

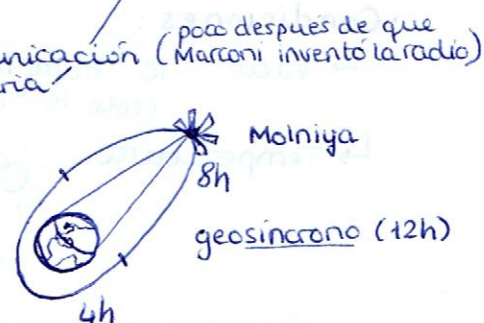
SISTEMAS DE COMUNICACIONES ESPACIALES

TEMA 1. INTRODUCCIÓN

Introducción histórica

- 1923 : Hermann Oberth propone usar satélites para comunicación
- 1945 : Arthur C. Clarke propone órbita geostacionaria
- 1957 : Sputnik-1 : 1º satélite
- 1958 : Explorer-1 : 1º satélite EEUU
- 1962 : Telstar-1 : 1ª tx de TV transatlántica
- 1965 : Molniya-1
- Early Bird / Intelsat 1 → primer GEO comercial

GEOESTACIONARIA
 día sideral: 23h 56min
 altura: 35 786 km
 inclinación: 0°



Fases de un proyecto

Se persiguen unos objetivos de garantía

ESTÁNDARES DE CONSTRUCCIÓN

Product Assurance (PA)

- proteger vida, inversión, entorno
- PROBABILIDAD de operar satisfactoriamente
- identificar ELEMENTOS CRÍTICOS
- Manufactura y tests: estándar, consistentes y correlables → TRAZABILIDAD

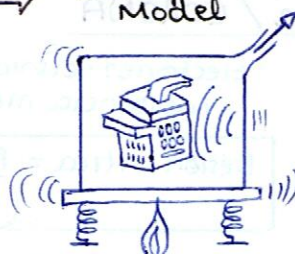
Breadboard ⇒ Engineering Model ⇒ Qualification Model ⇒ Prototipo/Modelo de vuelo



- construir circuito
- test térmico
- NO adecuado VUELO



- mecánicamente representativo (tamaño, torsión, carga, ...)
- tests:
 - térmico
 - EMC
- NO adecuado VUELO



- mecánicamente representativo
- tests:
 - vacío térmico
 - EMC
 - vibraciones
- MÁS fuertes de lo necesario (márgenes de confianza)
- componentes de vuelo



- tests a nivel de "aceptación" (no forzarlo)
 - vacío térmico
 - EMC
 - vibraciones (sin radiaciones)

- minimizar dimensiones y masa (que no varíe entre estándares)
- centro de gravedad fijo
- estructura rígida, alta frec. resonancia
- Interfaces:
 - mecánicas ← alineados para el vacío
 - eléctricas
 - térmicas ← disipación adecuada

Grandes limitaciones:

- consumo de potencia
- volumen
- masa

Requerimientos

- alta fiabilidad (15 años sin mantenimiento)
- grandes vibraciones en lanzamiento
- entorno orbital (temp, vacío, radiaciones...)

100's de Hz (cuidado con resonancias)

Entorno espacial

- microgravedad
- micrometeoritos / basura espacial
- lanceamiento: vibración, acústica

Condiciones:

↳ Vacío: 10^{-10} hasta 10^{-20} Torr
(sólo 10^{-6} Torr en test)

↳ Temperatura:

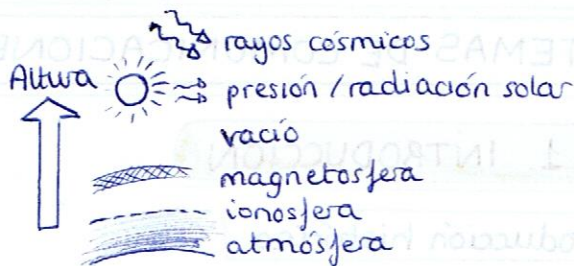


- Equilibrio en espacio profundo: 4 K
- Panel solar al sol: 350 K

↳ Radiación

↳ Vibración (aleatoria, secuencial, continua)

↳ EMC



- radiación solar
- radiación terrestre (albedo)
- disipación eléctrica interna
- radiación al espacio

$$Q = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{emisividad} \\ (0 \text{ a } 1)}}{\epsilon} \cdot A [m^2] \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{cte} \\ \text{stephan-Boltzmann}}}{\sigma \left[\frac{W}{m^2 \cdot K^4} \right]} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Temperatura}}}{T^4 [K]}$$

Efectos Perjudiciales en RF

→ Gaseous Breakdown / CORONA



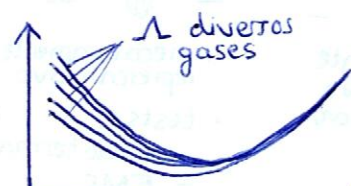
- Electrones colisionan con moléculas del gas (distancia media libre entre colisiones)

Presión crítica = Presión a la cual

$$f_{col} \text{ de } e^- = f_{RF}$$

→ "resonancia"

Campo $|E|$ necesario para romper el dispositivo



↑ casi vacío (órbitas altas)

↑ presión crítica (órbita baja) CASO PEOR

↑ presión atmosférica

- Multipactor depende de:

- condición de vacío
- Voltaje aplicado
- Frecuencia RF y geometría (producto $f \times d$)
- superficie

→ MULTIPACTOR

Electrón choca contra metal



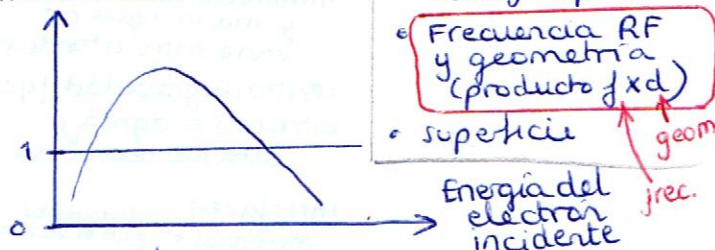
1. Rebote
2. Arranque e^-
3. ionización

Si la media es > 1 EFECTO AVALANCHA

- puede ocurrir en ausencia de gas (órbitas altas)
- puede combinarse con el efecto corona si hay gas (órbitas bajas) (pero es más grave en vacío)

Solución actual: superficies con rugosidades de [nm]

Emisión secundaria



↳ tanta energía que se incrementa

Altas energías →

trás el OMUX

→ PIM (intermodulación pasiva)

$$|m f_1 \pm n f_2|$$

no relacionado con el entorno espacial

Subsistemas y carga útil

Todo hace falta y todo está relacionado

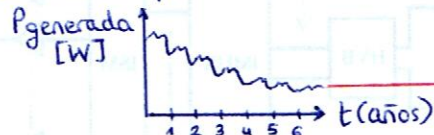
2

- Subsistema estructural: mantener todos los equipos. Robusto y estable
- Subsistema de control térmico: zonas hacia el sol con temp muy elevadas
zonas hacia el espacio profundo con temp bajísimas
- Subsistema de propulsión: AKM (GTO → GEO)
- Subsistema de generación de potencia:



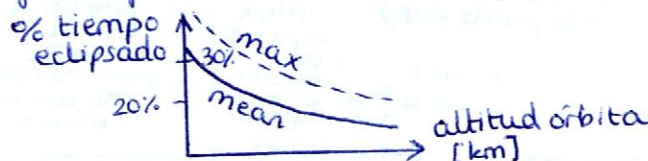
Cada vez se fabrican con mayor eficiencia

- se deterioran por bombardeo de partículas (electrones y protones)



se sobredimensionan para dar suficiente potencia al final de la vida

- sufre el efecto de ser eclipsado por la tierra



Requiere BATERIAS Ni-Cd, NiH₂ (15% peso total)

LEO: un eclipse todos los días (30% tiempo)

GEO: eclipses sólo 22 días antes y después de los dos equinoccios → alineamiento tierra-equador-sol (total 88 días) duración máxima 70 min

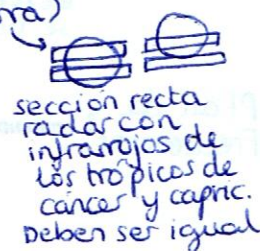
alineamiento predecible

sat-tierra-sol = eclipse → baterías
tierra-sat-sol = interferencia solar (problemas de ruido en la estación terrestre)
→ se trabaja con sat. vecinos

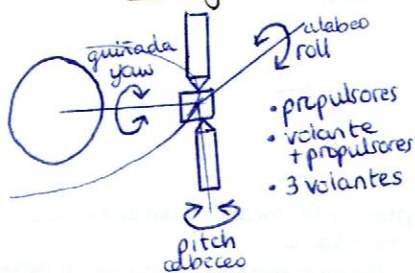
Subsistema de control de órbita

sensoriza y corrige derivaciones

sensor inercial (acelerómetro, giroscopo)
sistema de referencia externo (sol, estrellas, tierra)
propulsores
momento angular
otros: navegación solar, actuador magnético



Estabilización 3 ejes



LEO → mayor velocidad → control órbita crítico
GEO → tolerancia arco $\pm 0.05^\circ$ ~ 75 km

Estabilización en spin

- Parte del satélite gira para aumentar la rigidez del conjunto: sólo se usa en GEOs debido al efecto giroscópico
- introduce vibraciones adversas
- objetivos de diseño:
 - Estado de equilibrio
 - Respuesta a un par externo (ej: impacto, viento solar, ...)
 - Estabilidad y posibles estados oscilatorios

SIMPLE SPIN
gira todo



DOBLE SPIN
plataforma fija (antenas)



TRIPLE SPIN
- antenas fijas
- placas solares hacia el sol



Subsistema TT&C

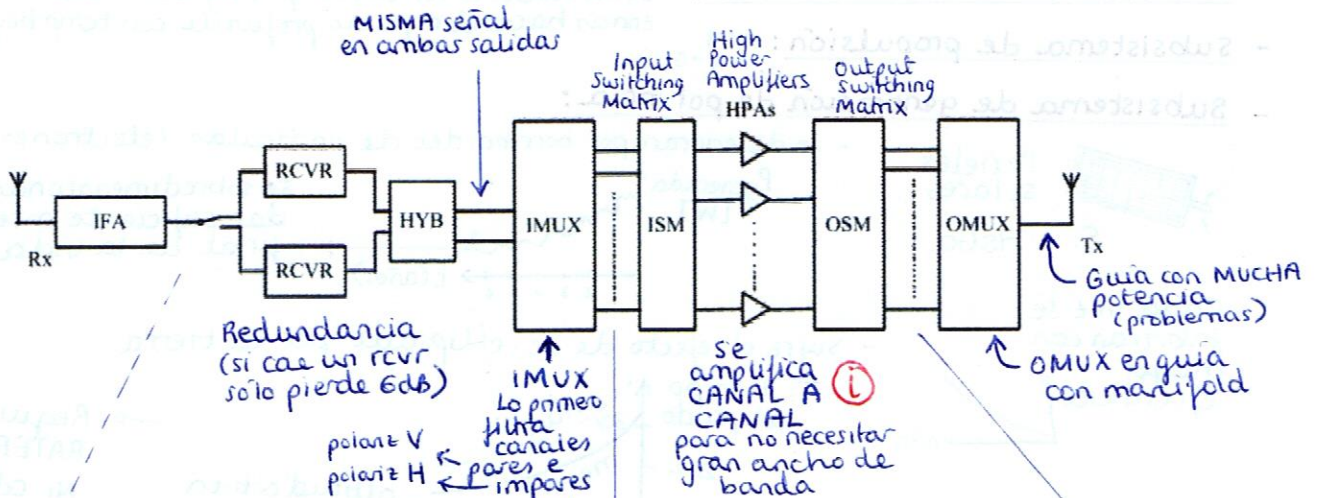
- Telemetría: downlink. Info de sensores
- Telecomando: uplink. comandos al satélite
- Tracking: up y down. Radiobalizas (tono puro)

sistema común
- poco ancho de banda (500-2000 bps)
- PSK, FSK

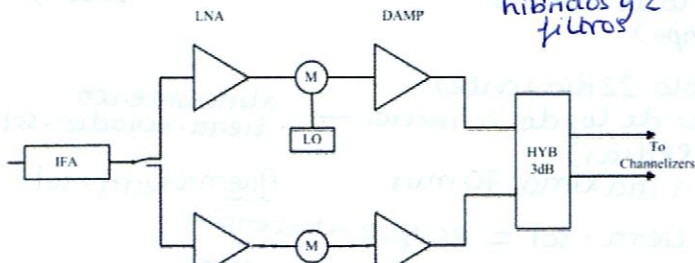
funcionamiento NOMINAL
- antena global de derecha banda S
funcionamiento CRÍTICO
- antenas omnidireccionales banda C

