

## Diseño de Enlaces

**Capítulo 8**

EE 546 / IT 235  
UNI – FIEE

Ing. Marcial Antonio López Tafur  
[mlopez@uni.edu.pe](mailto:mlopez@uni.edu.pe)  
2008

- En este capítulo aplicaremos este conocimiento para llevar a cabo los cálculos de diseño para un enlace de radio.
- Las *Interrupciones* (**Outages**) calculados necesitan ser comparados con los objetivos de calidad que ya estudiamos.
- Los requerimientos de disponibilidad se refieren a eventos que duran por más de 10 seg.,
- Los requerimientos de funcionamiento se refieren a eventos que duran menos.

Sistemas de Microondas

2

- El *entubamiento* (**ducting**), desvanecimiento por difracción y desvanecimiento por lluvia son eventos lentos (duran mucho más que 10 seg. – usualmente algunas horas o más – ) y necesitan ser considerados desde el punto de vista de **disponibilidad**.
- El **desvanecimiento por multitrayecto** , sin embargo, es un evento rápido y necesita ser considerado desde el punto de vista del **funcionamiento**.

Sistemas de Microondas

3

- Comenzaremos analizando **las interrupciones por desvanecimiento por multitrayecto** la cual puede ser comparada a las normas de funcionamiento como G.821 o G.826.

Sistemas de Microondas

4

### Mecanismos del Desvanecimiento por Trayectoria Múltiple

- Es un mecanismo de desvanecimiento complejo, especialmente en sistemas de Banda Ancha.
- Así es difícil visualizar el problema, por ello nos valemos de las matemáticas para ilustrarlo.

Sistemas de Microondas

5

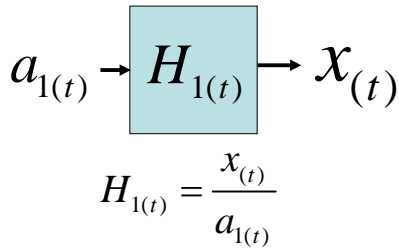
### Función de Transferencia del Canal Multitrayecto

- El primer paso en analizar el problema es derivar la función de transferencia de la atmósfera bajo condiciones multitrayecto.
- La **Función de transferencia** es un **concepto matemático** usado para analizar el efecto de una señal a través de una red.
- Es representada por la salida de la señal dividida por la entrada.

Sistemas de Microondas

6

### Función de transferencia



$$a_{1(t)} = a_1 e^{j\omega t}$$

$$a_{2(t)} = a_2 e^{j\omega(t-\tau)-\phi}$$

$$x(t) = a_{1(t)} + a_{2(t)}$$

La salida constituye una señal directa y una señal retrasada que ha sido reflejada o refractada.

### En el dominio de la frecuencia

$$H_{(\omega)} = \frac{x(t)}{a_{1(t)}} = 1 + (a_2 / a_1) e^{-j(\omega\tau + \phi)}$$

$$H_{(\omega)} = 1 + b e^{-j(\omega\tau + \phi)}$$

$$H_{(\omega)} = \alpha [1 + b e^{-j(\omega\tau + \phi)}]$$

$$H_{(\omega)} = \alpha [(1 + b \cos(\omega\tau + \phi)) - j(b \sin(\omega\tau + \phi))]$$

$$|H_{(\omega)}| = \alpha \sqrt{(1 + b^2 + 2b \cos(\omega\tau + \phi))}$$

### Respuesta en Frecuencia.

La ecuación anterior es una función periódica que se hace mínima cuando **cos(ωτ + φ) = -1**.

