

TEMA 8

Introducción a los Sistemas y Aplicaciones en frecuencias de Microondas

El objetivo de este último capítulo es la descripción de los Sistemas más conocidos en el rango de las frecuencias de uW, basados en los bloques estudiados en los temas previos. Como tales Sistemas tienen todo un aspecto de Gestión de la Aplicación (Software) y de Gestión de la Alimentación que es común a cualquier sistema electrónico/mecánico. Desde este punto de vista este capítulo sería una introducción a especializaciones posteriores en sectores que involucran todos los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera.

8.1 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN Y APLICACIONES DIVERSAS

Los sistemas de comunicaciones que involucran frecuencias de Microondas se pueden subdividir en dos grandes grupos en base a su campo de aplicación, militar o civil. En general en ambos campos los equipos que se manejan son de tipo profesional y de alto costo, aunque estas características se refuerzan en el campo militar. Como ya se dijo en el Capítulo 1, el uso de las Microondas ha estado relacionado históricamente con el desarrollo de equipos de aplicación militar que con posterioridad se han transformado en aplicaciones civiles. Desde otro punto de vista, las inversiones a realizar han sido siempre muy fuertes y se han justificado bajo el paraguas del gasto militar.

Otra forma de subdividir los sistemas según el campo de aplicación sería hacerlo como Sistemas de Comunicación y Aplicaciones Diversas. En los primeros estarían, entre otros, los:

- ⇒ Radioenlaces fijos: forman parte de la estructura de comunicaciones de las grandes operadoras.
- ⇒ Telecomunicaciones por Satélite: pueden ser parte de las grandes estructuras de comunicación a nivel planetario (telefonía, Internet,..), o dar soporte a servicios de Radiodifusión de Radio y TV (Digital +, DirectTv,....).
- ⇒ VSAT: Very Small Aperture Terminal son sistemas de acceso remoto con aplicación en Tele-educación, Tele-medida, etc.
- ⇒ LMDS: Local Multipoint Distribution Service, planteado como sustituto del cable en la “última milla” en las redes de CATV.

Observamos que todas las aplicaciones citadas son no guiadas, inalámbricas o Wireless en su término inglés. La razón de ello está en que las aplicaciones guiadas son poco prácticas debido a la alta atenuación que se produce en estas frecuencias y que la misma es, además, proporcional a la distancia cubierta. Sin embargo en la propagación vía radio la atenuación crece en función del logaritmo de la distancia, con lo que en distancias largas la ventaja es evidente (ver Tema 10 de Sistemas de Transmisión de 3º).

En los segundos,

- ⇒ Radiometría: medida pasiva de la Temperatura de Ruido emitido por un cuerpo, y que tiene innumerables aplicaciones, desde la cartografía planetaria hasta la medición de la radiación de fondo del espacio.
- ⇒ Radar: Radio Detection and Ranging, sistema muy utilizado sobretodo en aplicaciones militares, pero con importantes funciones en la aviación civil, y curiosidades como el control de velocidad de vehículos.
- ⇒ Diagnóstico y Terapia médica, con el empleo de Rayos X como ejemplo más usual en los que destacan el uso de las radiaciones en diagnóstico de tumores.
- ⇒ El microondas (horno) con amplia utilización en el entorno doméstico.

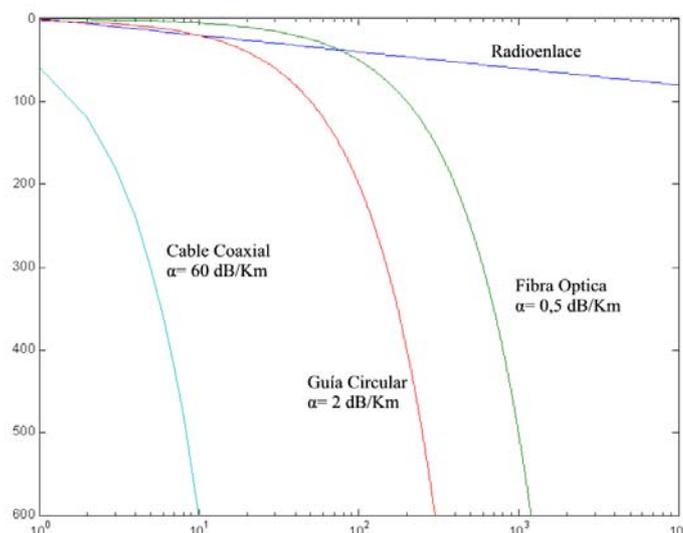
Todos estos sistemas tienen en común bloques básicos que hemos estudiado a lo largo de los capítulos anteriores y que conforman bloques superiores: transmisores, receptores, y antenas. Estas últimas han sido objeto de la asignatura Antenas y Propagación en el 1er semestre, con lo que se da por sabido todo lo concerniente a ellas.

En cuanto a transmisores y receptores, se basan en bloques básicos como osciladores, mezcladores, desfasadores, amplificadores, etc. que ya hemos estudiado y que implementaremos en la asignatura Laboratorio del curso siguiente. Por tanto, con ese bagaje se va a describir, con el detalle permitido por lo limitado del tiempo, varios de los sistemas que funcionan en estas frecuencias.

8.2 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN EN MICROONDAS

Todos los Sistemas de Comunicación universales tienen sus atribuciones de frecuencia establecidas en el marco de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. En España esta atribución está reglamentada bajo el CNAF (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias) dependiente del Ministerio de Ciencia y Tecnología, <http://www.mityc.es/Telecomunicaciones/Secciones/Espectro/cnaf/>

Estos sistemas son mayoritariamente inalámbricos debido a las fuertes atenuaciones que sufre la propagación guiada en estas frecuencias y con dimensiones que signifiquen distancias planetarias. Ilustrativo de ello es la siguiente gráfica en la que se observa la superioridad de los enlaces radio sobre los enlaces guiados en cuanto la distancia supera los 100Km.



Gráfica basada en la Figura 12.5 de la ref. [8.1]

Así podemos afirmar que los enlaces radio y los guiados en fibra óptica suponen el grueso de todos los Sistemas en frecuencias de Microondas o superiores. Veamos algunos Sistemas típicos habituales en estas frecuencias.

8.2.1 Radioenlaces

De los sistemas de microondas quizá los más visibles suelen ser los enlaces punto a punto de las grandes torres de telecomunicación de las operadoras telefónicas, que cumplen la función de enlaces inalámbricos (vía radio), con canales de información de anchuras de banda (BW = bandwidth) mínimas comparando con las frecuencias portadoras.

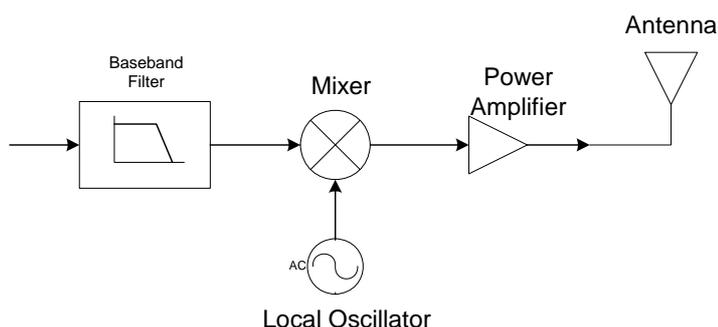
En la siguiente tabla constan diferentes valores típicos:

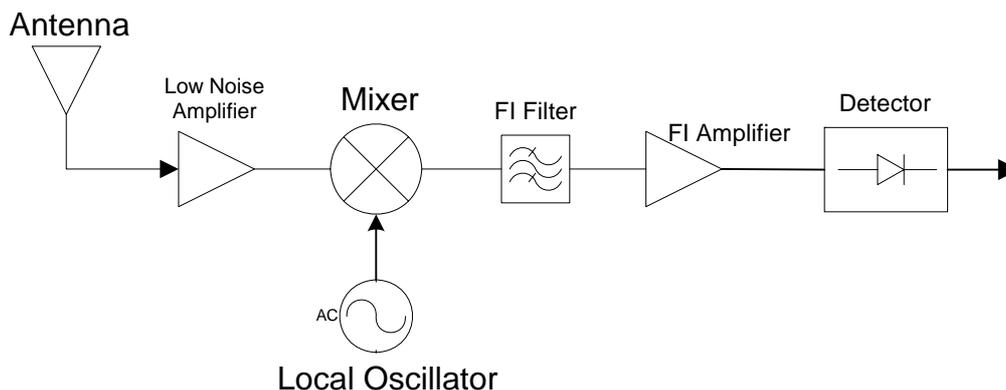
Tipo	BW	Portadora	BW 10%	Ratio
Voz analógica	4KHz	4GHz	400MHz	100000
Voz digital	64KHz	4GHz	400MHz	6250
Datos	50KHz-1,5MHz	4GHz	400MHz	266
Televisión	6-8MHz	4GHz	400MHz	66

Las altas frecuencias portadoras permiten transmitir un número altísimo de canales con un espectro utilizado relativamente bajo. Por ejemplo un sistema de comunicaciones funcionando en 4GHz, puede transportar hasta 100000 canales de voz ocupando un ancho de banda del 10%; ó 66 canales de TV analógica que se convierten en más de 200 si usamos canales digitales con el estándar MPEG-2. Por supuesto, para organizar todo este flujo de información debemos usar técnicas de modulación y de multiplexación, tanto en tiempo (TDMA), como en frecuencia (FDMA) que permitan la gestión dinámica del recurso espectro.

Este tipo de enlaces radio son esencialmente punto a punto y necesitan un camino de propagación libre de obstáculos (visibilidad transmisor-receptor) por usarse antenas tipo reflector parabólico que son muy directivas. Las fuertes atenuaciones que se producen debido a la atenuación $1/R^2$ y a fenómenos atmosféricos que las refuerzan, como la lluvia, hace que sean necesarios repetidores si queremos cubrir largas distancias. Son usuales distancias en el rango de 50Km.

Desde el punto de vista de sistemas, cualquiera de estos ejemplos se puede caracterizar como un conjunto básico de emisor – enlace – receptor, nada diferente de los que pueden funcionar en frecuencias más bajas. Tal y como hemos dejado claro a lo largo de la asignatura, lo específico puede estar en las herramientas de diseño y en las tecnologías usadas para implementar los bloques básicos.





La potencia recibida será, en lo que es conocido como la fórmula de Potencia transmitida de Friis:

$$P_r = P_t \frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi R)^2}$$

, siendo P_t la potencia transmitida, G_t y G_r la ganancia de la antena transmisora y receptora respectivamente, y R la distancia entre transmisor y receptor.

Este tipo de Radioenlaces también se están empezando a usar en redes locales y privadas para datos y voz, dado el cada vez mayor uso (y por tanto abaratamiento) de los componentes y de la mayor necesidad de espectro por parte de las empresas y administraciones. Como ejemplo, tenemos estos enlaces:

<http://www.dbbroadcast.com/>

<http://www.mier.es/esp/index.htm>

, o multitud más que podemos encontrar en la web bajo el epígrafe de Microwave Radio Links.

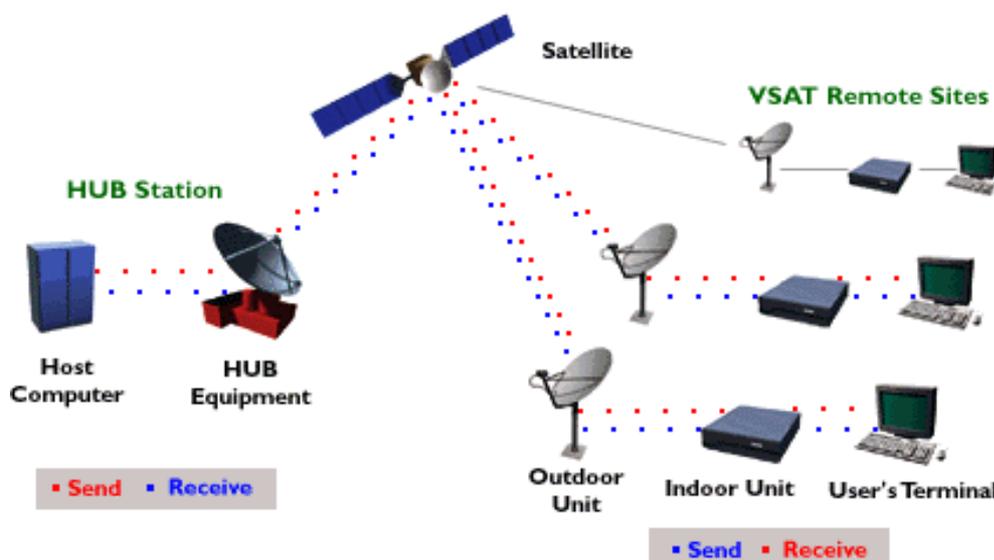
El ejemplo 12.3 del Pozar, ref. [8.1], es adecuado para ver con sencillez como se hacen los cálculos a la hora de diseñar un receptor típico de microondas, como el de la figura. Una referencia de mayor nivel es la [8.2], donde se estudia en profundidad todos los aspectos de la Transmisión vía Radio.

La alternativa a estos enlaces terrestres está en el empleo de los satélites como repetidores de comunicaciones entre estaciones terrenas lejanas. Esto está siendo ampliamente usado hoy en día con lo que el espacio que rodea la tierra esta plagado de satélites con las más diversas funciones, tal y como se vio en la asignatura de Sistemas de Transmisión.

A continuación veremos dos ejemplos de Sistemas que funcionan en frecuencias de Microondas, con cada vez más amplia implantación.

8.2.2 VSAT (Very Small Aperture Terminal)

La denominación se refiere a cualquier red de terminales fijos de comunicaciones a través de satélite que forma parte de un sistema, sea bi-direccional o unidireccional. El sistema usa el segmento espacial como enlace, aunque hay casos en los que el retorno se hace por la Red Conmutada tradicional (por razón de costes habitualmente). Las principales aplicaciones son la transmisión de datos a baja velocidad y bajo coste, en segmentos como las redes corporativas, telecomunicaciones rurales, educación a distancia, telemedicina, tele-medida, telegestión, etc.



Fuente: <http://www.uv.es/~montanan/redes/trabajos/RedVSAT.doc>

Al enlace HUB → Usuario, se le denomina Outbound.

Al enlace Usuario → HUB, Inbound.

Cualquiera de los dos consta de un *salto de satélite*, y de la suma de un Uplink o enlace Ascendente más un Downlink o enlace Descendente.

Podemos ver redes VSAT en empresas con oficinas en diferentes emplazamientos (p. ej. concesionarios oficiales de coches), en organismos públicos con amplia repercusión geográfica (sucursales de lotería, control de cuencas hidrográficas,...), etc. Siempre buscando una red privada rápida y segura de transmisión de datos y voz.

Los elementos básicos que componen una red VSAT, en su segmento espacial y en su segmento terrestre son:

- ⇒ Estación terrestre maestra (HUB): Sistema central que gestiona las comunicaciones entre las estaciones y las conexiones con otras redes. Se encarga de optimizar el acceso al satélite. También realiza tareas como estadísticas, configurar estaciones remotas, control e informe del tráfico cursado, mantenimiento, etc. Normalmente este tipo de tareas se encuentran centralizadas en otro sistema de gestión independiente denominado NMS (network management system).
- ⇒ Nodo de concentración de datos (Interfase Host) unido al HUB (Host Computer).
- ⇒ VSAT de Usuario: Consta de una Unidad Exterior y de un MODEM de interior, junto con el Terminal, normalmente un PC con una tarjeta dedicada.
- ⇒ Equipos embarcados en el satélite, que permiten su uso como encaminador de la señal VSAT. Normalmente sólo son convertidores de frecuencia y amplificadores, pero se contempla la tendencia futura que tengan capacidad de procesamiento en banda base embarcada, con lo que se abrirían múltiples posibilidades.