• Carga útil

Antenas (receptoras y transmisoras)
 Repetidor de microondas → transparente / bent pipe (no demodula)
 → regenerativo (corrige errores)

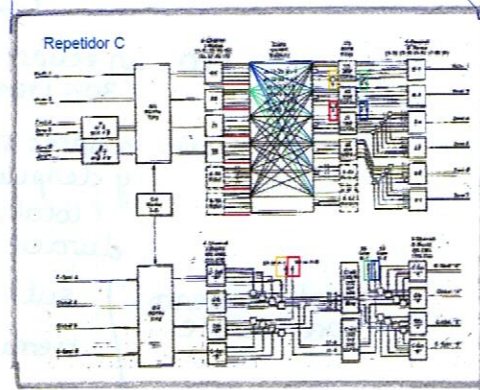


Detalle del receptor:



Pasa directamente a la frec. de bajada (o a IF)

También puede usarse conversión doble (frec. intermedia) para que la amplificación de todos los canales se haga en IF (ej. matriz en banda C)



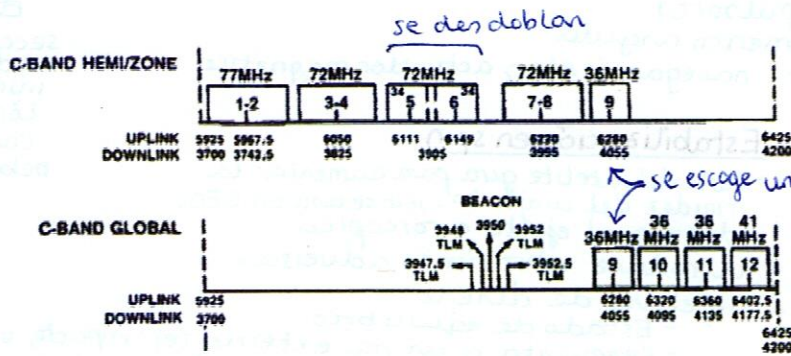
Matriz de conmutación ESTÁTICA

Los amplificadores pueden ser

- TWT: tubos de onda progresiva
- SSPA: amplif. potencia en estado sólido

→ solo bajas frec. (banda C, no K)
 → más lineales y compactos
 → semiconductores

Plan de Frecuencias



Conversión simple: $f_{up} \rightarrow f_{down}$ (OMUX, HPAs, OMUX)

Conversión doble: $f_{up} \rightarrow f_{IF}$ (OMUX, HPAs, OMUX) → f_{down}
 ↑
 oscilador a la salida

ejemplo: Si la matriz funciona en banda C,
 si f_{down} = banda C → conv. simple
 si f_{down} = banda K → conv. doble

TEMA 2. DISPOSITIVOS PASIVOS

2.1. FILTROS DE MICROONDAS

Especificaciones

IMUX:

- Mucha selectividad (abruptos)
- Pérdidas de inserción no críticas

OMUX:

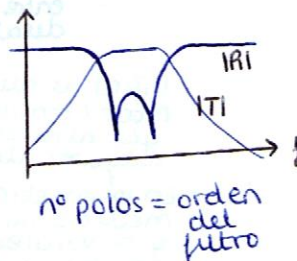
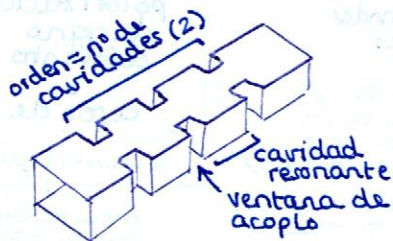
- Pérdidas de inserción mínimas ($< 0.3 \text{ dB}$)
- Manejo de 10W a 100W por canal

Otras especificaciones

- Rechazo de canales adyacentes alto
- Variación baja de IL
- Retardo de grupo $< 2 \text{ ns}$ en el 70% del BW y $< 20 \text{ ns}$ en extremos
- Margen de temperaturas ($0^\circ \text{ a } 50^\circ \text{ C}$)

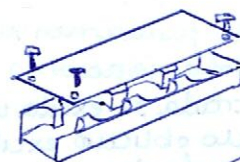
Implementaciones

Filtro de cavidades acopladas



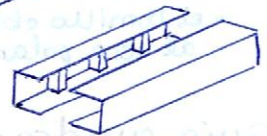
→ 2 técnicas de ensamblado:

• plano H: cuerpo y tapa



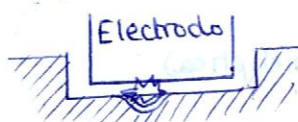
que haya buen contacto para no cortar corriente

• plano E: dos mitades



↳ Fabricación

• Electroerosión



- es muy precisa pero costosa

- Electroerosión por hilo elimina la necesidad de darle forma a la herramienta



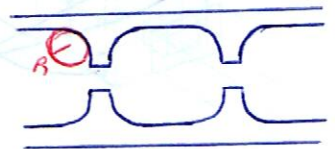
- mecaniza con precisión
- se arranca material conductor con descargas eléctricas

• Fresado

- una fresa perfora la pieza

- esquinas redondeadas

reducir el volumen de la cavidad
↓
subir freq de resonancia



↳ Elementos de sintonía

Tornillo en las cavidades

ajustar f_0 (T_p perturbacional)

Tornillo en las ventanas de acoplamiento

ajustar el acoplamiento y por tanto el AB

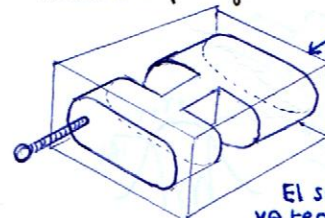
Inconvenientes:

- Vibraciones en el lanzamiento las modifican
- Empeoran los efectos de altas potencias

↳ Materiales más ligeros

- Filtro en Fibra de Carbono
- Filtro con magnesio (50% peso)

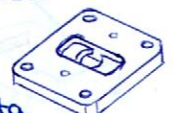
• nueva topología con esquinas redondeadas



planos de corte

Detalles de pieza

El software ya tenía en cuenta las esquinas redondeadas



↳ Material: Invar

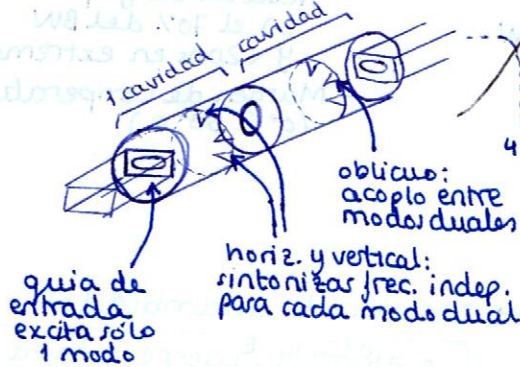
- más pesado que el aluminio
- Bajo coef de expansión con la temp (rango grande de temp)

Filtros de Modo Dual

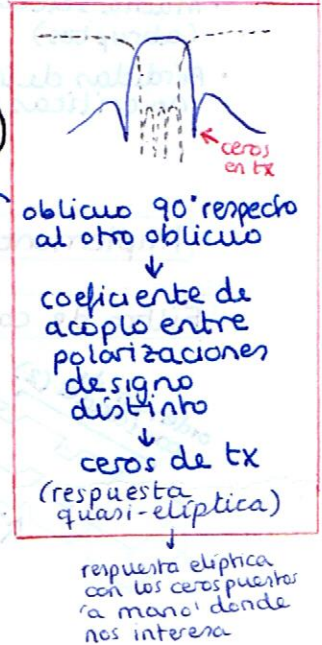
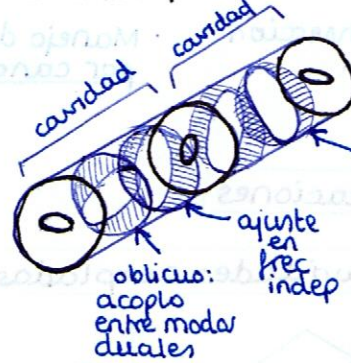
- Suelen usarse para los filtros de canal (banda estrecha 24-120 MHz)
- Intenta compactar al máximo peso y volumen
- En cada cavidad resuenan 2 modos (filtro de orden N con $N/2$ cavidades)
 - Son 2 modos degenerados (frec cercana pero distrib de campo muy diferente)
- Excitar uno u otro modo a la entrada y hacer que se excite el otro con un elemento oblicuo
 - casi siempre respuesta Chebyshev o elíptica

Guía circular

↳ con elementos de sintonía



↳ con iris elípticos

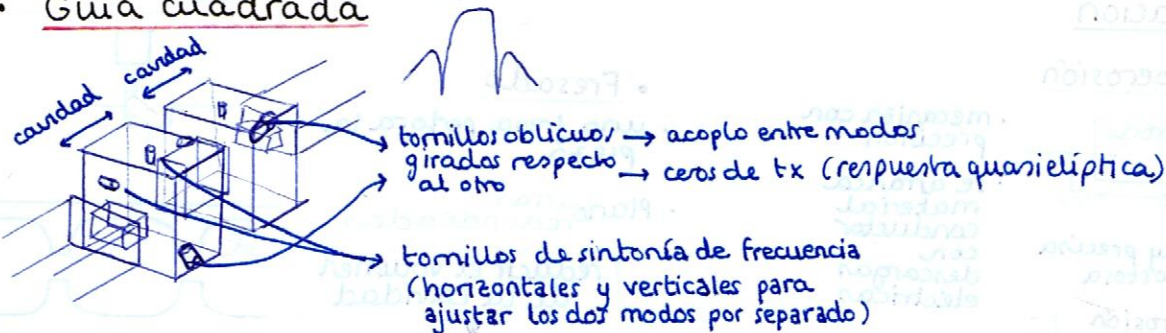


TE₁₁: modo fundamental de las polarizaciones

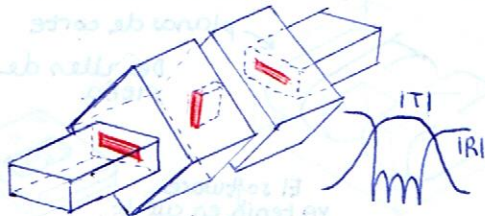
- a la entrada se excita uno
- el tornillo oblicuo excita al otro polarización

- Difícil de alinear y rotar (tornillo tenía que atravesar para asegurar alineamiento)
- En la práctica la medida no era buena y se volvieron a los tornillos de sintonía

Guía cuadrada



- ¿cómo conseguir acoplo a los dos modos sin tornillo oblicuo?
- que la guía de entrada excite directamente los dos modos

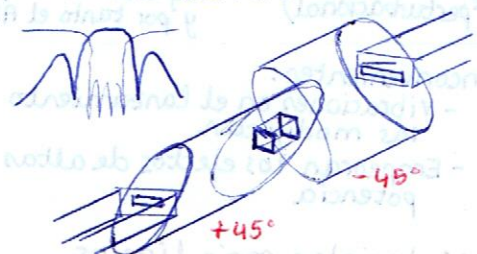


¿cómo conseguir ceros de transmisión?