Así:

$$(\omega\tau + \phi) = \pi \pm 2\pi n, \text{ para } n = 0, 1, 2, \dots$$

La diferencia entre 2 muescas puede ser derivado como sigue:

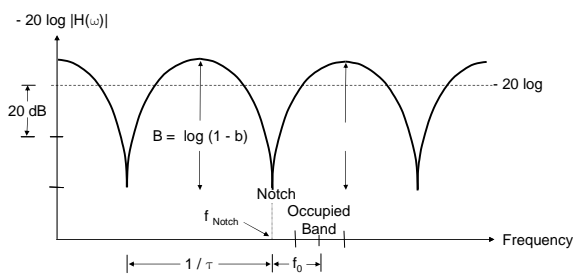


Figura 8.1(a) Respuesta en Frecuencia y Retardo de Grupo de un Canal Multitrayecto

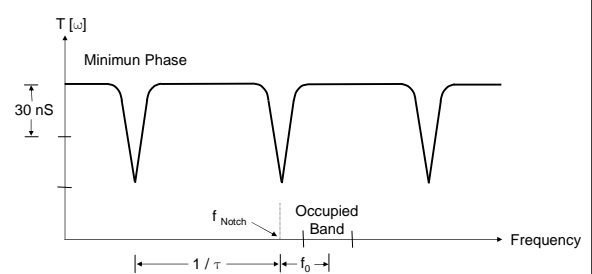
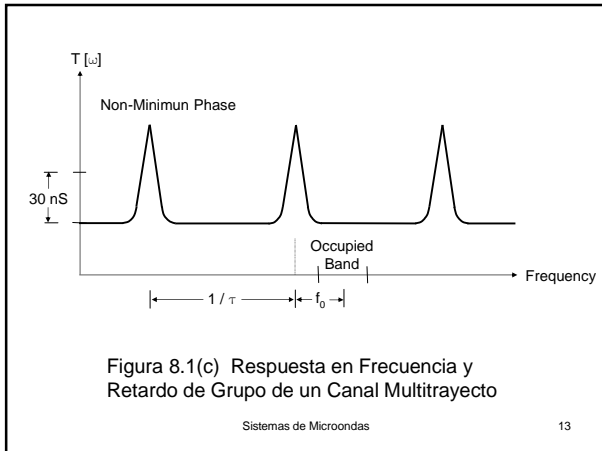


Figura 8.1(b) Respuesta en Frecuencia y Retardo de Grupo de un Canal Multitrayecto



- En otras palabras la diferencia en frecuencia entre dos mínimos (muescas) es igual a la inversa del retardo del eco causada por esa muesca, como se muestra en la figura 8.1.
- Si el retardo varía con el tiempo encima de un canal multitrayecto como es el caso de un enlace de microondas durante condiciones de **ducting**, la muesca se moverá a través del ancho de banda del receptor.

Sistemas de Microondas

14

### Condiciones de Fase Mínimas y no Mínimas.

- El canal multitrayecto es una función de ambos el retardo de la señal secundaria ( $\tau$ ) y su valor de amplitud relativo ( $b$ ).
- La combinación de estos dos valores resulta en condiciones diferentes.

Sistemas de Microondas

15

- Cuando la amplitud relativa del eco es menor que el haz principal y la señal retardada ocurre después de la señal principal o cuando la amplitud relativa del eco es mayor que el haz principal y la señal retardada ocurre antes de la señal principal, la condición es conocida como una *Condición de Fase Mínima*.
- Bajo circunstancias opuestas esto es conocido como una *Condición de Fase no Mínima*. Esto es resumido en la **Tabla 8.1**.

Sistemas de Microondas

16

### Condiciones de fase mínima y no mínima

$$\begin{array}{l} \text{Fase Mínima} \\ \text{Fase no Mínima} \end{array} \left\{ \begin{array}{ll} \tau < 0, & 0 < b < 1 \\ \tau < 0, & b > 1 \\ \tau > 0, & b > 1 \\ \tau > 0, & 0 < b < 1 \end{array} \right.$$