Como ejemplo de red VSAT podemos visitar la página del Instituto Cartográfico de Cataluña, en el que se describe con bastante detalle una red sísmica basada en este sistema:

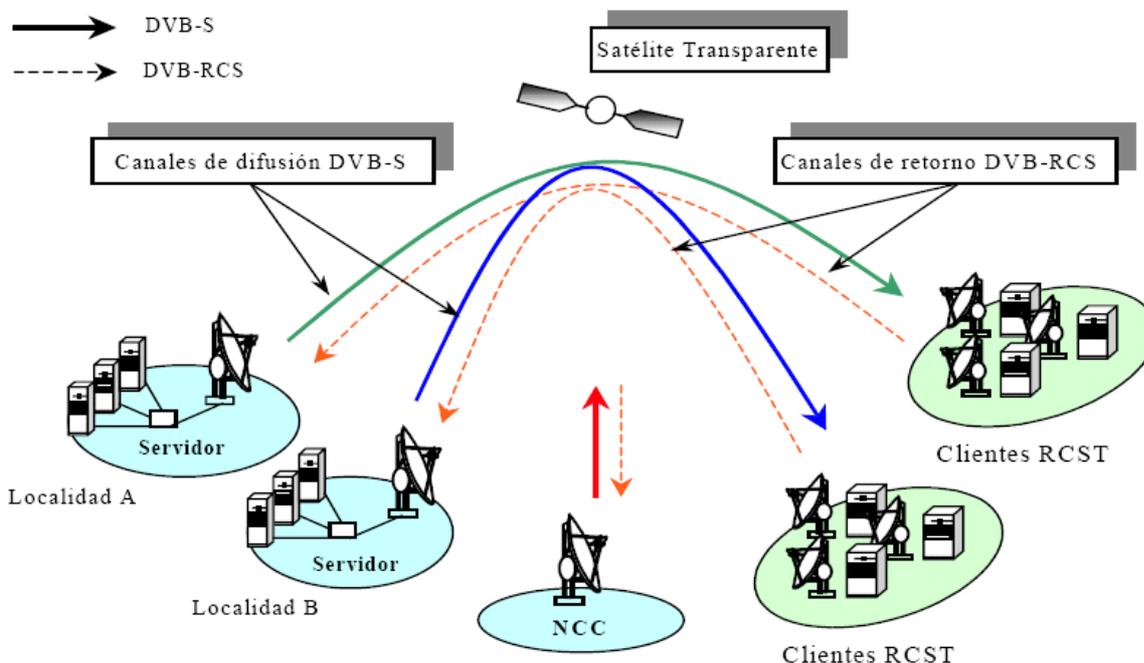
http://www.icc.es/web/gcontent/ca/sismologia/igc_sismologia_xsis.html

Normalmente las redes VSAT han sido de dos tipos, atendiendo a su topología:

ESTRELLA: es la de la figura anterior y en ella la comunicación es bidireccional, pero el enlace entre dos usuarios se hace con 2 saltos de satélite, es decir, que pasa a través del Hub.

MALLA: la figura sería similar pero la red tendría la capacidad de conectar dos usuarios con un único salto satélite.

Hoy en día este tipo de redes está evolucionando rápidamente a entornos tipo multiestrella, en los que la red en malla ha evolucionado a múltiples servidores o hubs que suministran la información desde lugares geográficos alejados, y además los usuarios deben comunicarse entre sí con retardos que hagan posible la comunicación en tiempo real; con lo que la red se transforma en algo así:



Fuente: Tesis Doctoral "CONTRIBUCION AL ESTUDIO DE LAS REDES VSAT MULTIESTRELLA" Autor: GUSTAVO XAVIER CHAFLA ALTAMIRANO. UPM 2002.

, y podemos calificarlo como una red VSAT Multiservicio y Multipunto.

Los sistemas se están basando en los estándares de difusión de TV digital basados en el organismo DVB: (DVB-S) para la difusión de datos en el descendente y DVB-RCS para la implementación de un canal de retorno. Este sistema permite anchos de banda mayores que en los sistemas clásicos y así da soporte a Internet de alta velocidad, voz y vídeo.

Todo esto no es más que un somero repaso a lo que es uno de los soportes físicos que está contribuyendo a extender la Red por todo el mundo, pero a nosotros desde el punto de vista de la asignatura de Microondas, y dejando aparte los equipos embarcados en el satélite, nos interesa diseccionar dos equipos que trabajan en estas frecuencias: son las Unidades Externas tanto de usuario como en el HUB. Estos equipos son diferentes según sea la implementación del canal de retorno:

Retorno por satélite: TRANSCEIVER o Transceptor

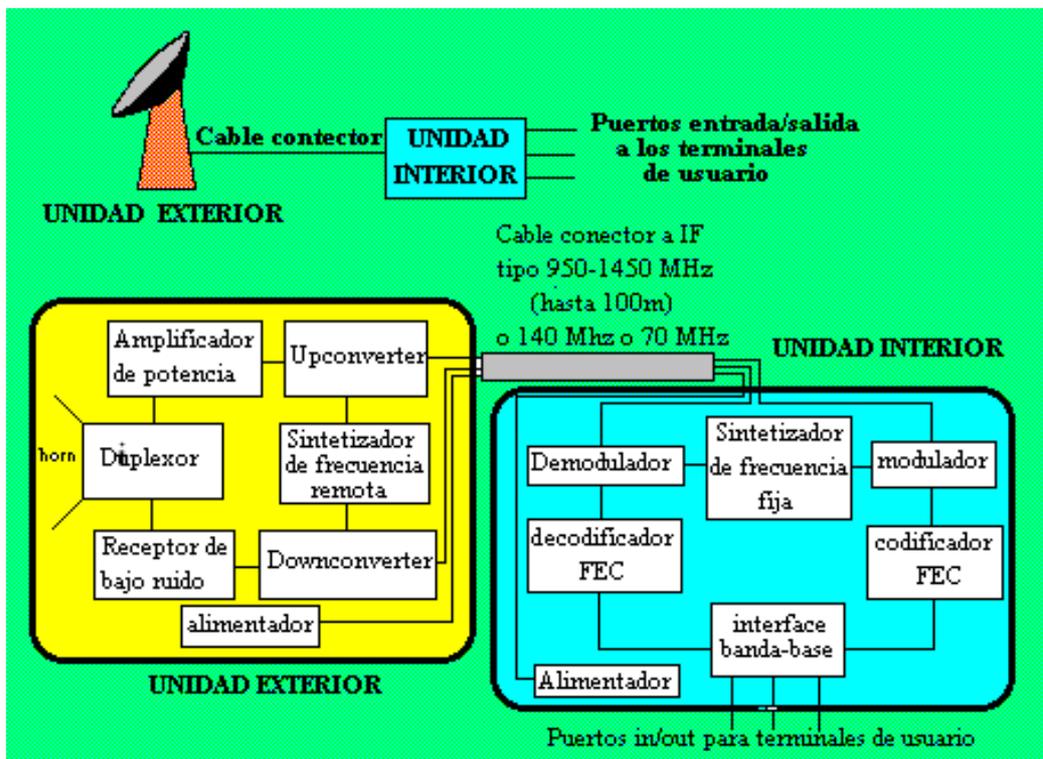
Retorno por red telefónica: Transmisor en HUB y LNB (Low Noise Block) en Usuario.

Vamos a analizar con más detalle estos dos componentes de la red.

8.2.2.1 Transceiver de usuario VSAT

El nombre inglés de Transceiver equivaldría a un Transmisor-Receptor, cuyo diagrama de bloques genérico aparece a continuación, con un elemento clave para su buen funcionamiento,

que es el Diplexor. Este permite trabajar con una única antena en recepción y transmisión, soportando el filtrado y el aislamiento entre bandas de frecuencia separadas.



Fuente: <http://mipagina.cantv.net/dolmary/Pagina/Trabajo1.htm>

Las bandas más utilizadas en este tipo de redes son la C (6 GHz/Ascendente- 4 GHz/Descendente) y la Ku (14GHz/A- 12GHz/D o 11GHz/D) en sistemas actuales y la Ka (30 GHz/A - 20 GHz/D) como banda a utilizar en el futuro.

Ventajas y desventajas de cada una de estas bandas:

	Ventajas	Desventajas
Banda C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Disponibilidad mundial ▪ Tecnología más barata ▪ Robustez contra atenuación por lluvia 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Antenas grandes (1 a 3 metros) ▪ Susceptible de recibir y causar interferencias de satélites adyacentes y sistemas terrestres que compartan la misma banda (Se necesitaría en algunos casos recurrir a técnicas de espectro ensanchado y CDMA).

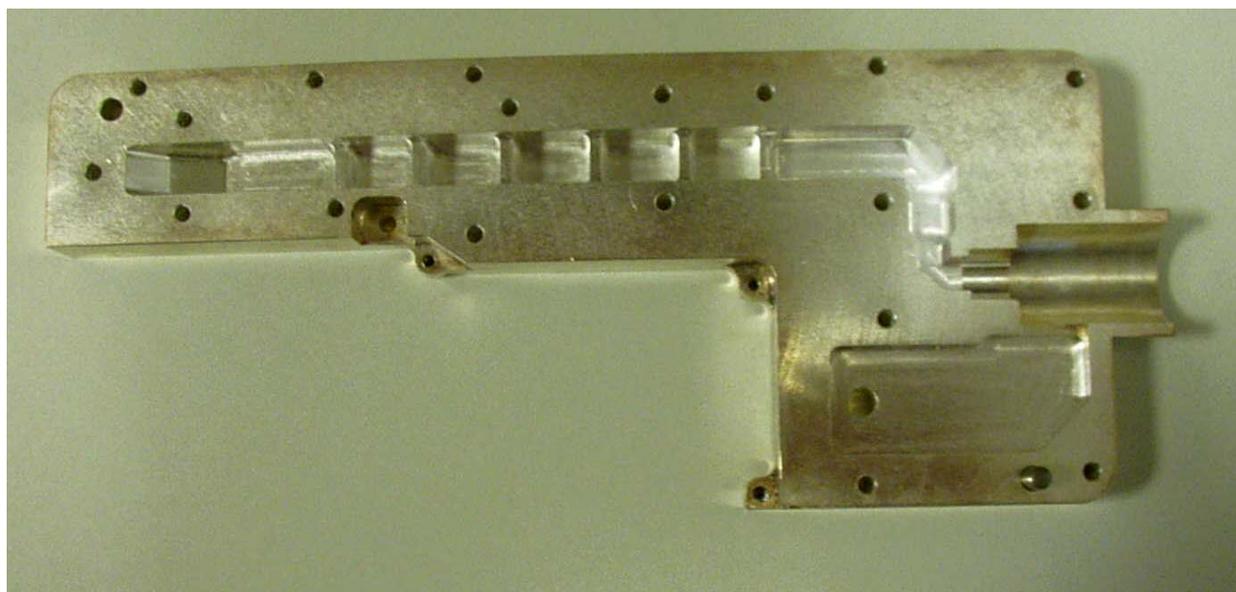
<p>Banda Ku</p>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Uso más eficiente de las capacidades del satélite ▪ Menos influenciado por las interferencias, ▪ Antenas y equipos más pequeños (0.6 a 1.8m) 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Hay regiones donde no esta disponible. ▪ Más sensible a las atenuaciones por lluvia. ▪ Tecnología más cara.
-----------------	--	---

En Europa la banda más utilizada es la Ku, mientras en América el uso de la banda C está muy extendido. Pasemos a los bloques.

Diplexor

Ya hemos dicho que el diplexor es un elemento clave: es la entrada del sistema para el enlace descendente, por tanto debe tener bajas pérdidas si la Figura de Ruido ha de ser baja, y es la salida para el enlace ascendente y también debe tener bajas pérdidas puesto que significan pérdidas de potencia emitida. Por tanto este filtro exigirá el uso de técnicas y tecnologías de alta precisión, dadas las frecuencias en las que estamos trabajando, y aquí cada dB vale su peso en oro, al incidir directamente en el costo del equipo de usuario, que debería ser lo más bajo posible.

Como ejemplo presentamos este diplexor (abierto) válido para la banda de 10,95 a 12,75GHz en Recepción y 14 a 14,5GHz en transmisión. La guía circular es la salida a la antena, que es común para el receptor y el emisor. Este estaría situado debajo del diplexor y accedería a la cavidad inferior derecha a través de una sonda coaxial. A través de una ventana radiante la señal de potencia se acopla a la antena. Podemos ver debajo el circuito transmisor.

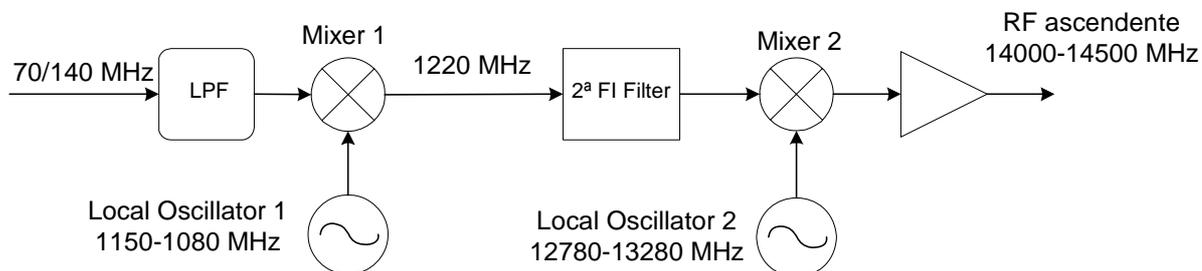


Fuente: el transceiver de VSAT VSA-111, producto descatalogado de la empresa guipuzcoana IKUSI.

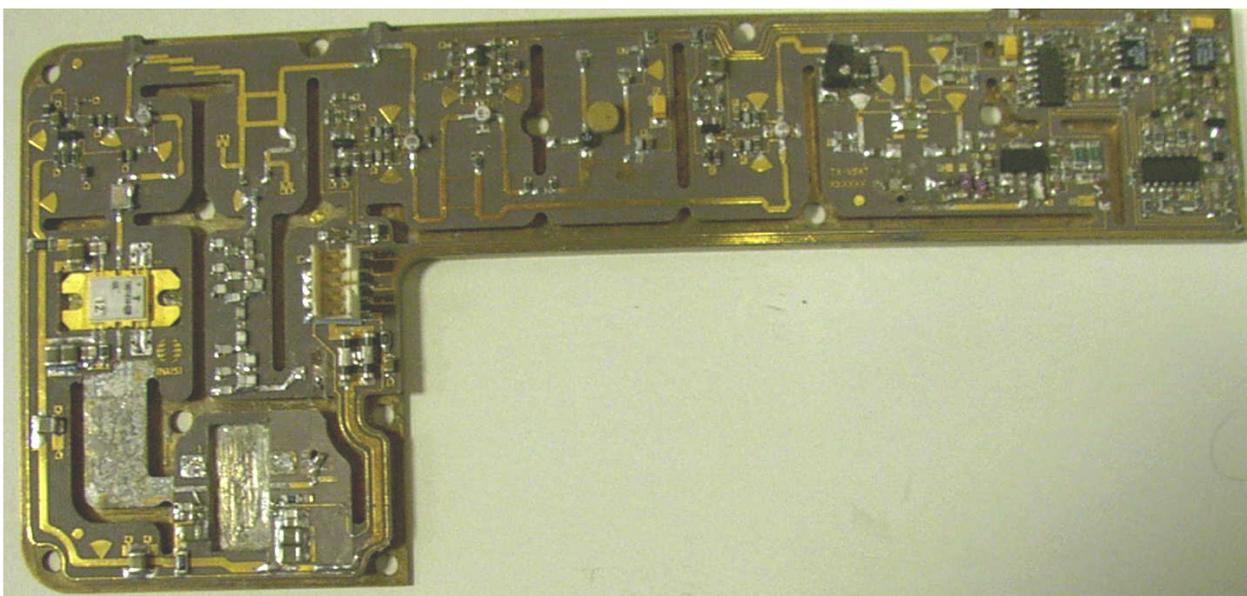
La parte de recepción se filtra a través del filtro de cavidades acopladas que discurre por la parte superior del diplexor. Vemos que tiene suficientes celdas para conseguir el rechazo necesario a la banda de transmisión y que la potencia de ruido generada por éste no afecte a la recepción de señales del orden de -90dBm.