Girar una cavidad +45° y la otra -45°

Guía elíptica

otro esfuerzo de acoplo sin elementos de sintonía



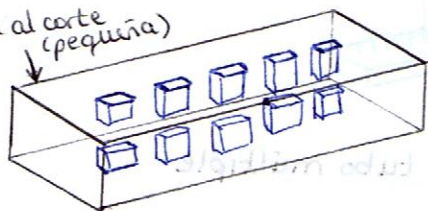
Filtros de Modo Evanescente

- Intentar reducir al máximo el volumen del componente (dimensiones pequeñas)
- Modo fundamental al corte en la frec. resonancia del filtro
- Se introducen RIDGES (inserciones metálicas en el centro de las guías) que localmente bajan la frecuencia de corte del modo fundamental.
- Por tanto pueden existir resonancias
- Si están suficientemente juntas se logran acoplar entre sí

Pueden ser paso banda o paso bajo

→ Simétrico: con ridges arriba y abajo

guía al corte (pequeña)

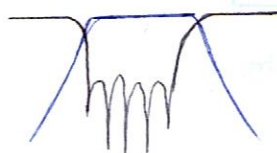


respuesta muy sensible al desalineam.

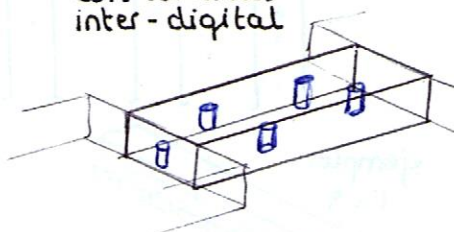
→ Asimétrico

inserciones metálicas sólo en un lado.

mucho menos sensible

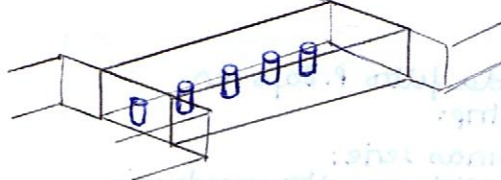


con tornillos inter-digital



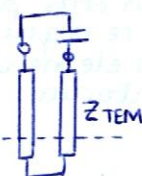
Comb-line con tornillos

inserciones cilíndricas ajustables

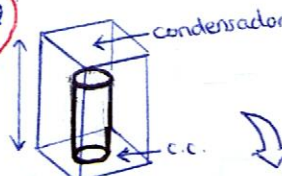


Filtro con resonadores coaxiales (comb-line)

Resonadores coaxiales
2 conductores
Modo TEM



$$\frac{\lambda_g}{4}$$

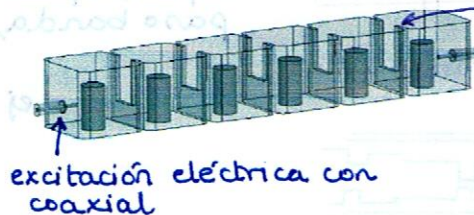


alta concentración de campo eléctrico

cavidades en cascada
cada cavidad un polo

Acoplamientos laterales
Acoplando cavidades adyacentes se logran ceros de transmisión

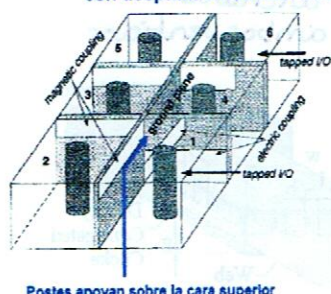
Deben haber "acoplos de signo contrario" (en este ej usando pared inferior)



acoplo eléctrico entre cavidades (ventanas de acoplo)

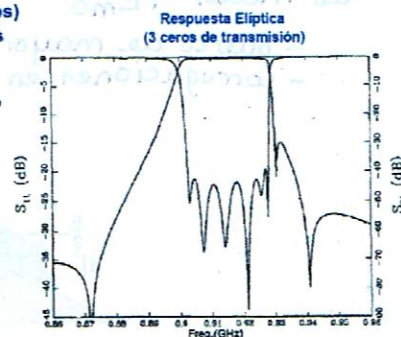
Para mayor AB puede requerirse mayor acoplamiento entre cavidades (con sondas y sondas tipo champiñón)

Filtros de 6 Cavidades (6 polos)
con acoplamientos laterales



Postes apoyan sobre la cara superior

Tiene dos tipos de acoplo (magnético y eléctrico) → ceros de tx



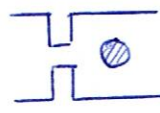
Estacion base 915 MHz

Tipos de excitación

Puerto discontinuidad



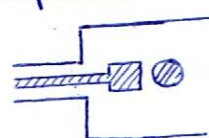
Puerto iris



Coaxial



Sonda tipo champiñón

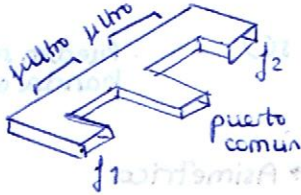


mayor ancho de banda

Diplexores y Multiplexores

Topologías mas clásicas
(Ku (12-18GHz), 38GHz,...)

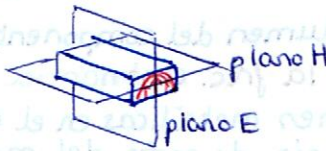
ej: diplexor en plano H
uniones T en plano H



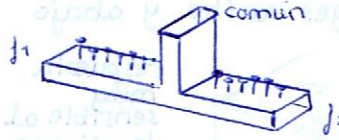
ej. diplexor en plano E



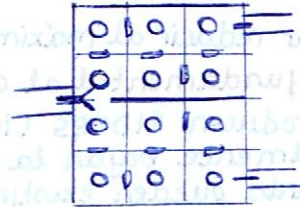
Recuerda:



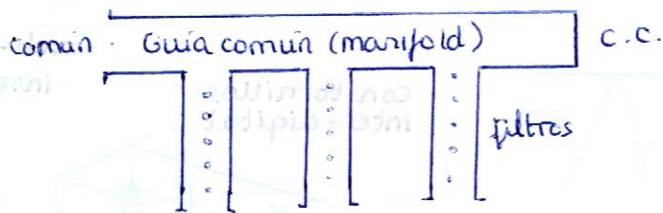
ej: diplexor con unión T plano E



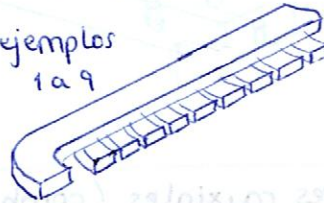
Diplexor comb-line en banda S (2-4GHz)



• Manifold o tubo múltiple

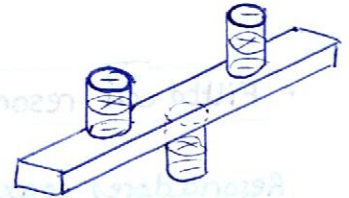


ejemplos
1 a 9



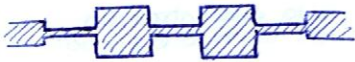
Los distintos
accesos interactúan
unos con otros, por
lo que se requieren
muchos elementos
de sintonía

ejemplo: 1 a 3 con
filtros en modo dual



Recuerda filtro P. Bajo en
microstrip:

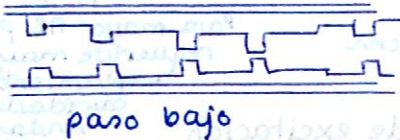
- bobinas serie:
microstrip con alta impedancia
- condensador paralelo:
microstrip con baja impedancia



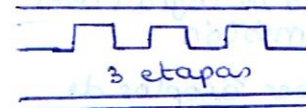
Filtros Corrugados

→ Respuesta paso bajo (desde la frec. de corte),
paso banda, o banda eliminada

Concepto similar: variar altura
de la guía

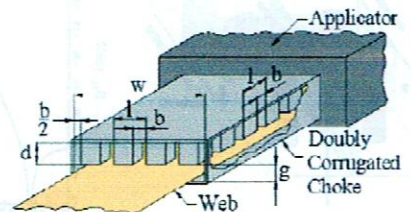


ej: banda eliminada 2'45 GHz



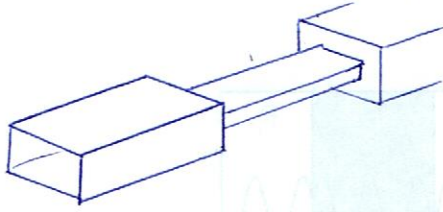
ej: banda eliminada para todos
los modos TEMo

- puerto de mayor anchura
- corrugaciones en ambos sentidos



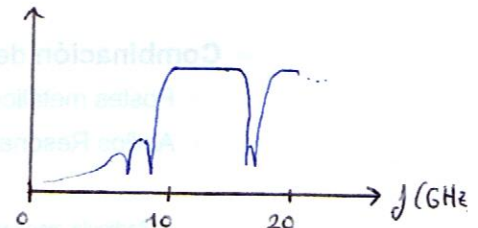
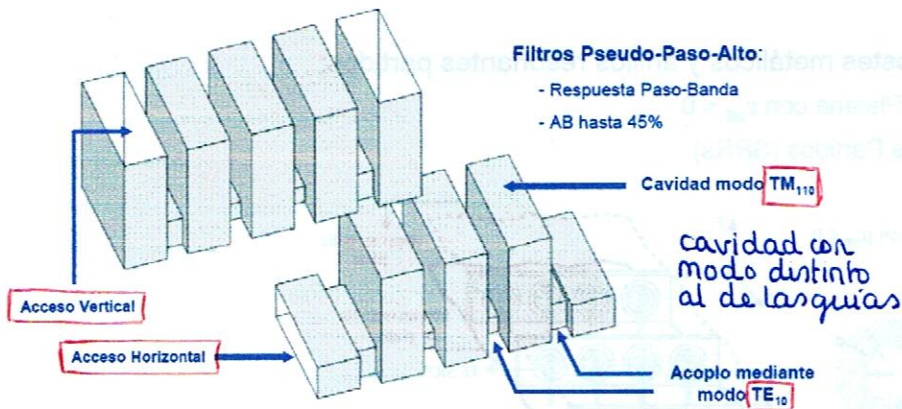
Filtros Paso Alto

- Basados en tramos de guías al corte



- Pueden requerir adaptación

- Pseudo-Paso-Alto: Paso banda con gran ancho de banda (45%)

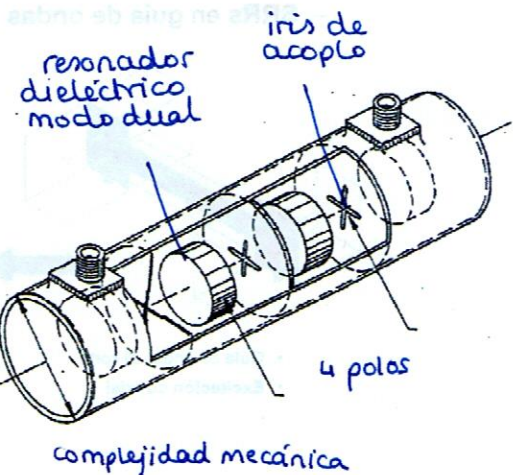
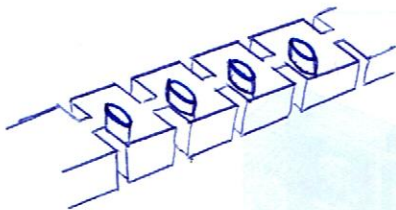


Tendencias futuras

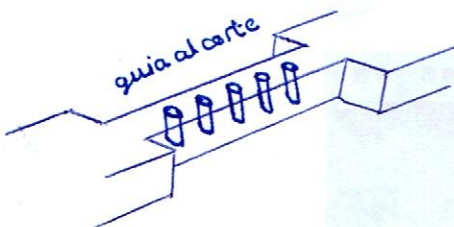
→ Filtro con resonadores dieléctricos

- Insertar pastillas dieléctricas $\epsilon_r \sim 40, 70$ para bajar la frec de resonancia
- Resonadores dieléctricos pueden ser en modo dual