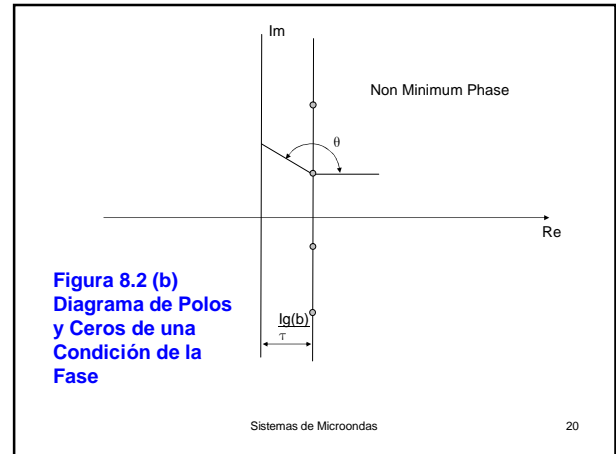
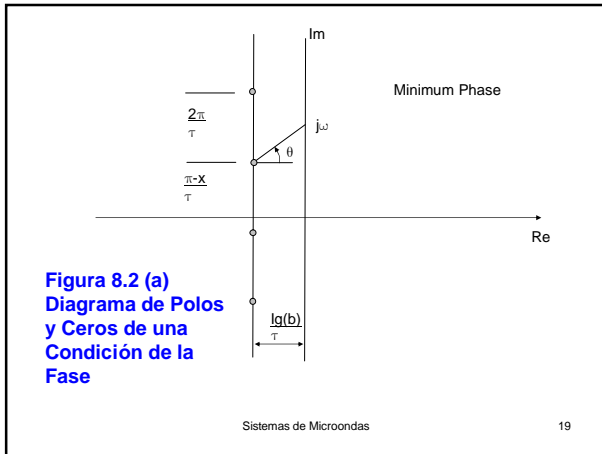
Sistemas de Microondas

17

- La referencia a la fase mínima y la fase no mínima relaciona a la teoría de circuitos donde la Función de Transferencia es trazado (vía la Transformada de Laplace) en el plano "S". Máximos y Mínimos en este caso son representados por polos y ceros, respectivamente.
- La Función de transferencia de un Canal Multiruta puede ser trazado en el plano "S" como una serie infinita de ceros (correspondiente a la muesca mínima), como mostramos en la figura 8.2.

Sistemas de Microondas

18



- Puede verse de la figura 8.2 que para cualquier frecuencia  $\omega$  dada, la fase " $\tau$ " siempre es menor en la *Condición de Fase Mínima* (mano del lado izquierdo), de aquí su nombre.
- Como uno incrementa la frecuencia, la fase incrementa para las *Condiciones de Fase Mínima* pero decrece para las *Condiciones de Fase no Mínima*, lo cual significa que la respuesta de amplitud para los dos casos es idéntica pero la respuesta retardada del grupo es invertida (por ejemplo, uno es la imagen espejo del otro).

Sistemas de Microondas

21

### Retardo de Grupo:

La Respuesta en Fase puede ser derivada de la ecuación:

$$H(\omega) = a[(1 + b\cos(\omega\tau + \phi)) - j(b\sin(\omega\tau + \phi))]$$

Como:

$$\varphi = \arctan\left\{\frac{b\sin(\omega\tau + \phi)}{1 + b\cos(\omega\tau + \phi)}\right\}$$

Sistemas de Microondas

22

- El Retardo de Grupo es definido como la velocidad de cambio de Fase con la frecuencia, aquí que puede derivarse de la ecuación anterior con respecto a la frecuencia:  $T(\omega) = d\phi / d\omega$
- Si uno realiza esta derivada y gráfica la respuesta uno obtiene la curva para la fase mínima y no mínima, respectivamente, como se muestra en la figura 8.1.
- La Respuesta de Amplitud es idéntica para ambos casos.

Sistemas de Microondas

23

### Modelos Matemáticos.

- Como previamente mencionamos la función de transferencia del canal Multitrayecto es dependiente de cuatro variables:
- (**a**) es el factor de atenuación constante a través del ancho de banda del receptor,
- (**b**) es la amplitud relativa de la señal retardada respecto a la señal principal,
- ( $\tau$ ) es el retardo de propagación del eco,
- ( $\varphi$ ) es el cambio de fase del eco.