Conversores

Un ejemplo típico de diagrama de bloques de los conversores y las frecuencias usadas en el transceiver de usuario,



Lo primero a destacar es la existencia de una doble conversión. ¿Por qué? Caso de hacerlo en una, tendríamos que poner el oscilador en 13930MHz (caso peor) y filtrarlo a la salida del mezclador para no saturar al amplificador de salida. Pero un filtro de ese calibre, con 60dB de rechazo en 70MHz, es claramente irrealizable en estas frecuencias.



Fuente: el transceiver de VSAT VSA-111, producto descatálogo de la empresa guipuzcoana IKUSI.

En la foto anterior podemos ver un ejemplo del circuito transmisor, con partes bien claras distinguibles: los transistores de potencia, aunque falta uno de ellos; y el filtro entre etapas; los previos son el oscilador con resonador cerámico, los híbridos de 3dB para acoplar señal y oscilador al mezclador, etc.

En la página siguiente se presentan las características completas de un transceiver VSAT que utiliza el diagrama anterior, fabricado por la empresa ACORDE s.a. <http://www.acorde.biz/>

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El ACSAT-KU10 es un transceptor de RF integrado, diseñado para sistemas de comunicaciones bidireccionales por satélite en banda KU desarrollado por ACORDE. El terminal posee una frecuencia intermedia de 70/140 MHz y las frecuencias de transmisión y recepción pueden ser Banda KU estándar ó Banda KU extendida. Este equipo cumple la norma MIL-STD-810E.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Especificaciones del Receptor

1.1 Características de la entrada de RF

- Frecuencia:	10.95 – 12.75 GHz
- Niveles de entrada:	De -90 a -30 dBm
- Pérdidas de retorno:	>16 dB
- Impedancia de entrada:	50 Ω

1.2 Características de salida de IF

- Frecuencia:	70 MHz / 140 MHz
- Pérdidas de retorno:	> 16 dB
- Impedancia de salida:	50 Ω
- Punto de compresión 1 dB:	> 10 dBm
- Punto de intercepción de tercer orden:	> 23 dBm
- Relación portadora a intermodulación:	> 60 dB, para dos tonos, $\Delta f = 5$ MHz, Pout=-10dBm, (SCL=-13dBm)
- Nivel relativo de espurios dependientes de la portadora:	< -60 dBc, para Pout=-10dBm
- Nivel absoluto de espurios independientes de la portadora:	< -55 dBm

1.3 Especificaciones generales

- Ganancia total del convertor:	33 \pm 1 dB
- Variación de ganancia en 36 MHz:	1 dB
- Estabilidad de ganancia:	\pm 1 dB en 24 horas
- Ajuste de ganancia:	20 dB de rango total, pasos de 0.5 dB
- Rizado máximo en el BW de RF (500 MHz):	\pm 1.5 dB
- Rizado máximo en el BW de IF (40 MHz):	\pm 0.75 dB
- Rechazo de banda imagen:	> 60 dB
- Figura de ruido del convertor:	< 16 dB

Especificaciones del Transmisor

2.1 Características de la entrada de IF

- Frecuencia:	70 MHz / 140 MHz
- Niveles de entrada:	De -50 a -10 dBm
- Pérdidas de retorno:	>16 dB
- Impedancia de entrada:	50 Ω

2.2 Características de salida de RF

- Frecuencia:	Banda Ku extendida \rightarrow 13.75 – 14.5 GHz Banda Ku standard \rightarrow 14.0 – 14.5 GHz
- Pérdidas de retorno:	> 16 dB
- Impedancia de salida:	50 Ω
- Punto de compresión de 1 dB:	> 40 dBm
- Relación portadora a intermodulación:	> 33 dBc, para dos tonos, $\Delta f = 5$ MHz, Pout =33 dBm, (SCL=30 dBm)
- Nivel relativo de espurios dependientes de la portadora:	< -60 dBc, para Pout = 33 dBm
- Nivel absoluto de espurios independientes de la portadora:	< -50 dBc, para Pout=40 dBm < -55 dBc, para Pout=40 dBm

2.3 Especificaciones generales

- Ganancia total del conversor:	60 ± 1 dB
- Variación de ganancia en 36 MHz:	1 dB
- Estabilidad de ganancia:	± 1 dB en 24 horas
- Ajuste de ganancia:	20 dB de rango total, pasos de 0.5 dB
- Rizado máximo en el BW de RF (500 MHz):	± 1.5 dB
- Rizado máximo en el BW de IF (40 MHz):	± 0.75 dB

Especificaciones Generales

- Conectores RF:	Tipo N(F)
- Conector de salida del TX	Tipo N(F), Opcional WR-75
- Alimentación 220/125 VAC:	Militar Ref.: 85102E12-3P50
- Monitorización y control (RS-232 o RS-485):	Militar Ref.: 85102E14-19S50
- Alimentación LNA (12 Vdc):	Militar Ref.: 85102E8-4S50
- Ruido de fase:	< -32 dBc/Hz a 10 Hz < -62 dBc/Hz a 100 Hz < -72 dBc/Hz a 1 KHz < -82 dBc/Hz a 10 KHz < -92 dBc/Hz a 100 KHz < -92 dBc/Hz a 1 MHz
- Paso frecuencial:	1.0 MHz
- Estabilidad en frecuencia:	± 1x10 ⁻⁹ /día ± 1x10 ⁻⁷ /año ± 1x10 ⁻⁸ ppm/temperatura
- Temperatura de funcionamiento:	-20°C a +50°C
- Temperatura de almacenamiento:	-40°C a +85°C
- Humedad relativa:	0 al 100%

Alimentación

- Rango Universal, 100v a 240v.
- 47 a 63 Hz
- Corriente típica a 110VAC es 3 A, y a 220VAC es 2 A

Dimensiones físicas

- Longitud:	250 mm
- Anchura:	200 mm
- Altura:	250 mm
- Peso:	18 Kg.

Interesa analizar en profundidad los datos para comprobar que **todos ellos** son parte de la definición del producto, incluidos todos los aspectos mecánicos y de materiales, relacionados con las Normas bajo las que tiene que funcionar el equipo.

Una vez conocidos los datos del equipo, podemos llevar a cabo lo que es primordial en el diseño de un Sistema de comunicación VSAT, el Cálculo de Enlace. Veamos el siguiente ejemplo.

Ejemplo de Cálculos de enlace en VSAT para el satélite HISPASAT

<p>ESTACION Transmisora Inbound</p> <p>Localización: Barcelona</p> <p>Velocidad binaria: 64Kbps</p> <p>Diámetro: 1,8m</p> <p>Rendimiento: 0,6</p> <p>Frecuencia: 14GHz</p> <p>Potencia: 1,94W → 2,88dBW</p> <p>P_{postHPA} : 0,5dB</p> <p>BackOff: 0,5dB</p>	<p>ESTACION Receptora Inbound</p> <p>Localización: Madrid</p> <p>Diámetro: 2,4m</p> <p>Rendimiento: 0,72</p> <p>Frecuencia: 12GHz</p> <p>Potencia: 1,94W → 2,88dBW</p> <p>P_{postHPA} : 0,5dB</p> <p>BackOff: 0,5dB</p>
--	---

Con estos datos podemos calcular la C/N_o del **enlace ascendente** Barcelona → satélite en la entrada del satélite,

$$C/N_o = PIRE - At - At_{atm} - P_{desap} + (G/T)_{sat} - 10 \log K$$

$$At = \text{Atenuación en el espacio libre} = 92,45 + 20 \log f (GHz) + 20 \log d (Km) = 207,1dB$$

$$\text{Con } 20 \log d = 91,07 \text{ (punto subsatélite)} + 0,65 \text{ (32° de elevación)} = 91,72$$

$$At_{atm} = \text{Atenuación debida a la atmósfera} = 5,14dB \text{ (tablas para 14GHz y 99,5\%)}$$

$$P_{desap} = \text{Pérdidas desapuntamiento} = 0,38dB$$

Los términos que engloban la contribución del ruido N_o son el factor de mérito G/T, que incluye la temperatura equivalente total de ruido del receptor del satélite (T), y la constante de Boltzman que se desgaja del KTB:

$$N_o = N/BW = 10 \log K + 10 \log T \text{ (dBW/Hz)}$$

Con N = Potencia de ruido térmico

BW = Ancho de banda de ruido de la portadora

(G/T)_{sat} = 6,5dB/K, figura de mérito, datos del satélite

$$K = 1,38 * 10^{-23} \rightarrow 10 \log K = -228,6$$

PIRE de la estación transmisora en tierra: G_{ant} + P_{op} - P_{postHPA} - BackOff

$$G_{ant} = 10 \log \left[\left(\frac{\pi D}{\lambda} \right)^2 \rho / c^2 \right] \text{ dBi}$$

D (m) = diámetro de la antena

F (Hz) = frecuencia de transmisión

ρ = rendimiento

c (m/s) = velocidad de la luz

Back-Off = Cantidad que se resta del punto máximo de trabajo para minimizar la intermodulación en banda

$$\text{Ejecutando el cálculo } \rightarrow G_{ant} = 46,21dB \rightarrow PIRE = 46,21 + 2,88 - 0,5 - 0,5 = 48,1dBW$$

$$C/N_o = 48,1 - 207,1 - 5,14 - 0,38 + 6,5 - (-228,6) = \mathbf{70,59dB}$$

Vemos que el C/N es muy alto y que podríamos, quizá, emitir con menos potencia o en su caso, utilizar una antena de menor diámetro.

Respecto al **enlace descendente** (satélite → Madrid), en la entrada de la estación receptora:

$C/N_o = PIRE_{sat} - At - At_{atm} - P_{desap} + (G/T)_{rec} - 10\log K$, es análogo al ascendente pero con números diferentes debido al cambio de frecuencia a 12GHz y diferente antena.

$$PIRE_{sat} = 23\text{dBW}$$

$$At = \text{Atenuación en el espacio libre} = 92,45 + 20\log f(\text{GHz}) + 20\log d(\text{Km}) = 206\text{dB}$$

$$At_{atm} = 2,14\text{dB para el } 99,5\%$$

$$P_{desap} = 0,37\text{dB}$$

$$(G/T)_{rec} = G_{ant}(\text{dBi}) - T_{sist}(\text{dBK})$$

$$G_{ant} = 10\log\left[\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \rho / c^2\right] = 48,16\text{dBi}$$

$$T_{sist} = T_{ant} + T_{sysrec} = 260 + 43 + 200 = 503\text{K} \rightarrow 27\text{dBK}$$

$$\text{Redondeando } (G/T)_{rec} = 21\text{dB/K}$$

$$C/N_o = 23 - 206 - 2,14 - 0,37 + 21 + 228,6 = 64\text{dB}$$

Enlace Inbound total

Debo sumar los carrier to noise en unidades naturales y no en dB,

$$C/N_{ototal} = -10\log\left(\left(1/10^{7,059}\right) + \left(1/10^{6,4}\right)\right) = \mathbf{63\text{dB}}$$
 aproximando a entero

Como hablamos de un enlace digital a 64 Kbits por segundo, debemos traducir el C/N_o a E_b/N_o o Energía de Bit sobre Ruido y posteriormente a Bit Error Rate o B.E.R.; las fórmulas las podemos encontrar en [8.2].

$E_b/N_o = C/N_o + 10\log(1/R)$, siendo R la velocidad de transmisión → $E_b/N_o = 15\text{dB}$, que se traduce a B.E.R. a través de unas tablas o gráficas dependiendo del tipo de modulación utilizado.

En este caso, para modulación QPSK, con FEC 1/2, ponemos el objetivo de que:

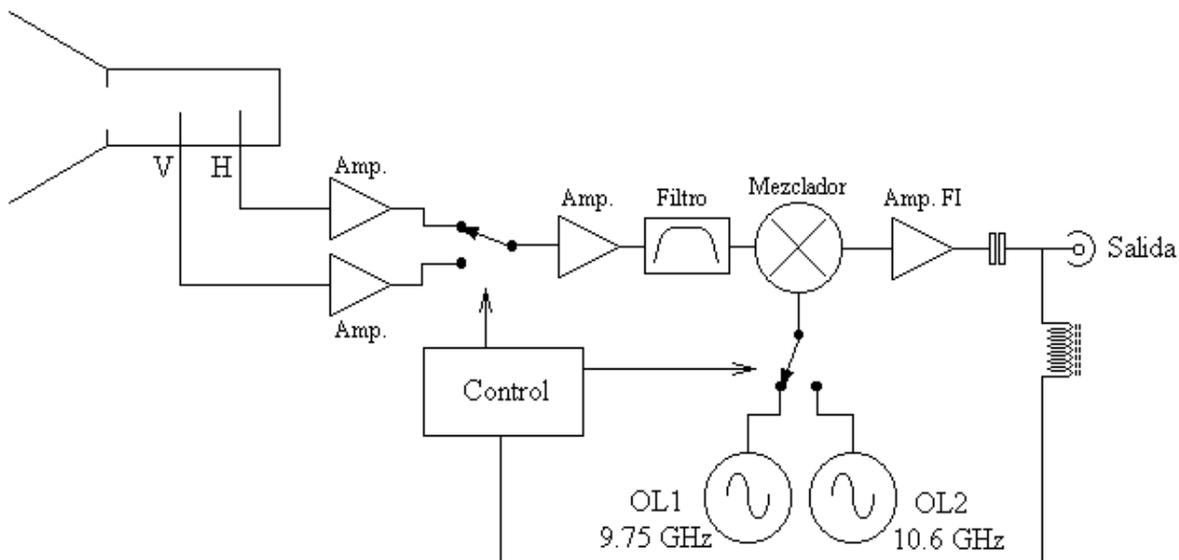
$BER < 1E-6$, 1 bit erróneo cada 1 millón transmitidos, lo cual da en la gráfica 5,6dB de E_b/N_o → añadimos 1dB por pérdidas de implementación en el módem y 0,7 por degradación en el demodulador → E_b/N_o objetivo de 7,3dB, por lo tanto el enlace completo me queda con,

MARGEN del Enlace VSAT usuario → HUB = 15 - 7,3 = 7,7dB, que es lo que debe servir para que el enlace se pueda degradar pero nunca interrumpir.

8.2.2.2 LNB de usuario

El Low Noise Block utilizado como down-converter en redes de VSAT es muy similar al que se utiliza en la recepción directa de TV vía satélite, como se da en las plataformas digitales actualmente existentes. Por tanto vemos el diagrama de bloques de este último, por ser más común a nivel de usuario y, probablemente, es el equipo más común y barato que podemos encontrar funcionando en el rango de 10 a 12GHz en banda Ku.

Fuente: la información a continuación se ha extraído de la página web <http://www.qsl.net/ea4eoz/lbn.html> (hoy en día desactivada) y se ha reproducido con permiso del propietario.