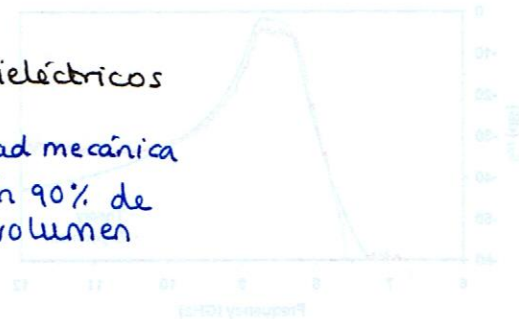
→ Cavidades acopladas con resonadores dieléctricos



→ Modo evanescente con resonadores dieléctricos



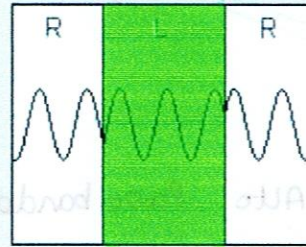
- simplicidad mecánica
- reducción 90% de masa/volumen



Filtros basados en metamateriales

Medios Zurdos (Left-Handed Media)

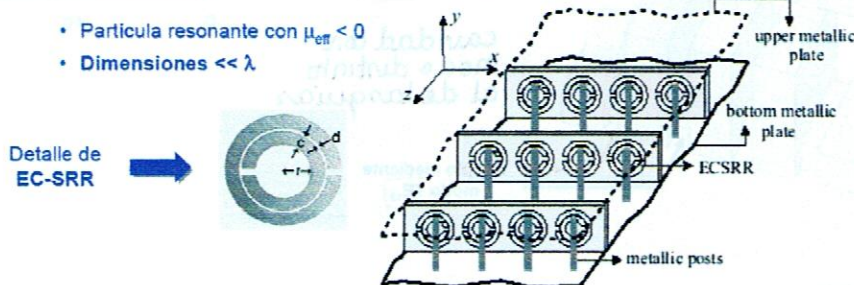
- $\epsilon_{\text{eff}} < 0$ y $\mu_{\text{eff}} < 0$
- Vectores de onda y Poynting anti-paralelos
- Índice de refracción negativo
- Velocidades de fase y grupo con signo opuesto
- Se ha observado propagación electromagnética



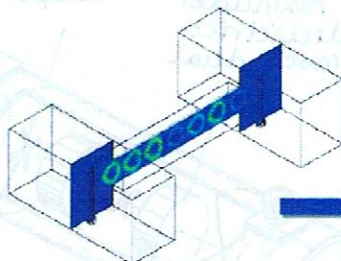
Combinación de postes metálicos y anillos resonantes partidos:

- Postes metálicos: Plasma con $\epsilon_{\text{eff}} < 0$
- Anillos Resonantes Partidos (SRRs)

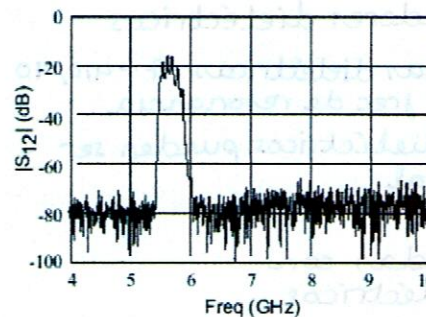
- Partícula resonante con $\mu_{\text{eff}} < 0$
- Dimensiones $\ll \lambda$



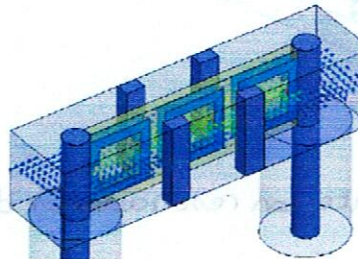
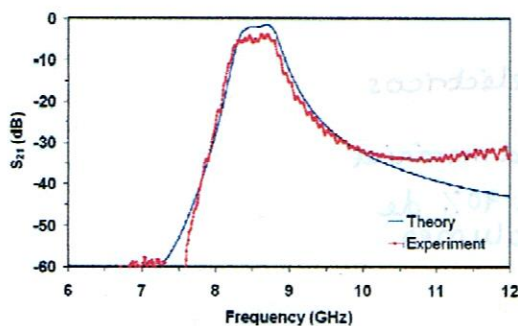
SRRs en guía de ondas al corte (evanescente):



- Guía de ondas al corte
- Excitación coaxial



Excitación mediante coaxial



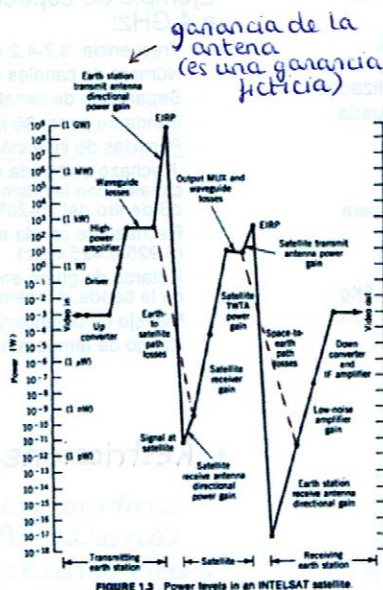
2.2 MULTIPLEXORES DE ENTRADA/SALIDA

6

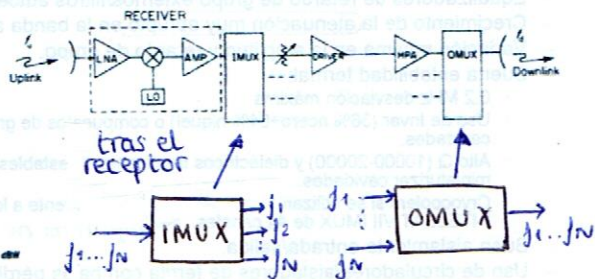
Variaciones de potencia

- Señal típica: 1mW
- PIRE de estación terrena: 1GW
- Recepción en el satélite: 1nW
- Transmisión desde satélite: 1kW
- Recepción en la tierra: 10^{-17} W

$$L_{prop} = 200\text{dB}$$



Localización IMUX/OMUX

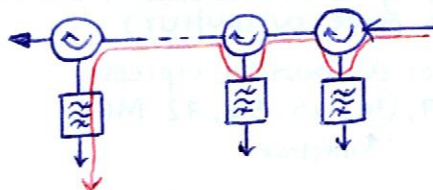


- separa todo el ancho de banda en canales
- El ancho de banda de los filtros DEFINE los canales

IMUX

Topología modular circulator/filtro

la más usada en satélites



FIJATE que el último canal ha sido reflejado por todos los anteriores filtros

- Es un problema ya que exige que los filtros de canales adyacentes tengan un S11 muy selectivo!
- Solución - separar canales pares e impares

El canal adyacente no nos roba potencia

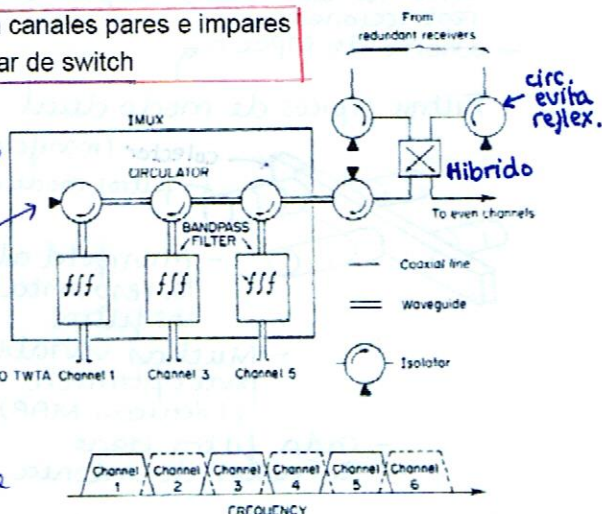
- Separación en canales pares e impares
- Híbrido en lugar de switch

Divide la señal total en 2 iguales a -3dB

carga adaptada disipa la mitad de potencia de los canales pares!!

pérdida de 3dB

- Las pérdidas no son importantes, ya que en el IMUX aún falta amplificar.
- Pero interesan pérdidas planas

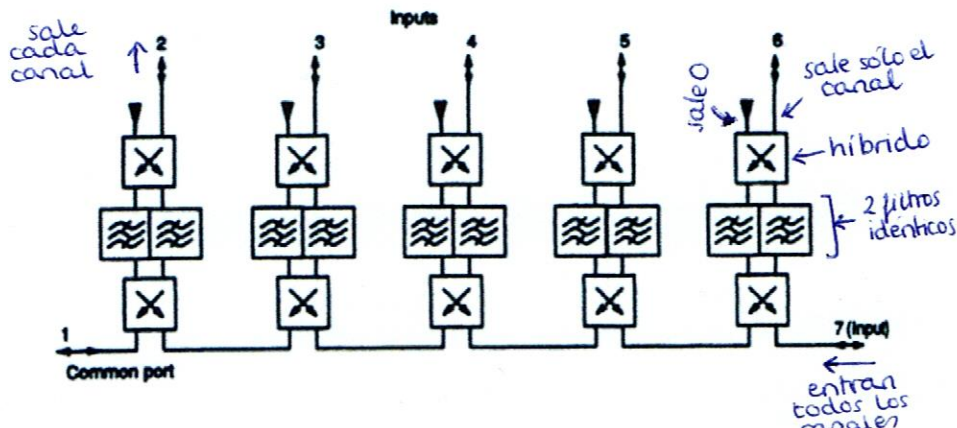


Ventajas: - totalmente modular

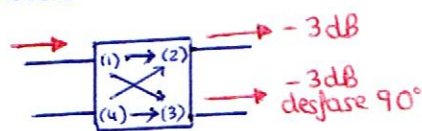
Desventajas: - pérdidas circulator (material ferromagnético 0.2dB de pérdida)

- pérdidas de filtros
- cada canal tiene distintas pérdidas
- circuladores son VOLUMINOSOS

Alternativa: filtro direccional (nos ahorramos los circuladores)



Recuerda: híbrido



Acoplamiento $C = -20 \log |S_{31}|$ (3dB)

Aislamiento $I = -20 \log |S_{11}|$ (∞ dB)

Directividad $D = 20 \log \left| \frac{S_{31}}{S_{11}} \right| = I - C$

ejemplo características IMUX:

- Anchos de banda típicos: 27, 36, 45, 54, 72 MHz (no standard)
- **Filtros de banda estrecha: 0.3-2%**
- Uso de filtros en modo dual cuasi-elípticos (orden 8, 2 **ceros** equalizados). *mejor o más compacto*
- Equalizadores de retardo de grupo externos/filtros autoequalizados
- Crecimiento de la **atenuación muy abrupto** en la banda atenuada.
- Variación mínima en la amplitud y retardo de grupo.
- Buena estabilidad térmica:
 - 0.2 MHz desviación máxima
 - Uso de Invar (36% acero+64% níquel) o compuestos de grafito para cavidades.
 - Alto Q (10000-20000) y dieléctricos térmicamente estables para miniaturizar cavidades.
 - Cryocoolers si se utilizan superconductores. 5Kg frente a los 18.5Kg INTELSAT VII IMUX de 44 canales. *ingenieros no se fían*
- Buen aislamiento entrada/salida.
- Uso de circuladores/aisladores de ferrita con bajas pérdidas.

ejemplo características OMUX

Ejemplo de especificaciones típicas de filtros del OMUX a 4 GHz:

- Frecuencia: 3.7-4.2 GHz
- Número de canales RF: 12
- Separación de canales: 40 MHz
- Banda de paso: 36 MHz
- Pérdidas de inserción en la banda de paso: **minimas (<0.2 dB)**
- Rechazo en banda estrecha: 5-10 dB en el borde de la banda de canales con la misma polarización adyacentes. Aumentando a 20-30 dB dentro del 15-20% de la banda de paso más cercana al borde.
- Rechazo de banda ancha: >30-35 dB sobre la banda de recepción (5.925-6.425 GHz)
- Retardo de grupo en la banda de paso: <1-2 ns sobre el 70% central de la banda. Aumenta hasta 10-20 ns en los bordes
- Manejo de potencia: **10-60 Watts por canal**
- Rango de temperaturas en operación: **0° a 50°**



• OMUX

Características:

Diseño mucho más crítico

- **Manejan mucha potencia** (de TWTA's)
- ↳ necesitan tecnología guiada

- **Muy bajas pérdidas** (ya vamos a tx!)