Sistemas de Microondas

24

- Hasta donde estos parámetros están involucrados, sólo son conocidos en términos estadísticos de las mediciones de Campo.
- Porque una respuesta en frecuencia puede ser reconstruida en muchas combinaciones diferentes de estos 4 parámetros, una descripción matemática que este basada en realidad física es casi imposible.
- El único método que se ha usado para analizar el problema es producir un modelo matemático que asuma una de las variables como una constante.

Sistemas de Microondas

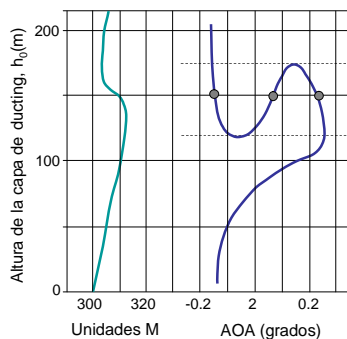
25

- En realidad, tantos como once rayos pueden ser presentados en una situación multi-trayecto atmosférica.
- El número de rayos siempre será un número impar, como el mostrado en la figura 8.3.
- Para aplicaciones prácticas el número de rayos debe ser reducido a tres o menos.
- Específicamente, todos los modelos matemáticos están usualmente basados en el modelo de tres rayos de una simplificación de eso.

Sistemas de Microondas

26

### Efecto de un Ducto sobre el frente de Onda



Sistemas de Microondas

27

- Un modelo semejante asume que el retardo es constante y esta basado en el trabajo hecho por **William Rummler** de los laboratorios Bell.
- Usando los datos de la propagación de un 26.4 cerca de Atlanta, Georgia (USA), el modelo fue confirmado en 1977.

Sistemas de Microondas

28

- Otro modelo asume el factor de atenuación como constante.
- Este es probablemente el modelo físico más representativo porque los receptores de radio son capaces vía su **AGC** de compensar desvanecimientos planos.
- Esto es referido como un modelo de dos rayos porque el efecto del tercer rayo que produce la atenuación plana se elimina.

Sistemas de Microondas

29

### Interrupción en el Desvanecimiento Multitrayecto:

- Las interrupciones debidos a desvanecimientos de multitrayecto dependen de parámetros como la frecuencia, longitud de salto, asperezas y tipo de terreno, condiciones climáticas y claridad de ruta.
- Varios modelos semi-empíricos desarrollados para predecir las interrupciones todos usan estos parámetros para algunas extensiones.

Sistemas de Microondas

30

### Interrupción por desvanecimiento plano

- En el contexto de las microondas, un desvanecimiento plano es causado por condiciones multi-trayecto donde los efectos de la distorsión de señal pueden ser ignorados.
- Este es el caso típico para sistemas debajo de los 8 Mbps, con tal de que la longitud de salto sea pequeña (menor que 50 Km.).
- El efecto de una atenuación plana puede verse fácilmente graficando la atenuación versus el BER.

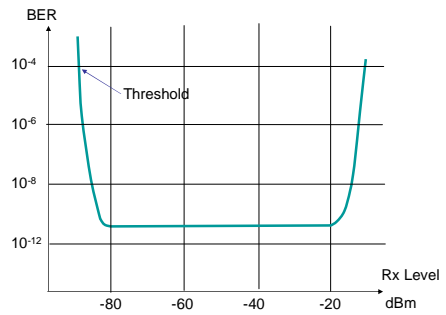
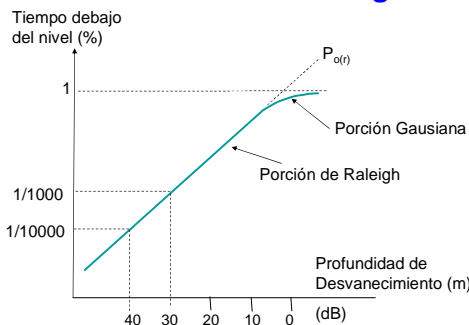


Figura 8.4 BER vs. Nivel de Recepción

- Años de prueba en enlaces de radio (análogos y digitales) muestran que la curva de distribución de probabilidad sigue una distribución "Raleigh" para desvanecimientos profundos.
- Lo cual significa que por cada 10 dB de desvanecimiento, la probabilidad de ocurrencia decrece un décuplo.
- Así, hay diez veces mas desvanecimientos de 10 dB que desvanecimientos de 20 dB.
- Esta realidad significa que la naturaleza del desvanecimiento es conocida por cualquier "salto", esto es el nivel absoluto del "fading" que necesita ser determinado.