El diagrama corresponde a la llamada LNB Universal de recepción individual (ALPS™ en la foto), la más utilizada hoy en día en la recepción directa de TV vía satélite. En las fotos se ven varias realizaciones concretas,

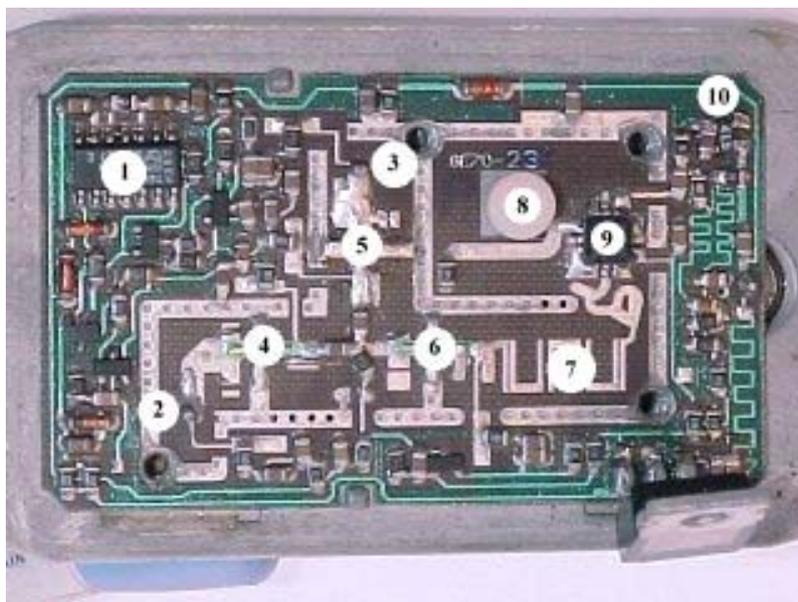


El LNB consta de una guía-onda circular, su entrada es un iluminador que recibe toda la energía RF concentrada en el foco de la parábola. Dentro de esta guía de onda, encontramos dos "antenas", que son las que van a recibir las señales en polarización horizontal y en

polarización vertical. Estas antenas van directamente a dos amplificadores, de cuyas salidas se selecciona la señal deseada, la cual se vuelve a amplificar antes de introducirla por un filtro paso banda. La señal, una vez filtrada, se mezcla con la señal generada por uno de los dos osciladores locales, y la resta de estas dos señales, se amplifica nuevamente. Esta es la salida del LNB.

Los LNB solo tienen un conector coaxial, por lo que la selección de la polarización a recibir y la selección del oscilador local se hacen, lógicamente, a través del mismo cable coaxial. La polarización se selecciona con la tensión de alimentación. Si alimentamos el LNB con 12 voltios, se selecciona la polarización vertical, mientras que si lo alimentamos con 18 voltios, se selecciona la horizontal. La polarización depende de como se coloque físicamente el LNB, respecto al plano del campo electromagnético recibido.

Para seleccionar el oscilador local, lo que se hace es inyectar (o modular) sobre la tensión de alimentación, una señal de poca amplitud (típicamente 0.7 voltios) a 22KHz. Cuando el LNB detecta esta señal, selecciona el segundo oscilador local (el de 10.6GHz), si no la detecta, selecciona el primero. Esta señal se suele producir cortocircuitando un diodo o dos diodos 1N4007 puestos en serie con la alimentación del LNB. El elemento que lo cortocircuita suele ser un transistor PNP alimentado con la señal de 22KHz.



1.- Es un integrado 74HC14, aunque en algunos otros LNB, sobre todo si son antiguos, nos encontramos un ICL7660, Se utiliza principalmente como convertidor de tensión, para obtener la tensión negativa necesaria para polarizar los transistores FET de RF. También suele ser parte del detector de tono de 22KHz en los LNB universales.

2 y 3.- Son las conexiones de las "antenas" en la guía de onda. Como se puede ver, están DIRECTAMENTE soldadas a las puertas de los FET, por lo que no es buena idea tocarlas con la mano ni con ningún otro objeto, ya que una descarga de estática se pueden cargar (y probablemente lo harán) estos delicados transistores.

4 y 5.- Los FET de entrada. Un porcentaje muy elevado de la cifra de ruido final del LNB recae en estos transistores. Desde el punto de vista de RF, son de lo mejorcito del LNB.

6.- Segundo amplificador. También es un FET. Este ya amplifica la señal de la polarización seleccionada. Si os fijáis en el circuito, no hay ningún conmutador entre las salidas de los FET 4 y 5 y la entrada de este. Lo que hace el circuito de control es alimentar o bien el 4 o bien el 5

Tema 8 – Introducción a los Sistemas y Aplicaciones en frecuencias de Microondas

según la tensión de alimentación. Supongo que lo hacen así porque introducir aquí diodos PIN o similares, aparte del espacio que ocuparían, degradarían gravemente la cifra de ruido del LNB.

7.- Este es el filtro pasa banda. La mayoría de las modificaciones que encontramos para estos LNB, actúan en este punto.

8.- El DRO. Es una pieza de cerámica con propiedades muy curiosas que permiten realizar osciladores bastante estables en microondas. Parecido al cristal de cuarzo, pero no presenta tanta estabilidad. También es un punto clave en las modificaciones de LNB.

9.- Mezclador - Oscilador. En los LNB más modernos, nos encontramos con este integrado, que hace las funciones de oscilador junto con el DRO, y de mezclador de RF. En LNB más antiguos, nos encontramos estas dos funciones bien diferenciadas, teniendo un FET para el oscilador, y estando el mezclador constituido por un par de diodos.

10.- Amplificador de FI, constituido por un solo transistor en este caso.

8.2.3 MMDS, LMDS, MWS

Estos acrónimos pertenecen a un mismo grupo de aplicación que sería englobado por los Sistemas de Acceso Inalámbrico de Banda Ancha (acceso al usuario, se entiende). Se trata pues de distribuir señal multimedia en estructuras punto → multipunto, aunque las arquitecturas pueden ser de lo más variadas, dependiendo sobretodo de la aplicación concreta y del entorno. Normalmente la estructura es celular, en base a celdas con reutilización de frecuencias y discriminación por polarización.

8.2.3.1 MMDS

MMDS: Multichannel Multipoint Distribution System. Muy utilizado en EEUU para distribuir señal de TV en la última milla de las redes de CATV actuales, aún mayoritariamente analógicas. Las frecuencias típicas de utilización son en el rango de 2 a 3GHz., concretamente de 2,150MHz - 2,162MHz y 2,500MHz - 2,686MHz, aunque esta asignación puede variar de unos países a otros. De hecho el CNAF no contempla atribución de frecuencias para este tipo de instalaciones y no hay, a día de hoy, licencias de explotación concedidas para estos sistemas.

En la actualidad, la mayor parte de las licencias en la banda MMDS están dedicadas a la transmisión de señales de televisión analógicas, aunque existen excepciones. Es por esta razón que este servicio ha venido denominándose también cable inalámbrico.

Muchos observadores atribuyen la escasa penetración relativa de los sistemas MMDS al hecho de que los 186MHz de ancho de banda disponibles no permiten transmitir más de 25 o 30 canales analógicos, frente a los 80 canales analógicos disponibles en el cable y a los 150 canales de los sistemas digitales por satélite DTH (Direct To Home), por lo que no puede haber competencia respecto al tipo de servicio ofrecido. Por ello, los sistemas MMDS han tenido más éxito comercial en zonas rurales o zonas de baja densidad de abonados, donde la inversión necesaria para la distribución por cable no se justifica.

No es un sistema con mucho futuro, pues se está viendo sobrepasado por los sistemas de mayor capacidad como el LMDS, que tratamos a continuación. No son exactamente iguales, pero puestos a explicar con detalle, nos decantamos por este.

8.2.3.2 LMDS.

Toda la información a continuación, se ha extraído de los documentos públicos y de datos de catálogo de los fabricantes. Cabe remarcar, no obstante que el nombre de Celeria® utilizado en el proyecto pertenece ya a otra firma.

Bajo estas siglas, se desarrollan diferentes aplicaciones en varias zonas del espectro: 3,5GHz, 28GHz, 40GHz,... Nos centraremos en el caso de España, que por diferentes razones, se ha convertido en un referente en estos sistemas, por lo menos a nivel de legislación, concediéndose licencias de uso de dos bandas; la de 3,5 bajo la utilización del CNAF.

UN - 107

Banda de frecuencias 3400-3600MHz.

La banda de frecuencias de 3.400 a 3.600MHz, con excepción de las subbandas que se indican más adelante, está destinada para el establecimiento de sistemas de acceso radioeléctrico mediante enlaces punto a multipunto en todo el territorio nacional.....

En esta banda hay operadores que dan telefonía y acceso rápido de Internet.

Y también tenemos la banda de 28GHZ bajo la utilización:

UN - 79

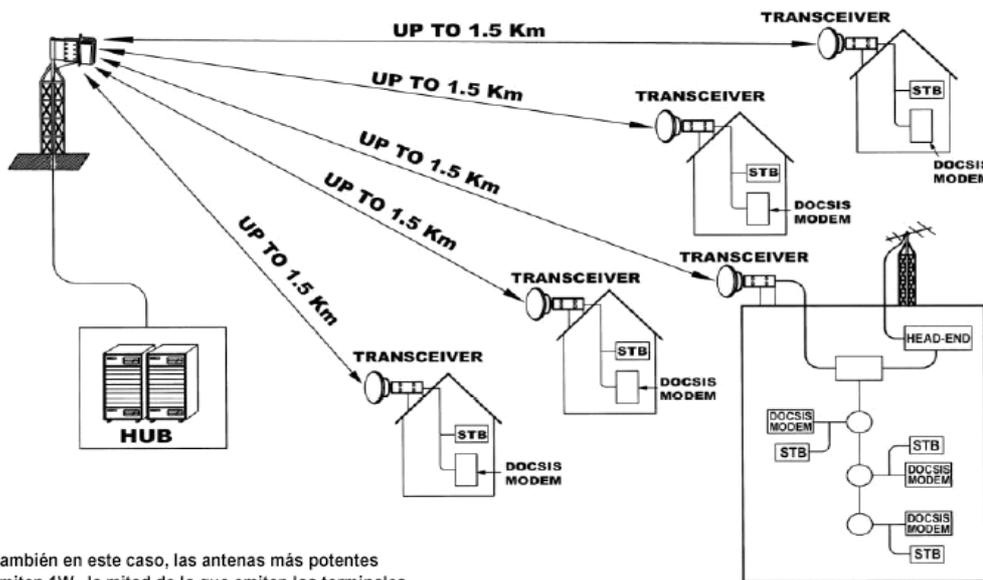
.....

Dentro de estos bloques, en las bandas 28332,5-28444,5MHz y 29340,5-29452,5MHz podrán otorgarse concesiones para sistemas de acceso radio (LMDS), tipo punto a punto y punto multipunto en determinadas localizaciones y en función de las necesidades...

Este el texto que atribuye, como se ve de forma bastante excepcional, el uso de la banda de 28/29GHz para la aplicación LMDS (Local Multipoint Distribution System). Bajo estas siglas podemos encuadrar el caso concreto que vamos a describir, llevado a cabo en el País Vasco con la colaboración de la UPM, el operador Euskaltel™ y la empresa Ikusi™, durante los años 2001 y 2002.

Es una aplicación puntera de extensión inalámbrica de la red de CATV de este operador, para llegar al usuario final sin necesidad de hacer obra civil para introducir canalizaciones, y que está funcionando en la localidad de Derio. Esta red suministra servicios de Televisión. Los servicios que se quieren ofrecer son los siguientes: difusión de 10 transpondedores digitales en 64QAM con 60 programas de TV, Internet a Alta Velocidad, Servicios bidireccionales de Tele-Educación, Servicios de asistencias al ciudadano, Comercio electrónico, etc.

Toda la información a continuación, se ha extraído de los documentos públicos y de datos de catálogo de los fabricantes. Cabe remarcar, no obstante que el nombre de Celeria® utilizado en el proyecto pertenece ya a otra firma.

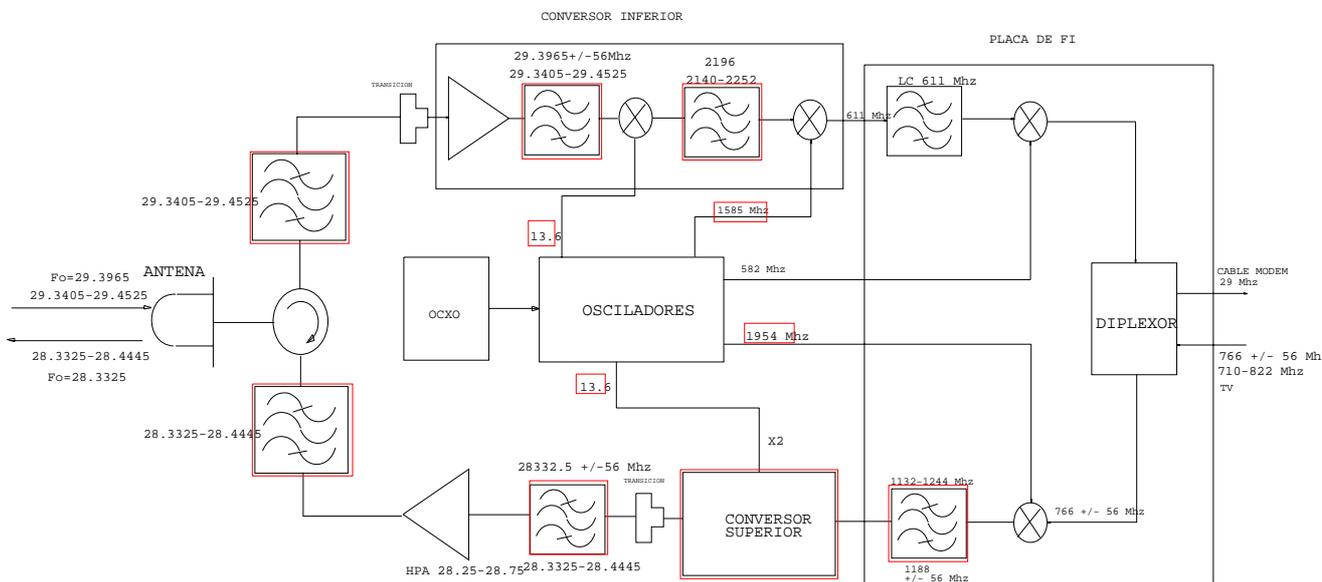


También en este caso, las antenas más potentes emiten 1W, la mitad de lo que emiten los terminales de GSM, y las de las viviendas 100 mW, al igual que las del proyecto EPPER

Preparado: Tecnología
Nº Doc.:

PAG.: 13 26/07/2002

BTE



La BTE es el transmisor/receptor (transceptor o transceiver) que va conectado a la red CATV a través de un nodo óptico, que se encarga de pasar las señales ópticas a señales electrónicas y viceversa. Las características principales serían:

BTE - BASE TRANSCEIVER EQUIPMENT

ESPECIFICACIONES TECNICAS

TRANSMISOR

Frecuencia de entrada	MHz	710 ÷ 822
Nivel de entrada	dBm	-10
Frecuencia de salida	GHz	28332,5 – 28444,5
Potencia de salida (1dB compresión)	dBm	30
Ruido de fase	dBc/Hz @ 10KHz	85
Estabilidad de frecuencia	ppm	± 2
Espúreos	dBm	≤ -30
VSWR en la entrada		1,5 : 1
VSWR en la salida		2 : 1
Retardo de grupo	ns en 8 MHz	≤ 15