- revestidos para disipar mejor potencia
- usar canales alternos para disminuir restricciones
- ahorro de espacio

• Filtros típicos de modo dual



- Manifold altera la respuesta de los filtros

- Muchas variables para optimizar (técnicas ASM) *mapeado espacial agresivo*

- cada filtro tiene tornillos de sintonía

- Filtros single terminated (con la menor resistencia de carga posible para no sumar resistencia en serie en el colector)

• Restricciones a nivel de sistema

- combina potencia de un número de canales RF
- con pérdidas mínimas para transmisión a través de una ÚNICA ANTENA
- canales RF pueden ser contiguos o no
- No sólo debe sumar las señales de sus entradas, debe filtrar cada canal antes de sumarlos para eliminar ruido y no linealidades de los HPA (high power amplifiers)

• anchos de banda típicos:

27, **36**, 45, 54, 72 MHz

↑ *Intelsat*

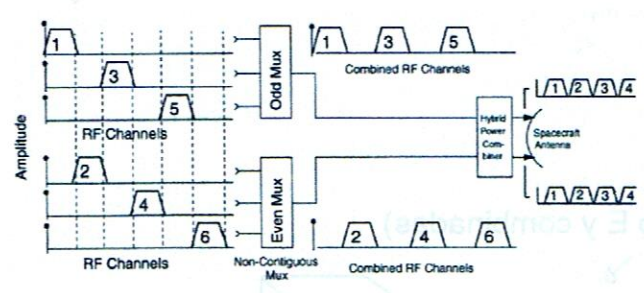
• Restricciones del diseño

- Capacidad de manejar alta potencia
- Pérdidas de inserción mínimas
- supresión de ruido fuera de banda
- supresión de armónicos fuera de banda
- filtros de banda estrecha (0.3-2%)
- a muy elevado (~20000), bajas pérdidas
- Buena estabilidad térmica (0° a 50°)
- Diseño térmico para eliminar calor disipado
- Prevención del multipactor (*crítico en alta pot.*)
- Prevención del PIM (Passive Intermodulation)

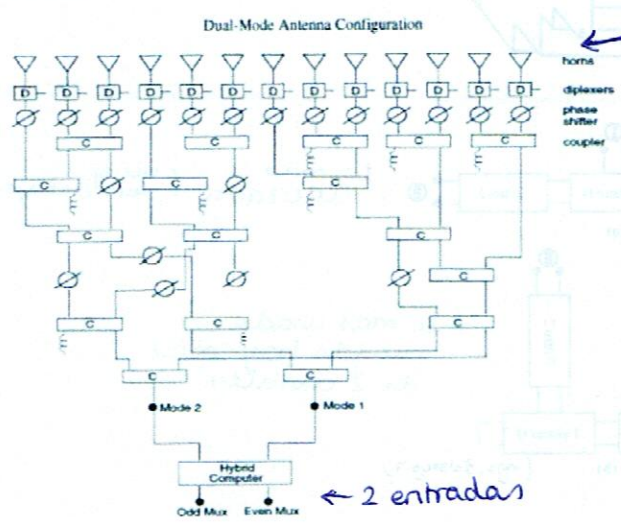
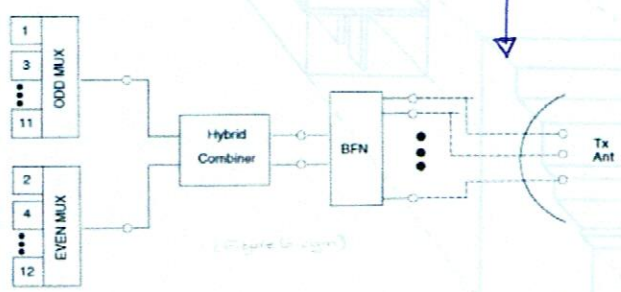
Arquitecturas OMUX: canales contiguos o no contiguos

No contiguos

- Uso 2 OMUX (uno para canales pares y otro impares)
- ↳ restricciones relajadas
- ↳ mitad de potencia
- ↳ antena de entrada dual (mañ difícil de hacer el BFN)

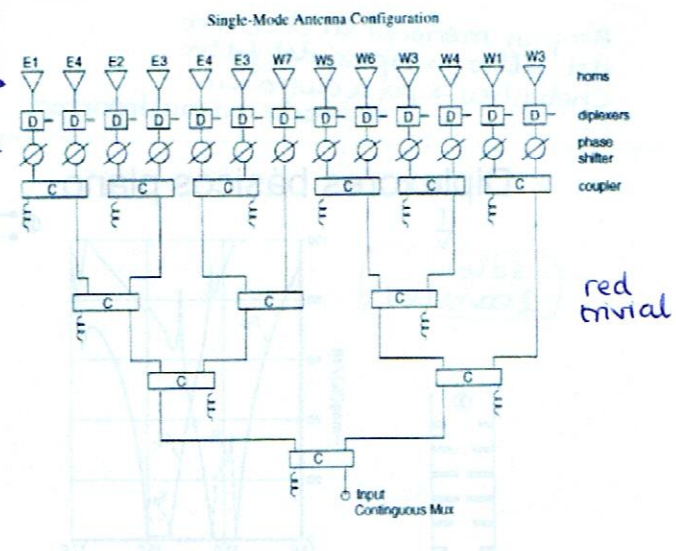
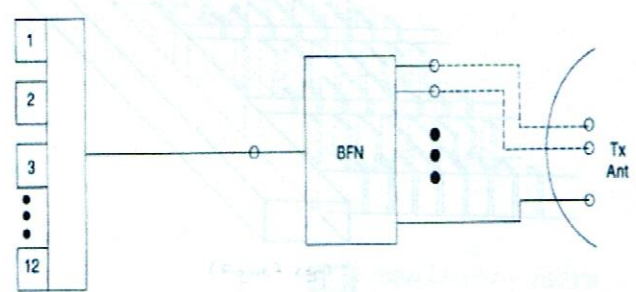
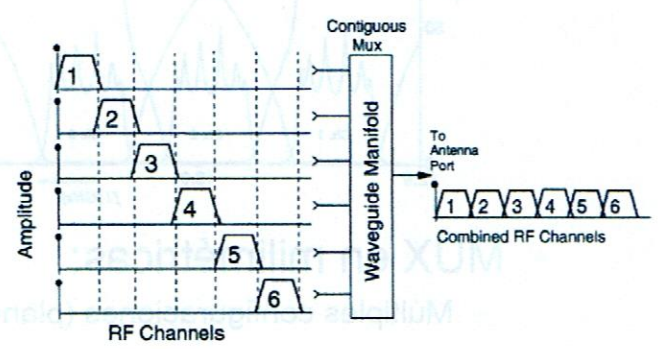


Antena Dual



Contiguos

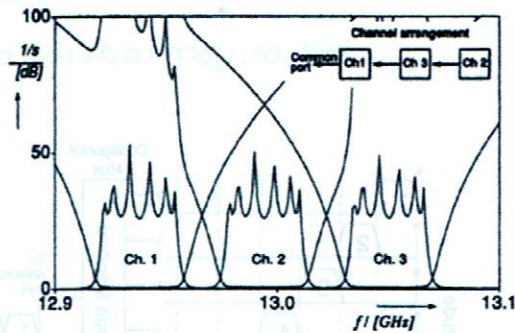
- Todos los canales con el mismo OMUX
- Antena (red BFN) mañ sencilla



red trivial

Respuesta típica I/OMUX (triplexor):

- Canales adyacentes en la misma cadena son importantes
- La optimización de muchas variables es fundamental



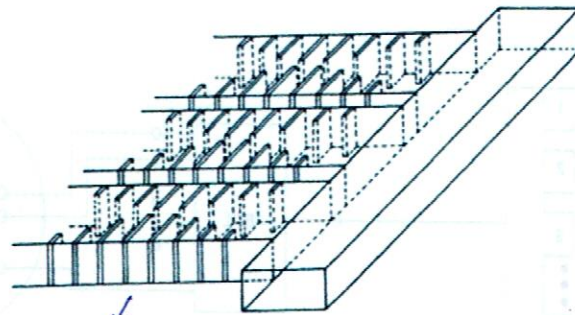
muchas variables

k (nº de dimensiones de cada cavidad)
 $\times N$ (orden del filtro)
 $\times M$ (nº de filtros)

MUX en milimétricas:

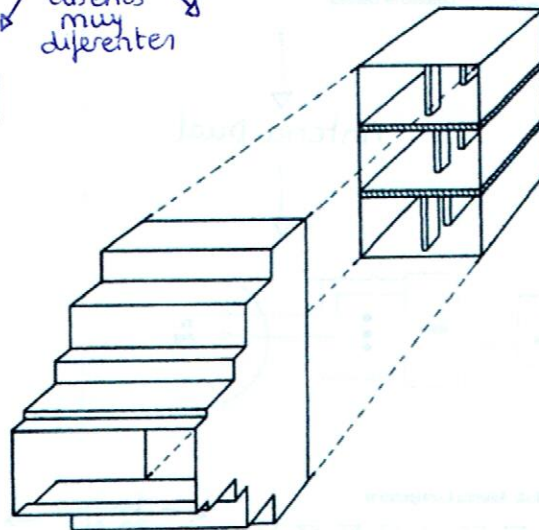
- Múltiples configuraciones (plano H, plano E y combinadas)

diseños muy diferentes



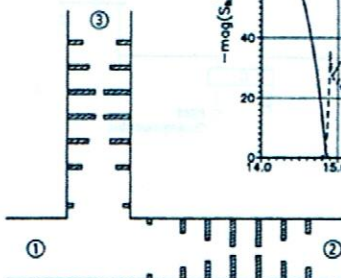
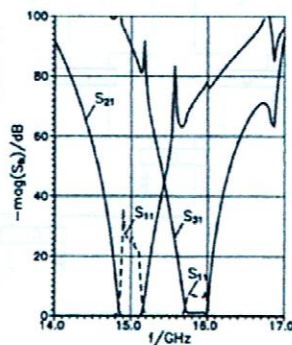
irises inductivos

Acoplos menores en el centro del filtro $\rightarrow$ típico del filtro Chebyshev $\rightarrow$ poca distancia cuidada con multipactor

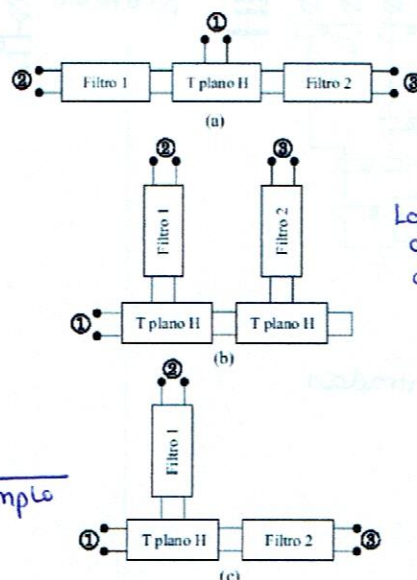


Diplexores básicos plano

solo 2 canales



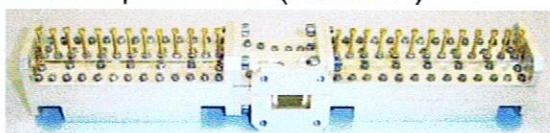
ejemplo



La más utilizada (ver el dibujo)

Lo más usado cuando hay más de 2 canales

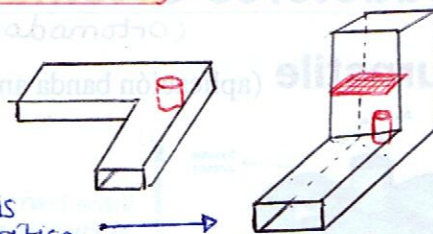
Diplexor Hispasat 1-C (banda K)