- La curva de Raleigh es mostrada en la figura 8.5.
- Donde se verá que en los primeros 15 dB o para desvanecimientos poco profundos muestran una distribución Gaussiana con la porción lineal de la curva de Raleigh ocurriendo para desvanecimientos profundos.

### Distribución Raleigh



### Predicciones de las Interrupciones

#### 1) Modelo de Vigants-Barnett.

$$P(W) = KQ(W/W_0)fd^3 \quad (1.18)$$

$$KQ = A10^{-3} / S_1^{1.3} \text{ para } A = \begin{cases} 4.1 & \text{para áreas costeras} \\ 3.1 & \text{para subtropicales} \\ 2.1 & \text{para terreno promedio (plano)} \\ 1.0 & \text{para zona montañosa} \end{cases}$$

## Método de la ITU 530-7.

- Varias fórmulas se han desarrollado y presentado por la ITU.
- Las fórmulas y métodos presentados son un esfuerzo para definir modelos de predicción que permitan predecir en forma acertada el tiempo de **Outage** para cualquier salto dado.
- En los últimos métodos el factor geoclimático  $K$  es calculado como una función de la ubicación del sitio (latitud y longitud), y probabilidad de **Ducting** (PL).

Sistemas de Microondas

37

## Desvanecimiento por Interrupción Selectiva

El efecto se nota en enlaces de capacidad media y alta (por ejemplo, 34 a 155Mb/s), la fuente primaria de interrupción es debida a las distorsiones de la señal, la cual resulta en varias Interferencias InterSímbolos (ISI). ( $BER > 10^{-3}$ ).

Sistemas de Microondas

38

## Signatura del Sistema

- Hay varios métodos para predecir los tiempos de interrupción tal como usar una distorsión de amplitud lineal (LAD) aproximado, un dominio de tiempo de multieco aproximado, signaturas normalizadas, y métodos de margen de desvanecimiento compuesto.
- Estos métodos proveen predicciones de interrupción basados en el conocimiento de como el equipo de radio responde a la distorsión en banda causada por interferencia de rayos múltiples.

Sistemas de Microondas

39

La medida de la respuesta del equipo es llamada curva de signatura. El método de signatura normalizada y los métodos de margen de desvanecimiento compuesto confían en tener una curva de signatura demoduladora precisa para el equipo de radio.

Un poco más de explicación de este término: .....

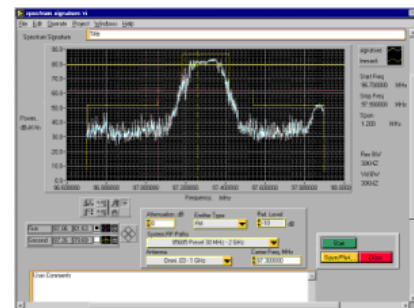
Sistemas de Microondas

40

- Signature : “Firma” o Identificación
- Grupo completo de señales electromagnéticas recibidas, p.e., de una determinada fuente, transmisor de radio o radar, una nave aérea o barco. Nota: Las “Signatures” pueden consistir de señales analógicas o digitales, o ambas, y pueden ser analizadas para indicar la naturaleza de la fuente y asistir en su reconocimiento..

Sistemas de Microondas

41



The spectrum signature measurement panel.