RECEPTOR

Frecuencia de salida	MHz	26 ÷ 32
Nivel de salida	dBm	-34
Frecuencia de entrada	GHz	29340,5 ÷ 29452,5
Potencia máxima de entrada	dBm	-26
Figura de ruido	dB	6
Ruido de fase	dBc/Hz @ 10KHz	85
Estabilidad de frecuencia	ppm	± 2
VSWR en la salida		1,5 : 1
VSWR en la entrada		2 : 1
Retardo de grupo	ns en 8 MHz	≤ 15

GENERALES

Alimentación	V	15 ÷ 24
Consumo	W	30
Conéctica		F
Temperatura de funcionamiento	°C	(-20 ÷ 55)
Dimensiones	mm	TBC

Para completar el sistema tenemos el equipo llamado CPE o Customer Premise Equipment que sería el equipo de usuario o en este caso del colectivo de usuarios, que compartirían su capacidad para usar el canal de retorno hacia la cabecera. Las características de este equipo son:

CPE - CUSTOMER PREMISES EQUIPMENT

ESPECIFICACIONES TECNICAS		
TRANSMISOR		
Frecuencia de entrada	MHz	26 ÷ 32
Nivel de entrada	dBm	-10
Frecuencia de salida	GHz	29340,5 – 29452,5
Potencia de salida (1 dB compresión)	dBm	20
Ruido de fase	dBc/Hz @ 10KHz	85
Estabilidad de frecuencia	ppm	± 2
Espúreos	dBm	≤ -30
VSWR en la entrada		1,5 : 1
VSWR en la salida		2 : 1
Retardo de grupo	ns en 8 MHz	≤ 15
RECEPTOR		
Frecuencia de salida	MHz	710 ÷ 822
Nivel de salida	dBm	-34
Frecuencia de entrada	GHz	28332,5 ÷ 28444,4 ⁽¹⁾
Potencia máxima de entrada	dBm	-26
Figura de ruido	dB	5
Ruido de fase	dBc/Hz @ 10KHz	85
Estabilidad de frecuencia	ppm	± 2
VSWR en la salida		1,5 : 1
VSWR en la entrada		2 : 1
Retardo de grupo	ns en 8 MHz	≤ 15
GENERALES		
Alimentación	V	15 ÷ 24
Consumo	W	18
Conéctica		F
Temperatura de funcionamiento	°C	(-20 ÷ 55)
Dimensiones	mm	250 x 160 x 60

Hay que destacar la característica de Ruido de Fase de los osciladores, apropiada para trabajar con señales digitales tipo 64QAM, sin degradar la calidad de la señal de cabecera.

Como final de la descripción del sistema se adjunta el cálculo del enlace descendente HUB → Usuarios:

Euskaltel LMDS Downstream link budget for 28 GHz			
High gain 90° antenna, 1W SSPA, 10 downstream carriers			
Suscribers's 1ft dish antenna. Range 1,6 Km			
Frequency	28,4		GHz
Transmitted power (P1dB=30dBm)		11	dBm/carrier
Diplexer loss		-1,5	dBm/carrier
Transmitter antenna peak gain	90° sector	21	dBi
Cell size	1,6		Km
Free space path loss	1,6	-125,598766	dB
Atmospheric loss (-0.4 dB/Km)	-0,4	-0,64	dB
Receiver antenna gain		33	dBi
Implementation loss		-2	dB
Receiver clear weather carrier level		-64,7387665	dBm/carrier
Receiver Noise Figure	5		dB
Receiver bandwidth/channel	8		MHz
Receiver Thermal Noise/channel		-99,9691001	dBm
Clear weather Carrier-to-Noise Ratio		35,2303337	dB
Receiver clear weather carrier level		-94,7387665	dBW/carrier
Receiver Thermal noise density		-199	dBW/Hz
Bit rate	41,22		MBPS
Eb, Energy/Bit		-170,889846	dBJoule
Clear weather Eb/No		28,1101537	dB
Eb/No Threshold for 10e-10 BER	20,5		dB @RF
Link Margin		7,61015367	dB
Rain Zone	E-H		
Rainfall rate for 99.99% availability	31		mm/hr
Rain losses (@99.99%)		6,93	dB
Rainfall rate at threshold		35,05	mm/hr
Percentage under threshold		0,00793	%
Outage		41,68008	min/year

Las características de las antenas son:

Antena BTE de sector: www.andrew.com

-Antena BTE: High Gain Sector Antenna BCAH090-285 (Andrew).

Ganancia: 21dBi

Diámetro: no tiene, no es circular

Altura, longitud y anchura: 457, 226 y 89mm



Antena CPE directiva: www.smartant.com

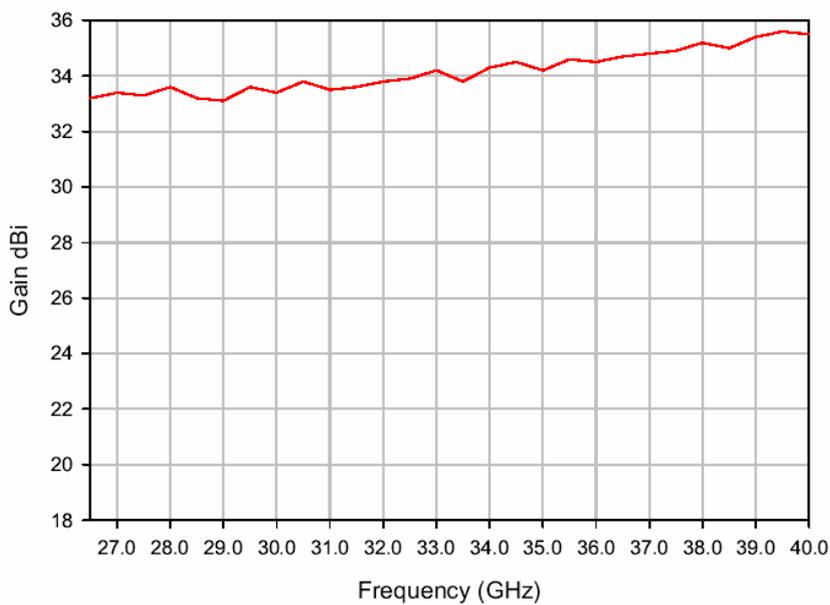
-Antena CPE: High Gain Directional Antenna RX275-00335-W28 (Smartant).

- Ganancia: 33.2dBi

- Diámetro: 255mm

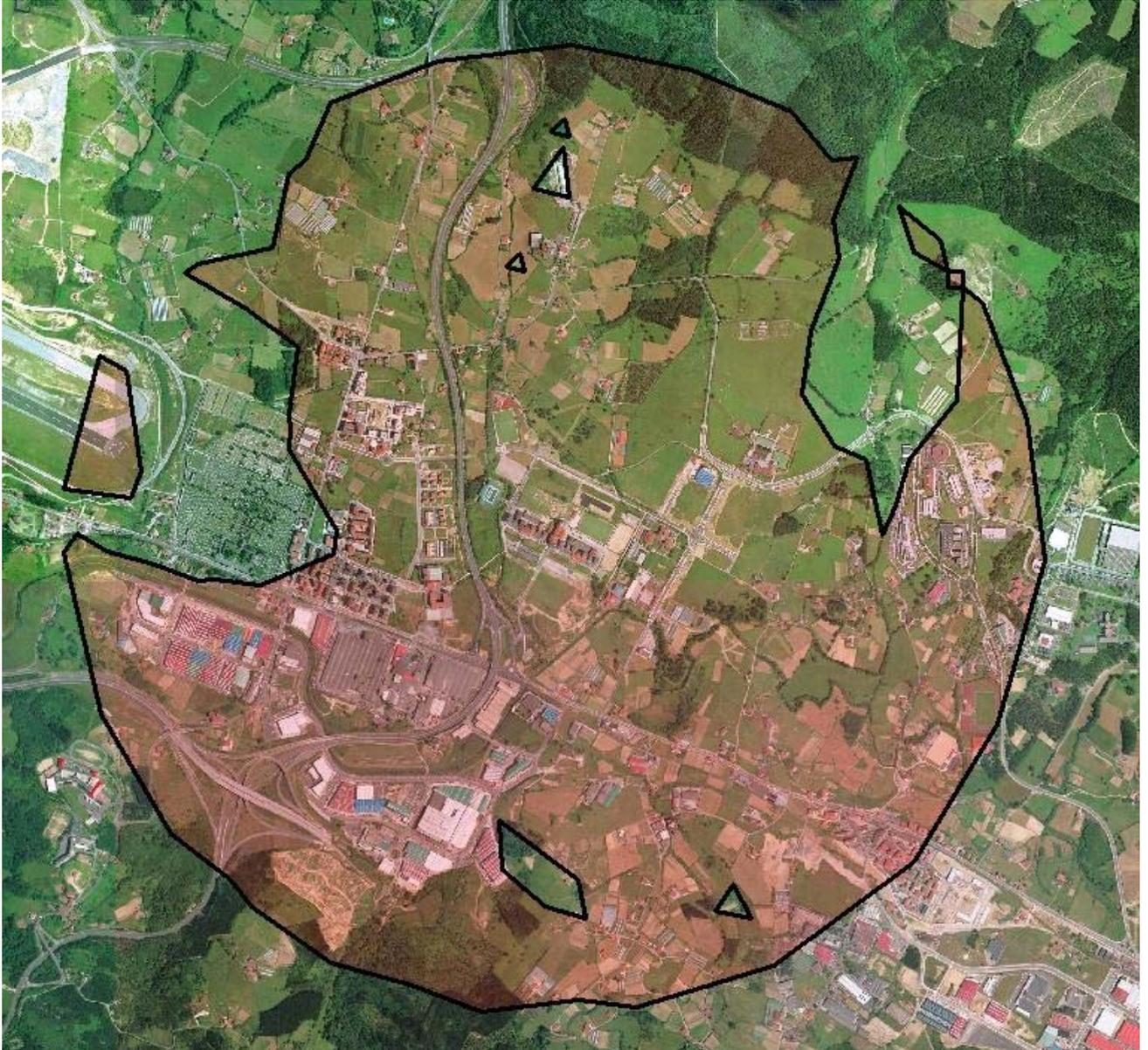


RX275-00335-W28



Si queremos ejercitarnos en la ejecución de cálculos de enlaces, la verificación del de la página anterior a partir de los datos de los equipos y aplicación, puede ser un buen ejercicio. Puede ser útil el ejemplo de la sección anterior sobre las redes VSAT.

Programas más sofisticados de cálculo de coberturas en enlaces inalámbricos llegan a incluir el efecto de los obstáculos sobre la misma, dando como resultado mapas reales basándose en fotografías aéreas del terreno. Como ejemplo sirva la gráfica de la cobertura simulada del sistema CELERIA en la localidad de Derio.



Fuente: Euskaltel

8.2.3.3 MWS

UN - 94

Banda de 40,5 a 43,5GHz.

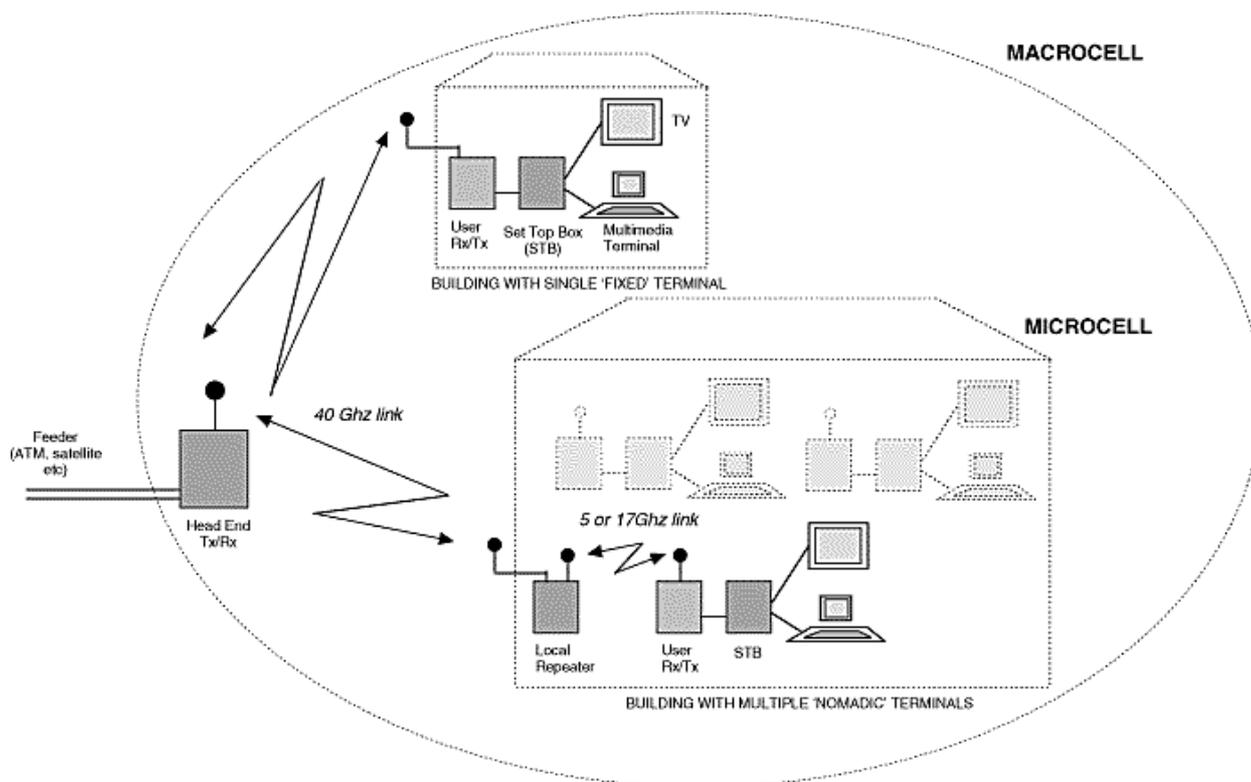
Se destina la banda de frecuencias 40,5 - 43,5GHz para la introducción de sistemas con capacidad de información multimedia sin hilos (MWS) incluyendo los sistemas de distribución de vídeo por microondas.

Los Sistemas de Distribución de Vídeo Multipunto (SDVM), pueden ser considerados como una alternativa a las redes de distribución de señales de vídeo por cable o bien como extensión de las mismas.

.....

Como vemos serían otros 3GHz de ancho de banda disponible para acceder al usuario final con servicios multimedia, que se irán utilizando a medida que la tecnología en esta banda sea más económica y accesible. De hecho es la banda que se está utilizando para los sistemas LMDS en Inglaterra, a pesar de presentar mayores dificultades debido a las fuertes atenuaciones de la lluvia.

Estos sistemas se caracterizan por basarse en una estructura celular con la utilización de bandas de frecuencia diferentes en las células grandes y en las pequeñas. Ver la figura, en la que se representa lo básico del sistema CABSINET[®]:



1

Fuente: <http://www.cordis.lu/infowin/acts/rus/projects/p066.htm>

El sistema es bastante complejo a todos los niveles y está exigiendo profundos estudios sobre la viabilidad del mismo en base a las fuertes atenuaciones en esas frecuencias y a la

posibilidad de utilizar los multitrayectos para evitar en lo posible los desvanecimientos. Queda fuera de los objetivos de este tema extenderse más sobre este sistema, menos usado que el LMDS de 28GHZ.

8.3 SISTEMAS DE RADIODETECCIÓN EN MICROONDAS

Radar es un acrónimo de **RA**dio **D**etection **A**nd **R**anging y, como su propio nombre indica, con su uso se busca la detección y medida de parámetros de objetos móviles a distancia. Su operación se basa en la emisión de energía, normalmente pulsada, y en la detección de la reflexión de esa energía en un objeto lejano (**ECO**) y captado por una antena de haz muy estrecho de forma que la dirección del objeto es la dirección de apuntamiento de la antena.