2.3 CODOS, DIVISORES, GIRADORES Y ORTOMODOS

CODOS

- Recto en plano H: compensar con poste no centrado
- Recto en plano E: compensar con poste + iris posición del poste no crítica
- Biselados:
 - biselados óptimos (t/a) (d/b)
 - biselado con 2 o más etapas
 - biselado con saltos
- Ángulo arbitrario: - biselador o no
- Circulares: - adaptar con diafragma capacitivo



Híbridas

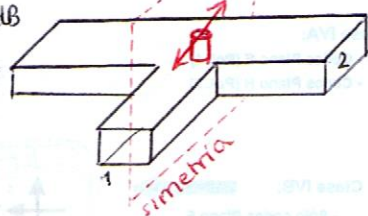


UNIONES

Unión T plano H

- compensar con poste moviéndolo delante - detrás pero mantener la simetría

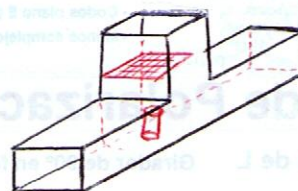
ideal:
 $S_{11} \rightarrow -\infty$ dB
 $S_{31} \rightarrow -3$ dB



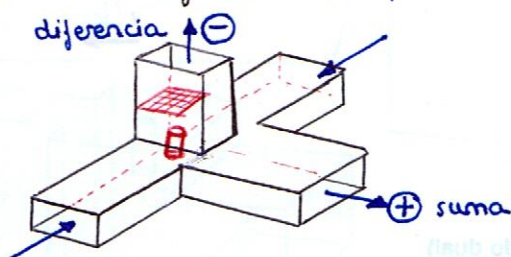
funcionar muy mal sin compensar

Unión T plano E

- compensar con poste + iris posición no crítica

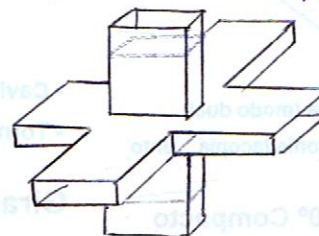


Unión T mágica: compensar con poste + iris



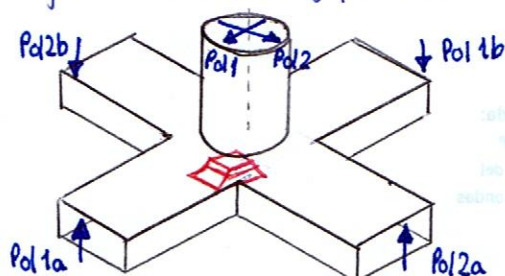
Unión de 6 puertos

difícil de compensar porque no hay base sobre la que colocar los postes



Unión turnstile

- compensar con poste (centrado para mantener la simetría)
- ajustar tamaño y forma



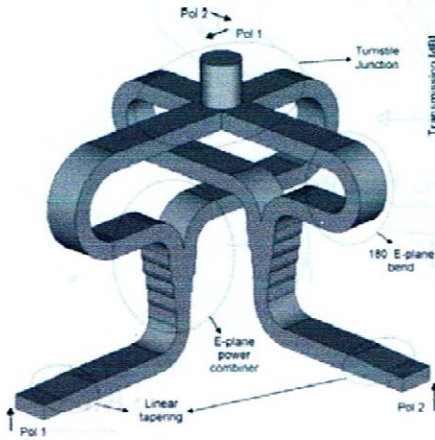
Si la guía sup. es CUADRADA ($a=b$) compensar con pirámide

- cambio en la orientación del campo por las salidas (cambio fase 180°)

Transductores Ortomodales

(Ortomodos)

Con Turnstile (aplicación banda ancha)



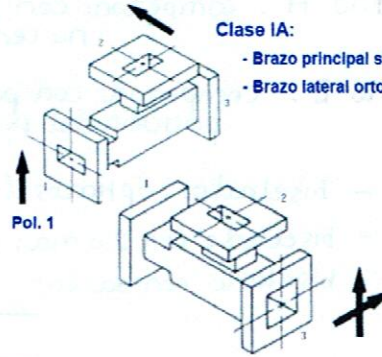
Viene bien que el turnstile desfase 180° porque luego se suman en fase

Clase I.-

- Estructura Simétrica para Pol. 1
- Estructura Asimétrica para Pol. 2

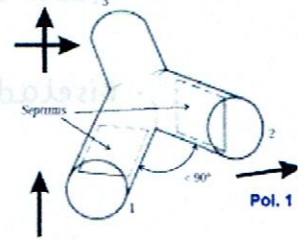
Clase IA:

- Brazo principal sin codos
- Brazo lateral ortogonal



Clase IB:

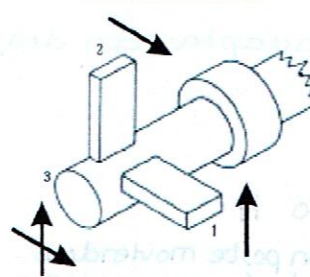
- Brazos NO ortogonales



Clase III.- Dispositivos Asimétricos

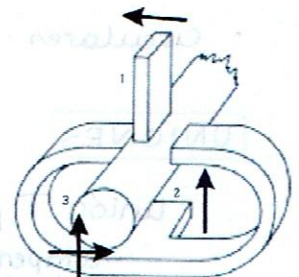
Clase IIIA:

- Asimetría en ambos modos
- Ancho de banda limitado



Clase IIIB:

- Simetría para un modo



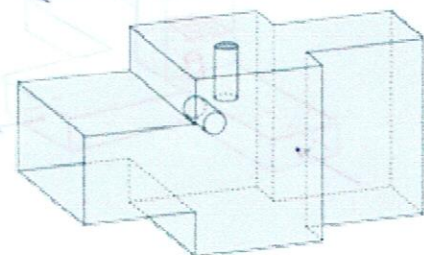
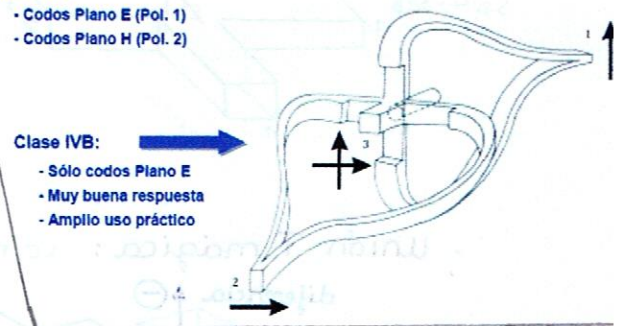
Clase IV.- Partes Simétricas en brazos principal y lateral

Clase IVA:

- Codos Plano E (Pol. 1)
- Codos Plano H (Pol. 2)

Clase IVB:

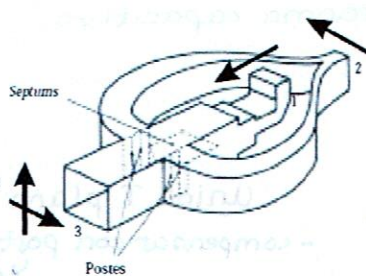
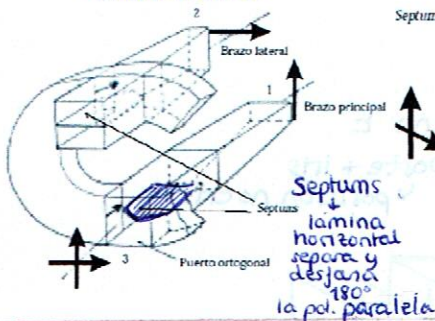
- Sólo codos Plano E
- Muy buena respuesta
- Amplio uso práctico



Clase II.- Estructura Simétrica para Pol. 1 y Pol. 2

Clase IIA:

- Codos en plano H
- Complejos y costosos



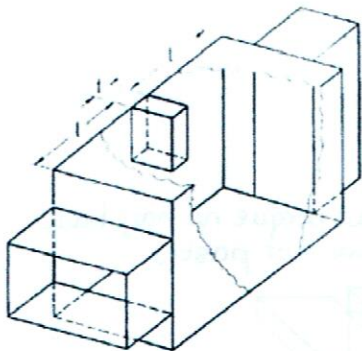
Clase IIB:

- Codos plano E (brazo lateral)
- Menos complejos

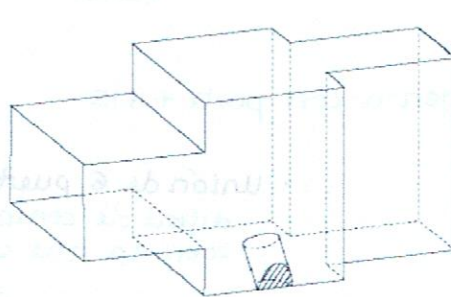
Giradores de Polarización

Girador de 90° en forma de L

Girador de 90° en forma de L con Tornillo

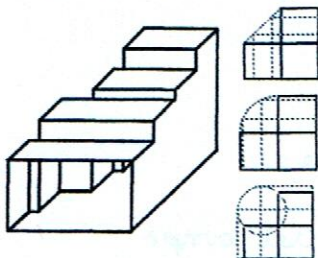


- Cavidad cuadrada (modo dual)
- Elemento de sintonía (acoplamiento)



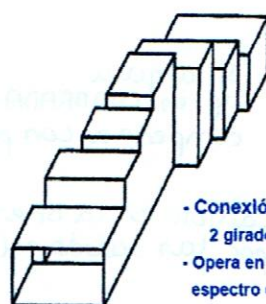
- Cavidad cuadrada (modo dual)
- Tornillo de sintonía (acoplamiento)

Girador de 90° Compacto



- Sólo guías rectangulares (fácil fabricar)
- Dispositivos muy cortos (compactos)
- Guías de diferente sección transversal

Girador de 180° Compacto



- Conexión en cascada: 2 giradores de 90°
- Opera en la parte baja del espectro de la guía de ondas

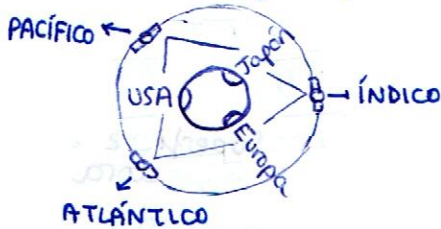
TEMA 3. ANTENAS DE SATELITE

9

3.1 SISTEMAS

Sistemas de Comunicaciones espaciales

Radio relay in space



• Órbita GEO stationary: 36 000 km, 24 h stationary from earth

• Órbita baja: LEO, 1-2 h

Meteorológicos → Órbitas bajas para hacer pasadas

↳ principalmente ópticas aunque el radar permite atravesar nubes

GEO: posiciones orbitales muy juntas ~ 3°

En cada posición puede haber muchos satélites (el usuario los ve como uno; ej: ASTRA)

Ventajas de órbita baja:

- 100% cobertura
- Reducción de PIRE
- Menor retardo
- Reducción de ganancia/ temp. en usuario
- Reducción del tamaño de la antena

Antenas de comunicaciones

• Allocated / regulated frequencies ranging 0.1 to 200 GHz

• Tamaño máximo del reflector → tamaño mínimo del haz (continentales)

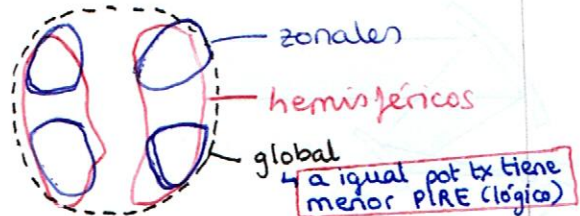
Haces múltiples:

Bandwidth increased (power is divided among the beams and the bandwidth remains constant for each beam)

Interesa:

- low side-lobes
- low cross-polarization between beams

forman pensadas para ser válidas en varias posiciones orbitales



• 3 tipos de antenas:

- reflector ← el más simple y maduro en satélites.

