): Este código recupera la información original directamente de los datos recibidos al añadir redundancia. Las tasas de códigos más comunes para codificación FEC son de $1/2$, $3/4$ y $7/8$. La codificación FEC es muy útil en sistemas de transmisión de datos porque permite corregir los errores sin que sea necesario que la estación transmisora vuelva a enviar la información hacia la receptora.