La distancia a la que está el objeto se calcula partiendo de la diferencia en tiempo entre la emisión y la recepción de la señal y la velocidad como consecuencia de la medida del desfase por el Efecto Doppler que se produce.

Las aplicaciones son múltiples, tanto en Ingeniería Civil, Militar y Científica. A destacar Control de Aeropuertos, Radares de Velocidad en carretera, Navegación aérea y naval, guiado de misiles, Astronomía, Confección de mapas y de imágenes remotas, etc.

Probablemente es el Sistema más completo de todos los que involucran frecuencias de microondas, puesto que involucra campos tan diferentes como Pequeña señal, Potencia y Procesado de Señal, además de necesitar de una fiabilidad extrema en muchas de las aplicaciones (aterrizaje de aviones, aplicaciones militares,...). En la foto podemos ver un radar de aplicación espacial de la NASA.



Fuente: [la Red](#)

8.3.1 La Ecuación Radar

Comenzamos por definir un sistema básico de radar como es el monoestático, en el que la antena es la misma para la emisión y la recepción de la señal:

$$S_t = \frac{P_t G}{4\pi R^2} (W / m^2)$$

, donde S_t es la densidad de potencia que incide en el objeto, P_t es la Potencia transmitida, G la ganancia de la antena y R la distancia al objeto.

El objeto dispersará esa energía incidente en varias direcciones, por lo que definimos un parámetro denominado Sección de Radar:

$$\sigma = \frac{P_s}{S_t}$$

, donde P_s es el total de la potencia dispersada en todas direcciones.

La sección radar será una propiedad intrínseca del objeto y tendrá dimensiones de superficie en m^2 ; además dependerá de los ángulos incidente y reflejado de la señal y de la polarización de la onda incidente. El cálculo de la sección radar es, evidentemente, algo complejo debido a la irregularidad de los objetos a detectar y, por ello, sólo se puede calcular exactamente en volúmenes sencillos, el de la esfera conductora por ejemplo, que se puede resolver por condiciones de contorno del campo electromagnético.

Objetos más complejos necesitan de técnicas numéricas y de medidas experimentales. El resultado final son unas tablas de valores aproximados: $0,01m^2$ para un pájaro, $1m^2$ para una persona y $100m^2$ para un avión comercial grande, son ejemplos típicos.

Siguiendo con la Ecuación Radar, la densidad de potencia re-radiada por el objeto también decaerá con la misma ley de $1/R^2$ con lo que la densidad de potencia en recepción será:

$$S_r = \frac{P_t G \sigma}{(4\pi R^2)^2}$$

, y si la antena tiene un área efectiva de $A_e = \frac{\lambda^2 G}{4\pi}$ nos da como resultado la conocida como

Ecuación Radar:

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$$

, en la que es de observar que la potencia recibida varía con $1/R^4$ con lo que, evidentemente, necesitaremos un receptor de muy alta sensibilidad. Además esta fórmula se basa en las pérdidas de propagación libre exclusivamente y, en una aproximación más exacta, habría que incluir las pérdidas de desadaptación en la antena, las pérdidas atmosféricas....., además de considerar el ruido recibido para extraer la S/N en recepción y saber si estamos dentro del rango operativo del radar.

Esta ecuación nos da el máximo alcance de detección de objetos sabiendo cuál es nuestra sensibilidad en el receptor, es decir la P_{min} detectable. Este mínimo puede ser, por tanto, mejorado en base al procesado que podamos aplicar a la señal emitida y recibida. Por ejemplo, si en lugar de detectar un único eco, integramos N ecos a lo largo del tiempo, podemos reducir el ruido detectado total y aumentamos el rango en un factor aproximado de N . Los factores que reducen el rango teórico son: la propagación real, la naturaleza estadística de la detección y las interferencias de otros objetos o emisiones.

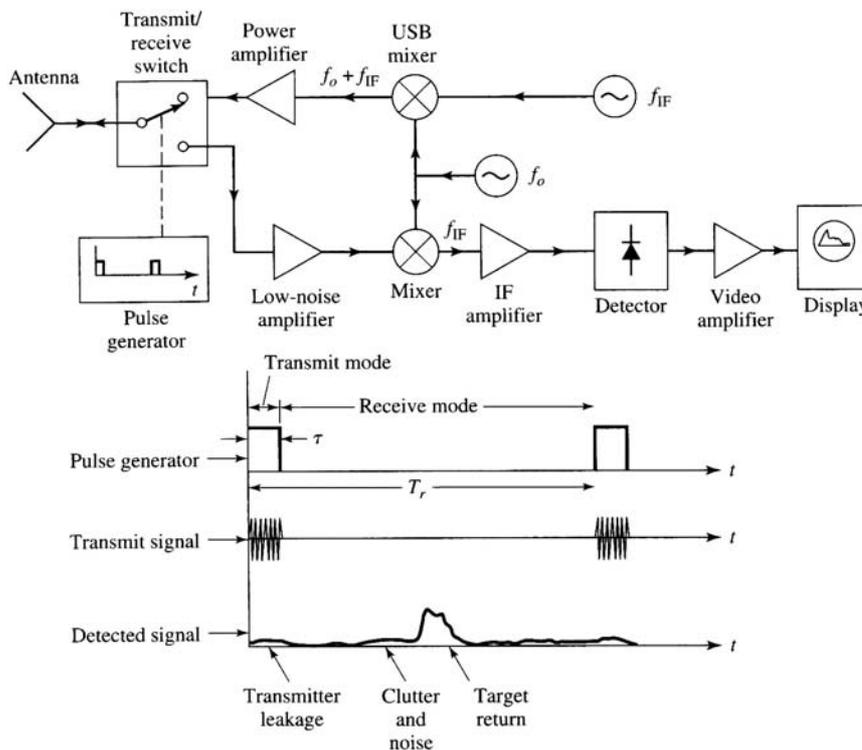
En las referencias [8.3] y [8.4] podemos encontrar fórmulas más completas que incluyen la naturaleza estadística de la detección de un blanco y la ecuación Radar incluyendo el efecto del receptor y su S/N_{\min} .

8.3.2 Radar de Pulso

Es el más común y se utiliza para medir la distancia al objeto a través de la diferencia en tiempo entre el pulso emitido y el recibido como eco del objeto. El diagrama de bloques corresponde a un radar de este tipo, en el que se observa la presencia de una única antena (monoestático) y un conmutador que, gobernado por una señal de control, define cuándo se transmite y cuándo se recibe.

El conmutador, además, aísla receptor de transmisor en la cantidad necesaria (80-90dB) para poder hacer operativo el radar y evitar que el receptor sea dañado por el residuo de la transmisión. Por tanto, un circulador con 20-30dB de aislamiento no sería suficiente; incluso puede ser necesario introducir más conmutadores en la cadena de transmisión para conseguir un aislamiento efectivo.

Para concretar la dirección en la que se encuentra el blanco contamos con el haz directivo de la antena, de forma que ésta debe girar regularmente si queremos observar todo el entorno del radar. Hay otra forma de dirigir el haz, la electrónica, a base de controlar la fase y amplitud de un array de antenas.



Extraído de: Microwave Engineering. David M. Pozar. John Wiley & Sons, Inc ref. [8.1]

Los rangos típicos de tiempos son de 100ms a 50ns de duración y 100Hz a 100KHz en la frecuencia de repetición de pulso (PRF). Como siempre, debe haber un compromiso entre estos dos parámetros: pulsos cortos aumentan la resolución en distancia, pulsos largos mejoran la señal ruido, luego mejoran el rango; PRF alta mejora la resolución de detección y PRF baja evita ambigüedades cuando $R > c \cdot T_r/2$ (la distancia es tal que el eco llega tras un nuevo pulso).

El rango en distancia del radar se puede definir a través de los tiempos de pulso y la PRF, entre una R mínima para el eco justo después del pulso y una R máxima si el eco llega justo antes del pulso siguiente. Ver el EJEMPLO 2.

De la cadena de recepción destaca la utilización de de una misma señal de oscilador, con lo que evitamos problemas de deriva del mismo. La parte de visualización suele ser la típica pantalla con una representación polar de 360° en acimut que se genera a partir de la información de una antena que gira continuamente, y que representa la posición del blanco en tiempo real. Por supuesto, hoy en día toda esta parte de visualización ha mejorado mucho con la potencia de los ordenadores y las capacidades gráficas.

8.3.3 Radar Doppler

Si el objeto a detectar tiene una componente de velocidad en la línea de visión directa del Radar, el retorno estará desplazado en frecuencia, relativamente, respecto al pulso transmitido. Si la frecuencia transmitida es f_0 y la velocidad radial del objeto es v , entonces la desviación frecuencia o frecuencia doppler será:

$$f_d = \frac{2vf_0}{c}$$

, y la frecuencia recibida será $f_0 \pm f_d$; con signo positivo si el objeto se acerca y negativo si se aleja. El comportamiento es idéntico a la frecuencia Doppler audible.

Si sólo queremos controlar este parámetro, el radar es mucho más sencillo que el pulsado, puesto que al tener que medir sólo velocidad, se puede emitir onda continua y detectar el retorno con sólo mezclar con la misma portadora.

De todas formas, el sistema más habitual combina las bondades de ambos y da lugar al Radar Doppler Pulsado, que nos permite conocer tanto velocidad como dirección y sentido, usando una antena directiva para ello. Además al poder detectar la velocidad del objeto podemos discriminar los objetos fijos que devuelven ecos falsos o clutters.

Los dos Ejemplos a continuación están extraídos de la RECOPIACIÓN DE PROBLEMAS de SISTEMAS RADAR del GRUPO DE TECNOLOGÍAS DE LAS COMUNICACIONES del DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y COMUNICACIONES de la Universidad de Zaragoza

EJEMPLO 1:

Un radar de vigilancia con un alcance de 300Km realiza su cobertura en acimut mediante un barrido mecánico de antena a 5rpm, de forma que en cada barrido sólo envía un pulso. Si el sistema especifica para cada exploración una P_{fa} = Probabilidad de Falsa Alarma = 10^{-5} y una P_d = Probabilidad de detección = 0,4: calcular la probabilidad acumulada de detectar un blanco que se mueve en dirección al radar con una velocidad de 1000m/sg al cabo de 4 barridos si en la primera exploración susceptible de detectarlo se encuentra a la distancia máxima.

SOLUCION:

Las fórmulas concretas las encontramos en las referencias bibliográficas, pero merece la pena razonarlas:

La idea es que al ir acumulando posibles ecos del objeto móvil la Probabilidad de detección del mismo va aumentando, pero, ¿en qué cantidad?..Por otro lado, la $P_{fa} = 10^{-5}$ nos coloca en un determinado rango de calidad del sistema, pues está directamente relacionada con la S/N necesaria para no cometer errores y evitar las falsas alarmas.

Esto nos lleva a la gráfica de la pag. 62 de la referencia [8.4] en la que podemos ver que, para estos datos necesitamos una S/N en detección de 10dB en el primer barrido. A partir de aquí, a medida que el móvil se va acercando la S/N irá mejorando, al ritmo de relación de distancias a la cuarta (recordar la ecuación radar)

$(S/N)_i = (S/N)_1 * (R_1/R_i)^4$, donde i es el nº de barrido; construyamos una tabla con los valores resultantes:

Nº de barrido, i	Distancia	S/N	P _{di}
1	300 Km	10 → 10dB	0,4
2	288 Km	11,77 → 10,71dB	0,6
3	276 Km	13,95 → 11,44dB	0,7
4	264 Km	16,67 → 12,22dB	0,84

Y ahora, ¿cómo acumulamos esas probabilidades individuales de cada barrido? La fórmula la podemos encontrar, pero razonemos de la siguiente forma:

Sabemos que la Probabilidad de detección es = (1 – la probabilidad de no detección) y que la Probabilidad de no detección acumulada es el factor de las Probabilidades de no detecciones individuales, por tanto:

$$P_{dc} = 1 - \prod_{i=1}^4 (1 - P_{di}) = 1 - (1-0,4). (1-0,6). (1-0,7). (1-0,84) = 0,988 \text{ es el resultado.}$$

EJEMPLO 2:

Vamos a analizar el caso de un radar de vigilancia de muy gran alcance que utiliza una agrupación de elementos radiantes con el que se realiza un barrido electrónico uniforme en azimut y elevación, de amplitudes $\vartheta_{OH}=90^\circ$ y $\vartheta_{OV}=45^\circ$ en un tiempo de 20 segundos. La agrupación genera un haz pincel, considerado piramidal, con anchos de haz invariantes en cualquier dirección $\vartheta_H=1,5^\circ$ y $\vartheta_V=1,5^\circ$, radiando un único pulso para cada dirección de iluminación de 16MW de potencia y 330µs de duración.

El resto de características del radar son:

Frecuencia de Trabajo: 12GHz

Figura de ruido del receptor: 4dB

Pérdidas del sistema: 10dB

S/N mínima en la entrada del detector: 15dB

- a) Determinar las distancias máxima y mínima en las que el sistema radar puede detectar blancos correctamente y sin ambigüedad.
- b) La sección radar mínima que el radar es capaz de detectar a la distancia máxima.

SOLUCION:

a) La distancia mínima está limitada por la mínima duración de pulso, así:

$$R_{min} = c\tau / 2 = 1/2(3 \cdot 10^8 * 330 \cdot 10^{-6}) = 49,5 \text{ Km}$$

A su vez, la distancia máxima vendrá dada por el PRF o Pulse Repetition Frequency, que será el tiempo total del barrido dividido por el número de celdas:

$$N^{\circ} \text{ de celdas} = 90 * 45 / 1,5 * 1,5 = 1800$$

$$T_r = 20 \text{ segundos} / 1800 = 11,11 \text{ milisegundos}$$

$$R_{\text{max}} = 1,5 * 10^2 * 11,11 = 1666 \text{ Kilómetros}$$

b) En la referencia [8.3] tengo la ecuación Radar del alcance máximo en función de la S/N mínima detectable, que conociendo todos los datos permite despejar el valor de la sección radar mínima detectable σ :

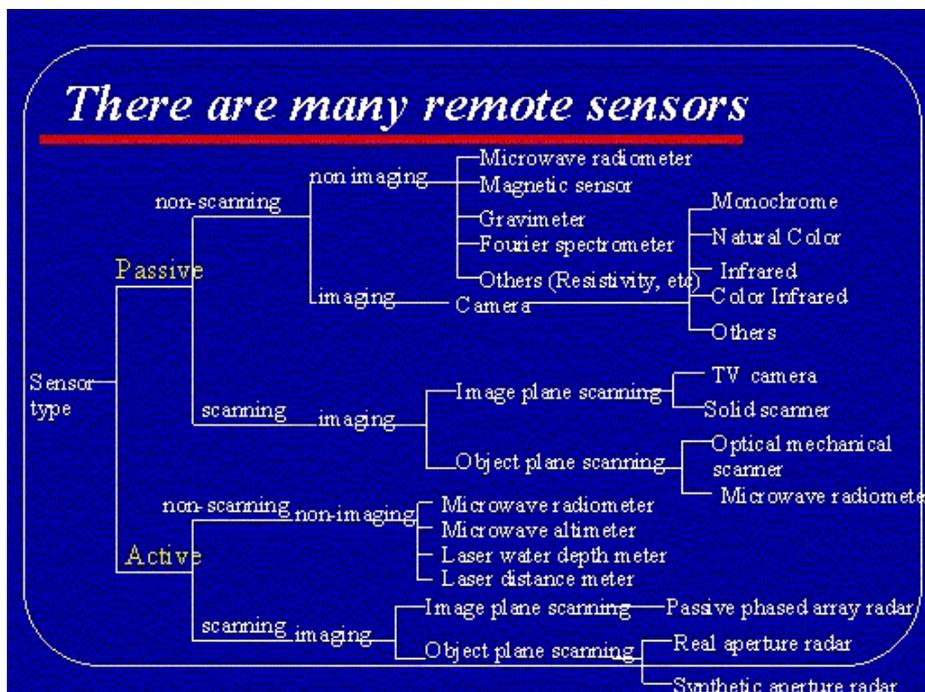
$$\sigma = 0,438 \text{ m}^2, \text{ como vemos es un área pequeña para estar a la distancia que estamos.}$$

8.4 RADIOMETRÍA

La Radiometría en frecuencias de Microondas es una técnica relativamente reciente y que se basa en la medida pasiva de la porción de Microondas del ruido emitido por un cuerpo, tanto si es el propio (su temperatura) como si es el reflejado de todas las fuentes externas: mide, por tanto, la denominada como Temperatura de Brillo (brightness en inglés). En su aplicación típica, con el radiómetro embarcado en un satélite o avión, será la Temperatura de ruido proveniente del suelo, mar y atmósfera.