- lente

- phased array

Desventaja: requiere offset del feed, destruye rotational symmetry, limits the range of scan

Agrupaciones

Ventajas: - distribution of power at elementary radiation level
- higher aperture efficiency
- no spillover loss, no aperture blockage
- better reliability

Desventajas: - peso
- complejidad
- pérdidas en el feeding network
- how to best configure radiating elements, active devices, feed network, integration, heat dissipation

• Amplificadores de estado sólido:

phased arrays can improve overall power efficiency

Haz conformado en reflectores

• Array of feed elements (each element a beam)

Reflectarray



1 dB menos en Canarias porque lleva menos

• Otra opción: abollar los reflectores

Datos intelsat 704

5 canales de TV digital

Transpondedores:

- Banda C: 42 (equiv 36 MHz) → circular ↺ y ↻

- Banda Ku: 20 (equiv 36 MHz) → lineal → y ↑

n° de transpondedores

1 canal TV en FM analógica

UP: 5925-6425 MHz
DOWN: 3700-4200 MHz

UP: 14-14.5 GHz
DOWN: 11.45-11.70 GHz

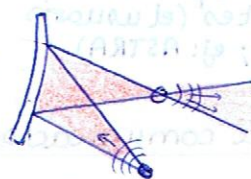
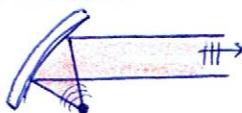
Configuración de antenas multihaz

Tipos de Reflector

PARABÓLICO: esférica → plana

HIPERBÓLICO: esférica → esférica con el origen al otro lado

ELÍPTICO: esférica → esférica con origen al mismo lado



Superficie reflectora

- sólido
- de hilo (enhances purity of linear polarization)
- de rejilla (fácil de plegar)

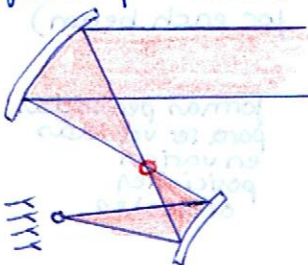
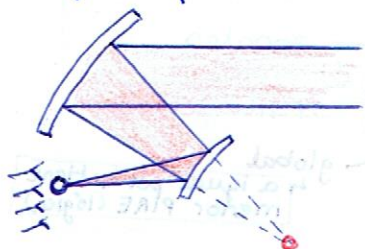
Configuraciones:

CASSEGRAIN:

- subreflector hiperbólico
- reflector parabólico

GREGORIANA

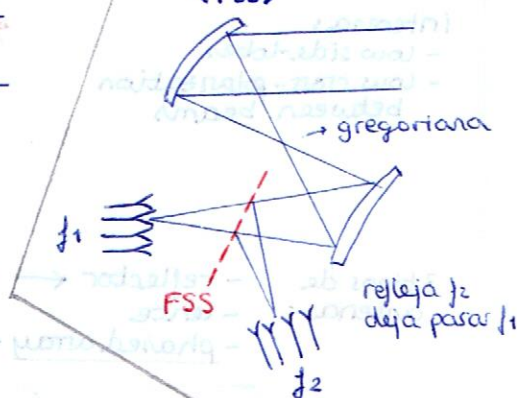
- subreflector elíptico
- reflector parabólico



Agrupación de bocinas

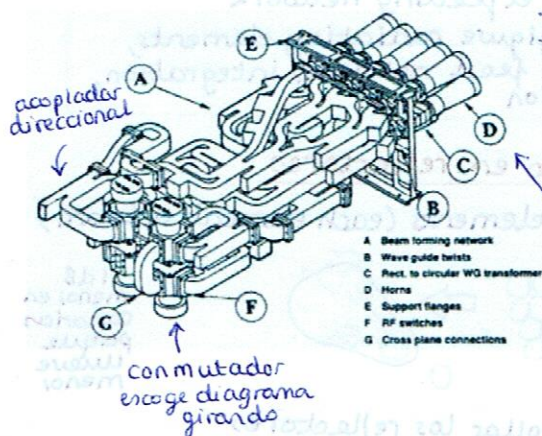
ej: Intelsat

SUPERFICIES SELECTIVAS EN FRECUENCIA (FSS)



Beam feeding networks

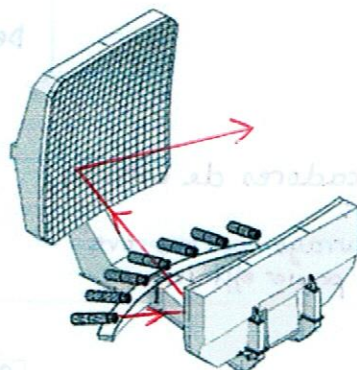
- Dar la amplitud y fase adecuada a cada bocina
- Fase se consigue con longitud de guía → limitación en ancho de banda
- La suma y resta de señales se hace con acopladores direccionales



Muy complejo
coef. teóricos a reales no es fácil
(coupling between elements, etc...)

la agrupación suele, más o menos, seguir la forma del continente

Antenas multihaz estación base



misma antena en tierra ilumina a varios satélites ej ASTRA

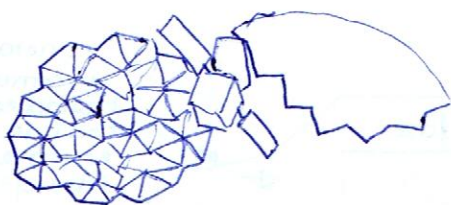
otro ej: TV satélite conmuta polarización {H, V}, frecuencia {bajo, alto} según se lo ordene el set top box

3.2 DESPLEGABLES E INFLABLES

• Paraguas:

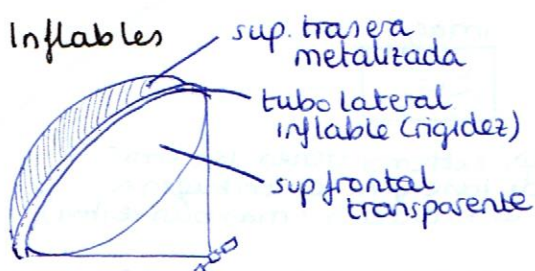
• agencia japonesa

• aún no está acabada la idea final



- Lucha entre ing. antenas (tolerancias pequeñas $\lambda/20$) e ing. mecánicas
- Al final tolerancias $< 1\text{mm}$
- Durante las medidas la gravedad afecta a la deformación de los elementos $\rightarrow$ se compensa sujetando con hilos

• Inflables



• Superposición de pétalos



Cubriría $\frac{1}{2}$ Europa en banda C

Problema grave: pinchazos por meteoritos
Solución: plástico que se endurezca con el sol en poco tiempo (riesgo) para no depender del gas dentro

3.3 ANTENAS TT & C

Telemetría: medida a distancia de los parámetros (estado) del satélite

Tracking: permitir localizar al satélite desde la tierra (radiofaro)

• Poder el satélite apuntarse hacia la tierra

Control: órdenes/comandos

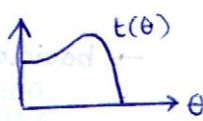
- Antenas no pueden ser directivas (Deben funcionar aunque el satélite esté dando vueltas)
- Polarización circular

• Espirales cónicas

pol. circular y no directiva



• Cilindro ranurado

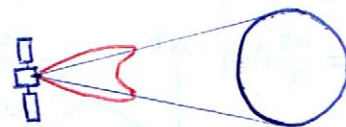


• Monopolo cónico



• Varías antenas (típicamente bocinas) por todo el satélite

Intenta lograr un diagrama de radiación global que compense la distancia



otra posibilidad: con nine-horn array

• Bocinas

→ corrugadas

→ dual horn

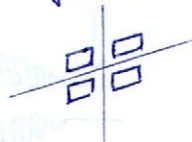
Para lograr rotational symmetry beam

→ dielectric loaded



• Tracking

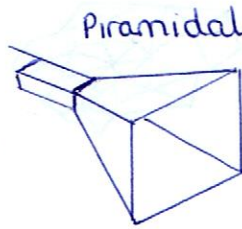
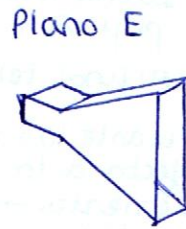
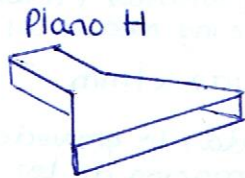
Es típico usar haces suma y diferencia



3.4. BOCINAS (HORNS)

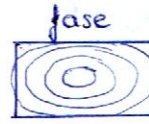
Adaptar ondas guiadas a ondas radiadas

- Aplicaciones
- cobertura global
 - alimentar reflector
 - agrupación de antenas (no tan habitual por la complejidad del BFN)

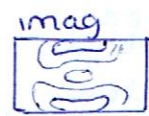


Piramidales

representación poco intuitiva



representación muy intuitiva porque se ve qué zonas contribuyen a la radiación



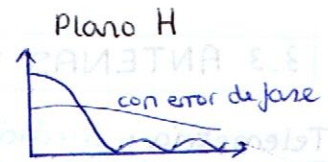
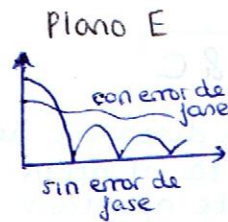
los extremos tienen un error de fase y no contribuyen a la radiación (mas bien restan)

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$$

$$A_{eff} = A_{geom} \cdot \eta_{il}$$

eficiencia

Diagramas de radiación

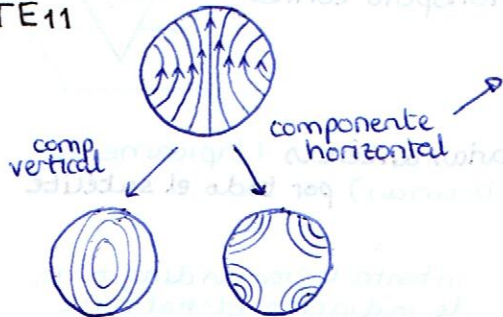


Bocinas cónicas

En satélites son siempre cónicas

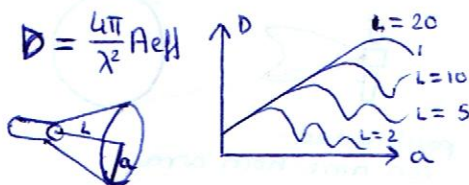
Campos en guía circular

TE₁₁



$$A_{eff} = \pi a^2 \eta_{il}$$

$$D = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{eff}$$



indeseada → polarización cruzada

Eliminando polarización cruzada

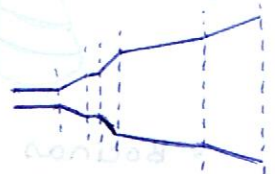
→ bocinas corrugadas

Lograr que la pared sea circuito abierto en lugar de cortocircuito.
Corrugaciones de $\lambda/4$



→ bocina de Potter:

- Discontinuidades para excitar modos de orden superior
- Que el campo (sumatorio de modos) en la apertura tenga poca polarización cruzada



Bocinas multimodo

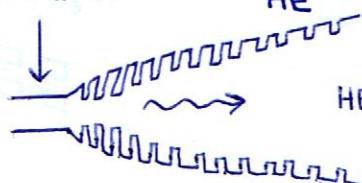
Diseño de bocinas circulares

- modos híbridos

HE₁₁ { 85% TE
15% TM

se alimenta con modo TE₁₁

se hace transición suave al HE



HE₁₁ → buen comportamiento de polarización cruzada

Típico en test: bocina de Potter con ortomodo para las dos polarizaciones



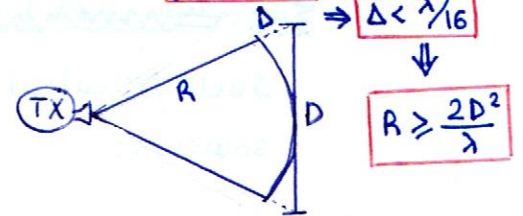
3.5 MEDIDA DE ANTENAS

Parámetros:

- Polarización: elíptica $\rightarrow$ circular $\rightarrow$ axial ratio
- Impedancia de entrada: dada Z_0 quita permite obtener S_{11} , ROE, ...
- Directividad $\rightarrow$ PIRE = $P_{rx} \cdot G$
- Ganancia = D ?
- Eficiencia $\rightarrow$ Diagrama de radiación
- Temp. de ruido
- Parámetro G/T

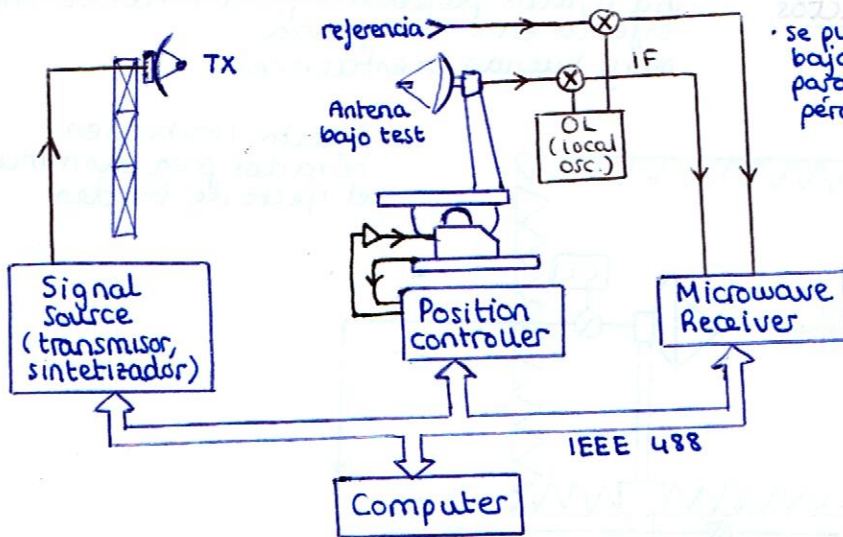
Condición campo lejano

- onda plana
- error fase $< \pi/8$ (22.5°)



Medidas de campo LEJANO.

→ Campos elevados (outdoor)



• se puede bajar a IF para reducir pérdidas

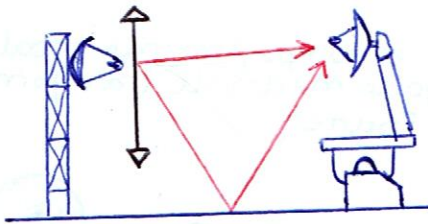
• Las medidas se hacen respecto a la referencia (evitar fluctuaciones del tx)

$$R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$$

• Para medir la fase el sistema debe estar compensado en retardos

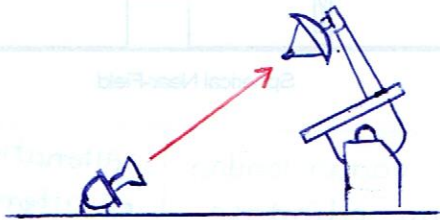
→ campo de reflexión en suelo:

se tiene en cuenta la reflexión en el suelo. La antena tx se mueve up-down

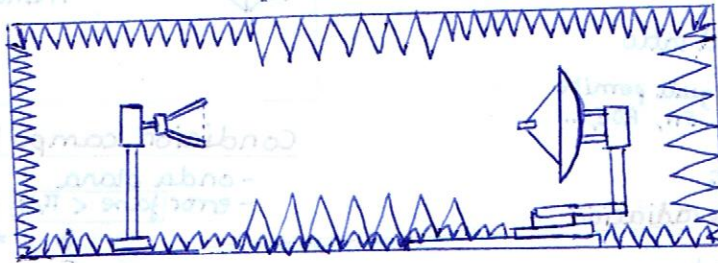


→ campos inclinados

para evitar la reflexión en el suelo



Medida en cámara anecoica (indoor)

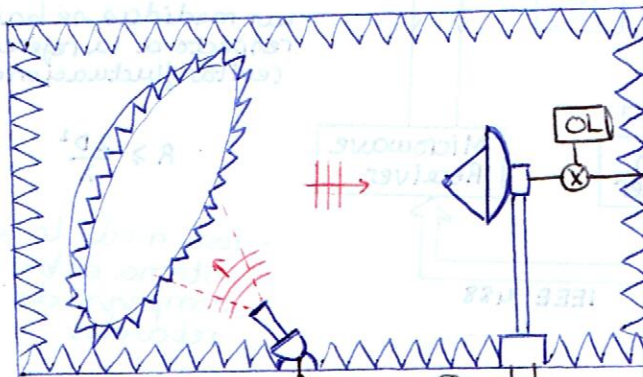


Suele ser difícil medir con $R \geq \frac{2D^2}{\lambda}$

Solución:

Campos compactos

- usa reflector parabólico para convertir onda esférica en onda plana
- muy buenas prestaciones

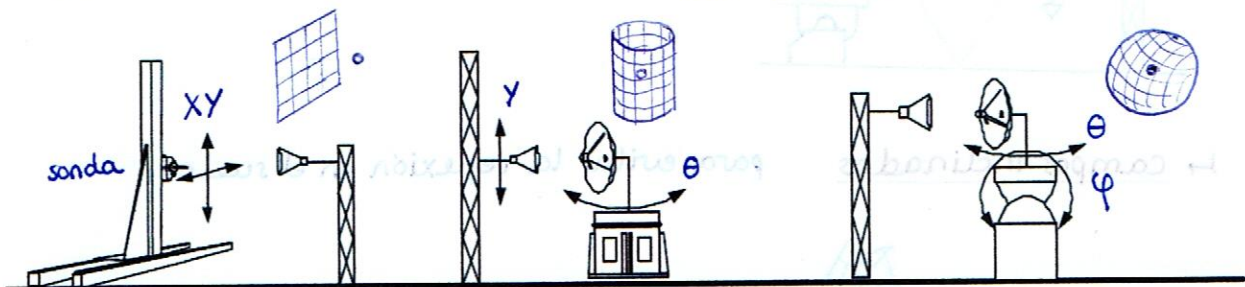


En vez de usar una antena de referencia se usa un acoplador en el transmisor

→ reflector con bordes serrados para disminuir el efecto de bordes

Medidas de campo próximo

medir el campo próximo y calcular el lejano mediante transformada de Fourier



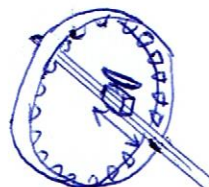
Planar Near-Field

Cylindrical Near-Field

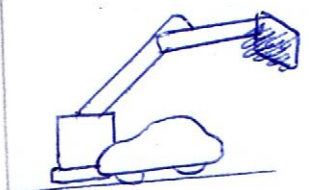
Spherical Near-Field

- rectangular
- plano polar
- bi-polar

Alternativa: varias sondas
ej: sistema cilíndrico

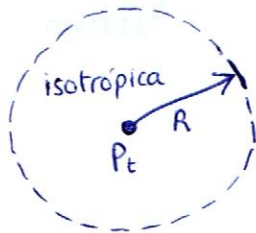


Alternativa: brazo
ej: sistema esférico (automóviles)



Conceptos Básicos

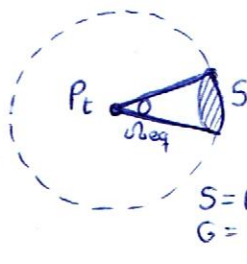
• Radiación de una Antena



$$\text{PFD} = \frac{P_t}{4\pi R^2} \quad [\text{W/m}^2]$$

densidad de potencia

El satélite concentra la potencia en una cobertura

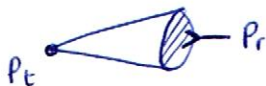


$$\begin{aligned} \text{PFD} &= \frac{P_t}{4\pi R^2} \cdot G_t \\ &= \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \end{aligned}$$

La ganancia de la antena del satélite viene **TOTALMENTE** determinada por la superficie que queremos iluminar

$$G = \frac{4\pi}{\Omega_{eq}} = \frac{4\pi R^2}{S} \quad \leftarrow S_{\text{int}} \quad \textcircled{i}$$

Y lo que recibe la tierra



$$P_r = \text{PFD} \cdot A_{\text{eff}}$$

Utilizando la relación $A_{\text{eff}} \leftrightarrow G_r$

$$\frac{G_r}{A_{\text{eff}}} = \frac{4\pi}{\lambda^2}$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

$$A_{\text{eff}} = A_{\text{geom}} \cdot \eta = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta$$

$$G_r = \frac{4\pi}{\lambda^2} A_{\text{eff}} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot \frac{\pi D^2}{4} \cdot \eta$$

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

$$P_r = \text{PFD} \cdot A_{\text{eff}}$$

$$= \frac{P_t G_t}{4\pi R^2} \cdot \frac{G_r \lambda^2}{4\pi}$$

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

defino

$$L_s = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

$$L_s (\text{dB}) = 20 \log \frac{4\pi R}{\lambda}$$

pérdidas de propagación en espacio libre

Un satélite más lejano
NO necesita más potencia,
necesita más $\text{PIRE} = P_t \cdot G_t$



Dem:

$$P_{r1} = \frac{P_{t1} G_{t1}}{4\pi R_1^2} \cdot S$$

$$P_{r2} = \frac{P_{t2} G_{t2}}{4\pi R_2^2} \cdot S$$

$$P_{r1} = P_{r2}$$

$$S = R_1^2 \Omega_{eq1} = R_1^2 \frac{4\pi}{G_{t1}} \quad \left\{ \begin{array}{l} P_{t1} = P_{t2} \end{array} \right.$$

• La gente tiende a pensar que mayores frecuencias se atenúan más (más pérdidas de propagación), pero es ficticio.

• Pero en realidad lo que pasa es que a altas frecuencias, el A_{eff} de la receptora se reduce.

Órbita circular

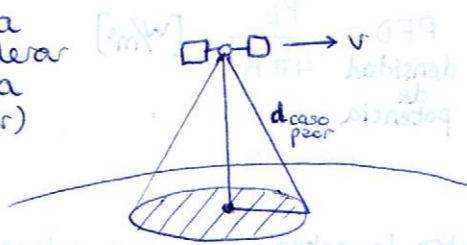
$$F = G \frac{Mm}{r^2} = m \frac{v^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}} = \sqrt{\frac{\mu}{r}}$$

$$r = h + R_T$$

6371 km

Cuando hablen de zona de cobertura, considerar la distancia hasta el extremo (caropecor)



El satélite concentra la potencia en una cobertura

$$E = \frac{P}{2} = \frac{P R_T^2}{2}$$

$$\frac{P}{R_T^2} = \frac{P}{R_T^2}$$



Y lo que recibe la tierra

$$P_r = P_{FD} \cdot A_{eff}$$



Utilizando la relación $A_{eff} \leftarrow P_r$

$$A_{eff} = A_{geom} \cdot \eta = \frac{\pi R^2}{4} \cdot \eta$$

$$\frac{P_r}{P_t} = \frac{A_{eff}}{4\pi R^2}$$

$$A_{eff} = \frac{P_r \cdot 4\pi R^2}{P_t}$$

$$P_r = P_{FD} \cdot A_{eff}$$

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{4\pi R^2}$$

$$P_r = \frac{P_t \cdot G_t \cdot G_r}{4\pi R^2}$$

definido

$$L_s = \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right)^2$$

$$L_s(4R) = 30 \log \frac{4R}{\lambda}$$

ganancia de propagación en espacio libre

• En parte tiene que ver con la frecuencia, se observa que a mayor frecuencia (menor longitud de onda) la ganancia de propagación es mayor.

• Por la relación de que la longitud de onda es inversamente proporcional a la frecuencia, el A_{eff} de la antena se reduce.

El satélite más lejano
No necesita más potencia
Necesita más $P_{IRE} - A_{eff}$



$$P_r = \frac{P_t \cdot A_{eff}}{4\pi R^2}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P_r = P_t \\ P_r = \frac{P_t \cdot A_{eff}}{4\pi R^2} \end{array} \right.$$