Decimos la porción de Microondas, pues la Radiometría como tal abarca otras longitudes de onda: desde el ultravioleta hasta el infrarrojo (donde son llamados fotómetros o espectrómetros), pasando por el espectro visible. Todas esas zonas del espectro han sido profusamente utilizadas en la observación de la Tierra desde satélites (LANDSAT, fotografías, etc.).

El uso de la zona de Microondas en este tipo de aplicaciones está extendiéndose en tiempos recientes, como se ve en la gráfica siguiente



Fuente: La Red

Como vemos los Radiómetros de microondas aparecen en varias líneas, aunque las denominadas activas las podríamos delimitar bajo el concepto de Radar, que ya hemos visto previamente. Nos referimos pues a los Radiómetros pasivos a continuación.

Sus aplicaciones principales están en el campo Medioambiental, aunque también es usado en Astronomía y, cómo no, en el campo militar. En el campo medioambiental, los radiómetros pasivos embarcados en satélite se utilizan para hacer medidas de la tierra en apartados tan variados como la medida de los fenómenos meteorológicos, medidas del mar y su salinidad, temperaturas y cambio climático, extensión y espesor de la capa de hielo en los polos, MDT (modelos digitales del terreno), etc.

Evidentemente estos sensores captan el ruido de muy diversas fuentes como se ve en la figura a continuación: la antena recibe el ruido de la tierra, de la atmósfera directamente, y de la parte reflejada en la tierra de la radiación emitida por la misma atmósfera. Además tendremos que contar con el ruido captado por los lóbulos secundarios de la antena.

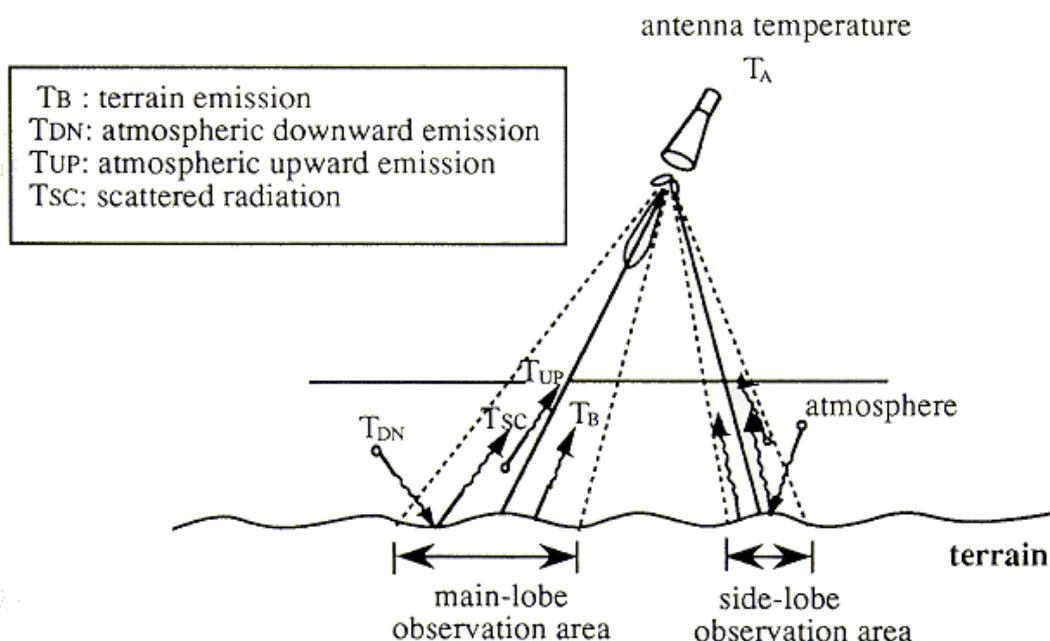


Fig.3.1.2 Principle of passive microwave sensor. The apparent temperature represents the energy incident upon the antenna.

Fuente: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/rsnote/cp3/cp3-1.htm> (actualidad en desuso)

En la tabla de la página siguiente podemos ver una exhaustiva lista de frecuencias y aplicaciones de la radiometría pasiva en Microondas. Viéndola se puede entender la validez de todas estas observaciones para analizar los cambios climáticos en la tierra.

Veamos como funciona un radiómetro.

8.4.1 Radiómetro de Potencia Total

Vamos a ver el diagrama de bloques de un Radiómetro, el llamado de Potencia Total, para entender cómo funciona:

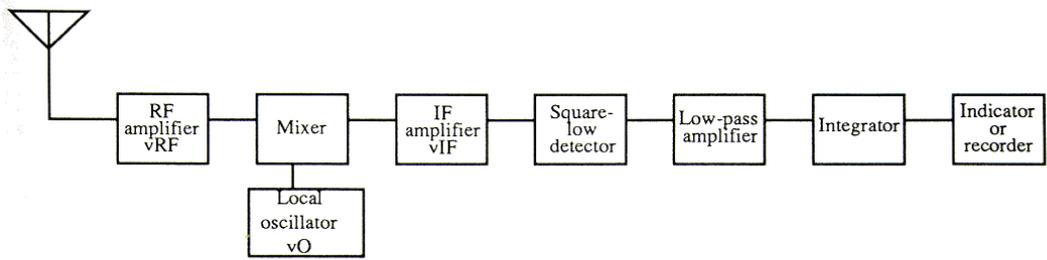


Figure 4.8.3 Total power radiometer system.3)

Fuente: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/rsnote/cp3/cp3-1.htm> (actualidad en desuso)

Básicamente es un receptor superheterodino que se caracteriza por una muy alta sensibilidad del front-end y una muy alta ganancia, de forma que podamos discriminar el ruido proveniente de la antena, del ruido propio del receptor, que es muchas veces incluso más alto que lo que capta la antena. ¿Cómo hacerlo?

Table4.1.2 Frequency of active microwave sensor for monitoring major target.1)

frequency(GHz)	monitoring target
around 1.4	soil moisture content, salinity
around 2.7	salinity, soil moisture content
around 5	temperature of estuary
around 6	sea surface temperature
around 11	rain, snow, lake ice, sea surface condition
around 15	water vapor, rain
around 18	rain, sea surface condition, sea ice, water vapor
around 21	water vapor, liquid water
22.24	water vapor, liquid water
around 24	water vapor, liquid water
around 30	sea ice, water vapor, oil slick, cloud, liquid water
around 37	rain, cloud, sea ice, water vapor
around 55	temperature
around 90	cloud, oil slick, ice, snow
100.49	NOx
110.80	ozone
115.27	CO
118.70	temperature
125.61	NOx
150.74	NOx
164.38	ClOx
167.20	ClOx
175.86	NOx
183.31	water vapor
184.75	ozone
200.98	NOx
226.09	NOx
230.54	CO
235.71	ozone
237.15	ozone
251.21	NOx
276.33	NOx
301.44	NOx
325.10	water vapor
345.80	CO
364.32	ozone
380.20	water vapor

Fuente: <http://www.profc.udec.cl/~gabriel/tutoriales/rsnote/cp3/cp3-1.htm> (actualidad en desuso)

La idea teórica básica es realizar una calibración periódica en la entrada de forma que veamos el resultado del receptor ante una fuente conocida y así inferir la desconocida, que es el ruido equivalente de antena. El detector nos dará una tensión proporcional a la potencia de ruido recibida más la potencia de ruido del propio receptor, vista como temperatura equivalente en su entrada, de forma que:

$$V_o = G (T_b + T_r) kB$$

, con T_b como variable a despejar una vez conocidos $G kB$ y $G T_r kB$ utilizando dos fuentes calibradas de ruido. El último bloque, el integrador, lo que hace es suavizar la tensión de ruido detectada, eliminando las fluctuaciones del ruido aleatorio cuando las variaciones se producen a un ritmo menor que la constante de tiempo del mismo.

Se puede demostrar que las fluctuaciones en temperatura de ruido detectada, es decir el error debido a esto es:

$$\Delta T_N = \frac{(T_b + T_r)}{\sqrt{B\tau}}$$

, si aumentamos τ de una manera adecuada este error se puede minimizar.

La otra fuente importante de error es, como era de esperar, la variación de la ganancia G con el tiempo, en forma de fluctuaciones aleatorias debido a los diferentes bloques que intervienen en el radiómetro y a la alta magnitud de aquella. Como nos estamos basando en un sistema de calibración previa, las variaciones de G producirán errores en la medida:

$$\Delta T_G = (T_b + T_r) \frac{\Delta G}{G}$$

, donde ΔG es el valor rms de las variaciones de G .

Con un ejemplo se ve la importancia relativa de ambos errores. En un radiómetro funcionando en 10GHz, si tenemos los siguientes valores: $B = 100\text{MHz}$, $T_r = 500\text{K}$ ($N_{\text{FIG}} = 4,35\text{dB}$), $\tau = 0,01\text{s}$, $\Delta G/G = 0,01$ (1% de variación) y $T_b = 300\text{K}$ (son valores lógicos y razonables), el resultado es de $\Delta T_N = 0,8\text{K}$ y $\Delta T_G = 8\text{K}$. Lo cual demuestra que el principal factor de error en un Radiómetro de Potencia Total es la variación de Ganancia de la cadena de recepción.

El siguiente esquema pretende, precisamente, eliminar esta fuente de error a costa, eso sí, de complicar algo el diagrama de bloques.

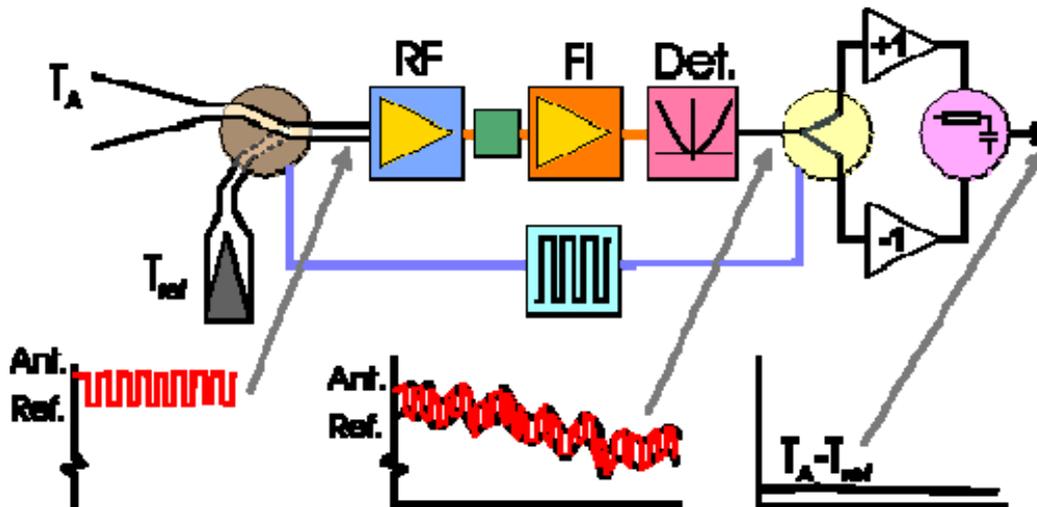
8.4.2 Radiómetro de Dicke

Basándose en que las fluctuaciones de Ganancia en el sistema anterior son relativamente lentas ($T_{\text{fluc}} > 1\text{segundo}$), la idea sería calibrar repetida y rápidamente la cadena de recepción, eliminando así las fluctuaciones de ganancia y su influencia sobre la Temperatura de Ruido. Esto es lo que propuso R.H. Dicke, en "The Measurement of Thermal Radiation at Microwave Frequencies", Rev. Sci. Instr., vol. 17, July 1946.

En la siguiente figura podemos observar el diagrama de bloques, en el que observamos la presencia de una conmutación que gobierna tanto la entrada como la salida, de forma que al generar la señal de error proporcional a $T_A - T_{\text{ref}}$ en la salida la podemos realimentar a la entrada para compensar las variaciones de ganancia.

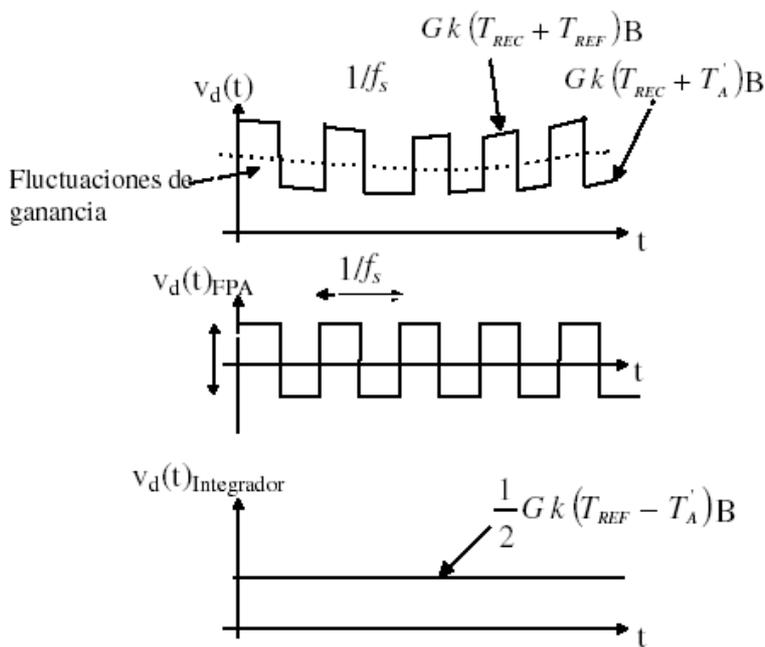
En funcionamiento práctico, lo que se hace es utilizar la señal de salida para generar una tensión de control, V_C , proporcional a la misma, que a su vez gobierna una Fuente de Ruido de Referencia variable, de modo que T_A se puede inferir de V_C . La frecuencia de calibración suele variar entre 10 y 1000Hz. Este sistema permite la medida estable de temperaturas de brillo en el

rango de 50 – 300K, para lo cual el generador de referencia debe cubrir el mismo rango, cosa que no es fácil. Por tanto existen otras alternativas para lograr esta medición, como por ejemplo variar el ciclo de trabajo de la señal de conmutación y así introducir la T_{ref} necesaria. Otra forma sería variando la G de FI en el tiempo de T_{ref} para conseguir un nulo en la salida.



Fuente: http://www.iac.es/galeria/raw/spanish_Coherent/dicke.html

• **Funcionamiento básico del DR:**



- $T_{REF} > T'_A$
- $f_s >$ Variaciones de ganancia
- f_{fall} FPA $>$ Variaciones de ganancia
- BW del amplificador de baja frecuencia limitado por el tiempo de subida de la señal (τ_{sw})
- $\tau_{sw} < 0.5 \% T_s$

$$\Delta T = \left[\frac{2T_{SYS-1}^2 + 2T_{SYS-2}^2}{B \tau} + \dots \right]^{1/2}$$

(c) 2000 Universitat Politècnica de Catalunya

57

Fuente: <http://biblioteca.upc.es/bustia/arxius/20451.pdf>

8.5 CALENTAMIENTO POR MICROONDAS

Aunque resulte paradójico, hemos dejado para el final la aplicación con la que se identifica el nombre de la asignatura: el Horno de microondas. Este curioso artefacto se basa en una de las propiedades de los materiales dieléctricos ante la presencia de fuentes de frecuencias de Microondas, como es la de la disipación de la energía debida a las fuertes pérdidas en medios con alta $\text{tg}\delta$ o tangente de pérdidas.

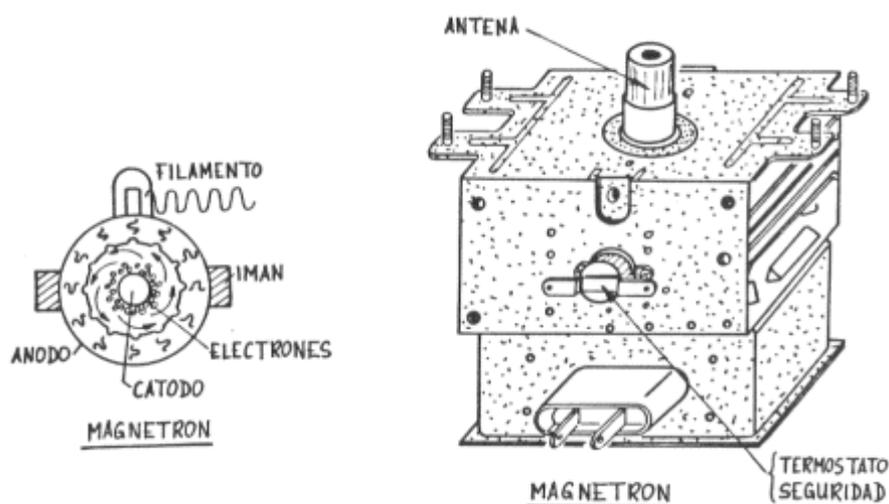
Por cierto: ¿Qué decir del cuerpo humano y su comportamiento ante las radiaciones en estas frecuencias? Parece que algún efecto, por lo menos de calentamiento del mismo, se debería dar. Nos remitimos al punto siguiente 8.6 en los que daremos algunas indicaciones.

Siguiendo con el horno, mientras el calentamiento en horno convencional se basa en el calentamiento del aire por convección y posterior calentamiento del producto por conducción, en el horno microondas se calienta directamente el material por medio de las pérdidas energéticas en el mismo, que se producen como consecuencia de la agitación molecular, que afectan sobre todo a las moléculas de agua, de tipo bipolar, que son gran mayoría en los alimentos comestibles (entre el 70 y 90%).

Desde el punto de vista de dispositivos de microondas, el elemento clave es el generador de potencia de Microondas denominado Magnetron, normalmente trabajando en el rango de 2,45GHz y con potencias entre 500 y 1500 vatios.

El magnetron fue el primer dispositivo de potencia desarrollado para las frecuencias de microondas, en los años 30 del siglo pasado y supuso un avance para las aplicaciones radar en la 2ª guerra mundial. Hoy en día se utiliza casi exclusivamente para esta aplicación, como ya se vio en el capítulo dedicado a los dispositivos de potencia.

La energía así producida se encauza a través de una guía-onda hacia el horno propiamente dicho.



Fuente: [La Red](#)

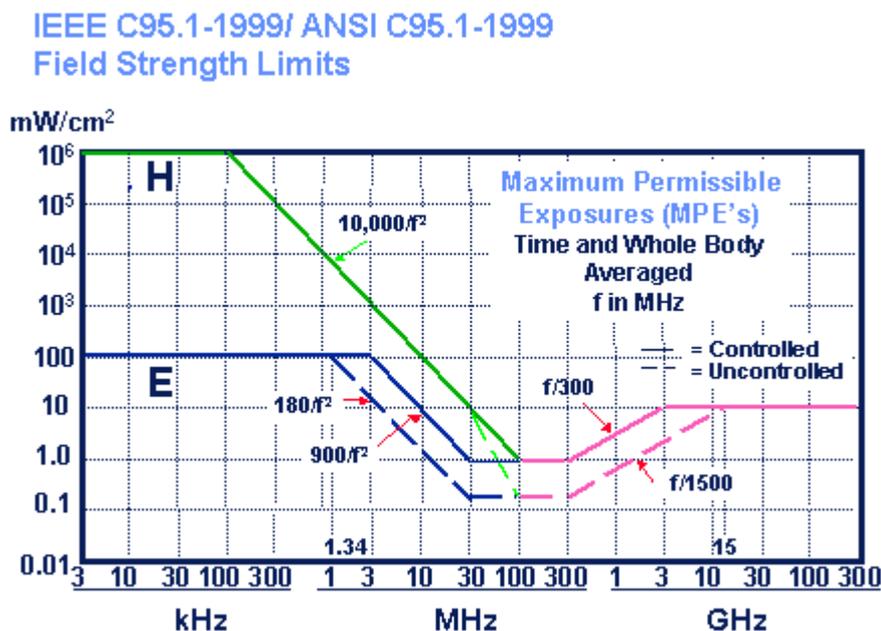
El filamento es el que calienta el cátodo que genera los electrones y estos son atraídos por el ánodo a muy alta tensión (4000 voltios), y los electrones que en condiciones normales saldrían en línea recta en dirección al ánodo, se ven frenados por el campo magnético y obligados a moverse en un orbital situado entre el ánodo y el cátodo.

El paso de los electrones por las proximidades del ánodo, en donde están situadas pequeñas cavidades resonantes, produce las oscilaciones de alta frecuencia, 2.450MHZ. Después, con una antena, se hace la transición a la guía y se emiten con la guía en abierto a la cavidad, pasando por un “agitador de ondas” (ventilador metálico) para aumentar su perturbación y minimizar la aparición de ondas estacionarias que produzcan una distribución no uniforme del calentamiento.

8.6 SEGURIDAD EN FRECUENCIAS DE MICROONDAS

Si las frecuencias de microondas interactúan con los comestibles por su gran proporción de moléculas de agua, ¿Qué decir del cuerpo humano? ¿Es el térmico el único efecto que, efectivamente, se produce?..... Entramos en el espinoso tema de las influencias en la salud humana y animal, tema muy discutido hoy en día debido a la, quizá, excesiva proliferación de radiaciones electromagnéticas presentes en nuestro entorno.

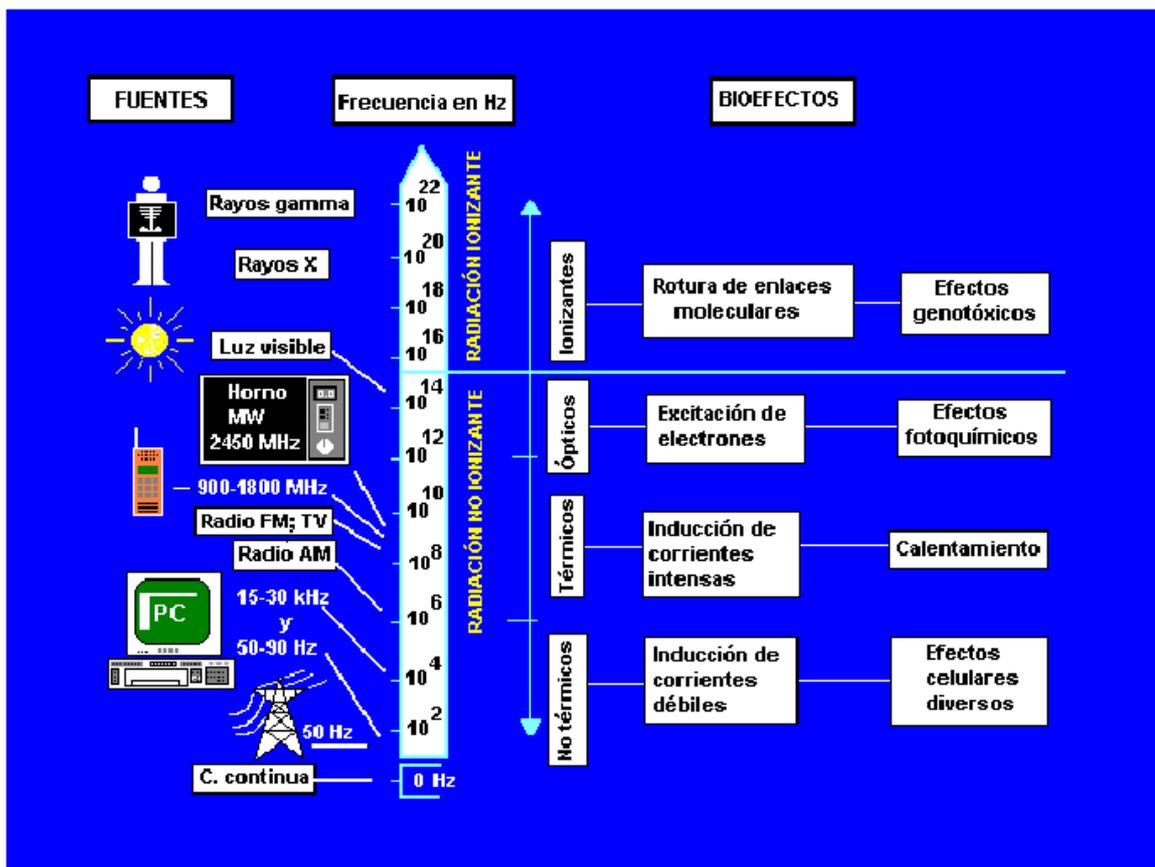
Todas las normas actuales especifican la máxima radiación permisible en forma de densidad de potencia en **mW/cm² o W/m²**, con una relación entre ellos **1mW/cm² =10W/m²**, aunque los rangos no son los mismos en todo el mundo y varían según las legislaciones nacionales. En las referencias que se citan a continuación se pueden encontrar estos valores. Como ejemplo, podemos citar el estándar IEEE C95.1-1991 de Estados Unidos que limita a 0,2mW/cm² el límite de exposición en el rango de 100MHz y luego aumenta hasta 10mW/cm² en el rango de las microondas.



En el caso de Europa los niveles de protección establecido son aproximadamente 10 veces mayores, es decir que en el rango de los GHz el límite estará en 1mW/cm². Sin embargo hay países concretos, como Rusia y China, y alguna ciudad como París, que imponen unos límites ¡1000 veces menores! Con lo que parece que los legisladores no ayudan mucho a la claridad de la situación.

El nivel permitido va asociado a la profundidad de penetración de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano. Por tanto, a frecuencias menores la penetración es mayor y su efecto también.

Las radiaciones electromagnéticas se clasifican en dos grandes grupos, según sea su efecto sobre las moléculas: ionizantes y no ionizantes. Podemos ver en la figura a continuación esta clasificación, con su rango frecuencial.



Fuente: http://w3.iec.csic.es/paginas/emf_y_salud.htm

Dada la notoriedad que está acaparando la cuestión se vislumbra que va a ser uno de los futuros campos de trabajo de los Ingenieros de Telecomunicaciones, tanto como profesión liberal en asesoría, como en la administración local a nivel de funcionario encargado del control de los despliegues.

De hecho, esta cuestión está suponiendo un freno al despliegue de la 3ª generación de Telefonía móvil, al negar los ayuntamientos los permisos para colocar las antenas de las estaciones base y repetidores.

Parece que la suma de esto y el excesivo coste de un nuevo despliegue completo e individual para cada operador, como se hizo con el GSM, van a decantar la solución hacia la compartición de las infraestructuras por parte de los operadores. Algo, en principio, bastante lógico a primera vista, aunque no terminará con la polémica.

- <http://w3.iec.csic.es/textos/Real%20Decreto%201066-2001.pdf> Real Decreto que transpone la normativa europea a la legislación española.
- <http://217.116.8.23/> es el Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación, hay un apartado concreto para este tema con abundantes enlaces.
- búsqueda en Google de “telefonía móvil y salud” y “percepción social de los campos electromagnéticos”
- <http://www.hpa.org.uk/webw/HPAweb&Page&HPAwebContentAreaLanding/PAge/1153822623782> , página de National Radiological Protection Board.

Tema 8 – Introducción a los Sistemas y Aplicaciones en frecuencias de Microondas

- International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP): <http://icnirp.de>
- Ministerio de Ciencia y Tecnología (Dirección General de Telecomunicaciones): <http://www.mityc.es/es-ES/index.htm>

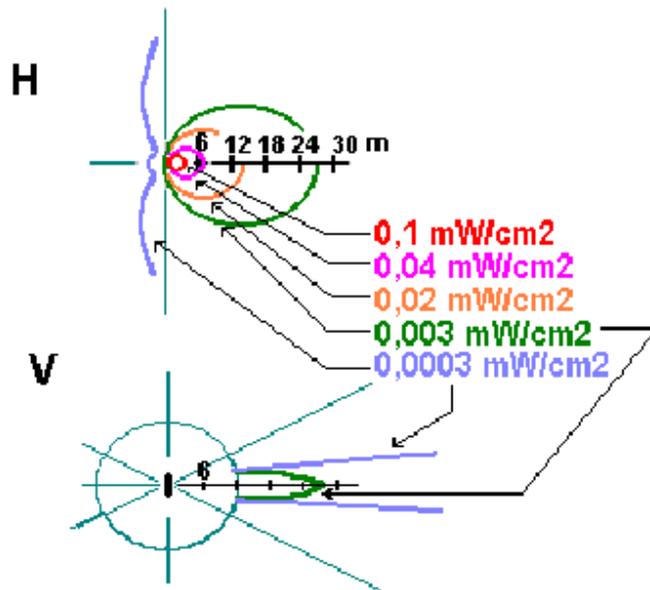


Figura 7. Niveles teóricos de emisión en una antena sectorial para una potencia de 300 W. H: Sección transversal de la emisión (horizontal). V: Sección axial (vertical). En la horizontal de la antena pueden registrarse densidades de potencia de hasta 0,1 mW/cm² a 2 metros de la antena. A 25 metros, también en la horizontal, el valor se reduciría a 0,003 mW/cm². En la vertical de la antena, los valores son mucho más bajos debido a la estrecha apertura del haz. Así, si la antena está ubicada en un mástil de 15 metros, a los pies del mástil se medirían entre 0,0001 mW/cm² y 0,00001 mW/cm². El Consejo de la Unión Europea recomienda evitar exposiciones a densidades de potencia superiores a 0,45-0,9 mW/cm² (para 900 y 1800 MHz, respectivamente)

Fuente: http://w3.iec.csic.es/paginas/emf_y_salud.htm

8.7 BIBLIOGRAFÍA Y ENLACES

Microwave Engineering. David M. Pozar. John Wiley & Sons, Inc	[8.1]
Transmisión por Radio. Tercera Edición. Jose María Hernando Rábanos. Ed. Centro de Estudios Ramón Areces. 1998	[8.2]
Modern Radar System Analysis. David K. Barton.	[8.3]
Introduction to Radar Systems; SKOLNIK, M.I. Mc Graw-Hill	[8.4]
http://www.mityc.es/Telecomunicaciones/Secciones/Espectro/cnaf/	
http://www.icc.es/web/gcontent/ca/sismologia/igc_sismologia_xsis.html	
www.gvf.org	
www.andrew.com	
www.smartant.com	