Sistemas de Microondas

42

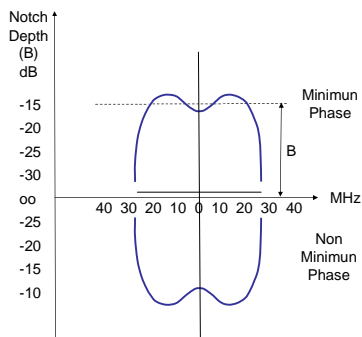


Figura 8.6 Curva Signatura típica

Sistemas de Microondas

43

### Método de Interrupción de Signatura Normalizada

El método de signatura de sistema normalizado asume que la interrupción es igual para el área bajo el promedio de las curvas de signatura de fase mínima y no mínima.

Sistemas de Microondas

44

### Método de Margen de Desvanecimiento Compuesto

- El desvanecimiento dispersivo no está relacionado al nivel de potencia recibida (ruido térmico) pero es el desvanecimiento adicional el que produce errores debido a la distorsión.
- Si uno conoce el outage por desvanecimiento plano exacto y ha determinado la dispersión natural de la trayectoria, entonces las dispersiones de las características del equipo pueden ser determinadas desde mediciones.

Sistemas de Microondas

45

### Desvanecimiento por Lluvia

- Para calcular el desvanecimiento por lluvia uno necesita determinar la tasa de lluvia requerida para atenuar el trayecto tal que el margen de desvanecimiento es excedido y entonces determina cuan frecuente ocurre esta tasa de lluvia para el área geográfica bajo consideración.
- La ITU ha producido un mapa mundial donde las regiones de lluvia han sido definidos de acuerdo a la tasa de lluvia.
- La Región A tiene la mínima tasa de caída de lluvia y la Región P tiene la más alta.

Sistemas de Microondas

46

- La tasa de caída de lluvia muy alta tiende a cubrir un área geográfica mas pequeño, por tanto la caída de lluvia no afectará igualmente el total de la longitud del enlace.
- El método de diseño sería incrementar el tamaño de la antena hasta que el margen de desvanecimiento esté igualado o excedido a la atenuación de la trayectoria.
- A medida que la frecuencia aumenta el margen de desvanecimiento también debe aumentar por seguridad

Sistemas de Microondas

47

### Interrupción Total

- Para determinar el interrupción de todo el sistema uno debe combinar la probabilidad de interrupción debido a los desvanecimientos selectivo y plano.
- Hay varios modos en que uno puede hacer esto, pero el más común es usar el margen de desvanecimiento compuesto y luego usar este valor con las fórmulas desarrolladas para desvanecimientos en bandas estrechas que son incluidas en la recomendación UIT 530-7.

Sistemas de Microondas

48

### Contra Medidas:

Las medidas de contorno contrarios a los efectos de desvanecimiento pueden ser vistos en tres categorías:

- Técnicas de sistema,
- Técnicas de no diversidad y
- Técnicas de diversidad.

Sistemas de Microondas

49

### Técnicas de Sistema

- Para desvanecimientos planos es suficiente incrementar el margen de desvanecimiento disponible.
- Este puede tomar la forma de incrementar la ganancia del sistema para usar las antenas más grandes, incrementando la potencia de salida del transmisor, o incrementando el nivel de umbral del receptor.

Sistemas de Microondas

50

### Todo esto tienen sus límites :

Las antenas son fabricadas a un cierto tamaño máximo; la potencia de salida del transmisor es limitada debido a problemas de distorsión, y el umbral del receptor es limitado por el ruido térmico de fondo residual, el cual es proporcional al ancho de banda.

Una vez que estos factores han alcanzado sus límites, la "diversidad" es la única opción para incrementar el rendimiento.

Sistemas de Microondas

51

- Para **desvanecimiento selectivo** el problema no es el nivel de la intensidad de campo en el receptor sino la **distorsión**, y además la ecualización es la principal contra medida que puede ser empleada.
- Por este problema complejo que es principalmente un problema del diseñador del equipo, y no un problema de ingeniería del sistema, esto no será discutido en detalle, sino brevemente los principios involucrados.
- La ecualización puede ser realizada a niveles de bandabase o IF.

Sistemas de Microondas

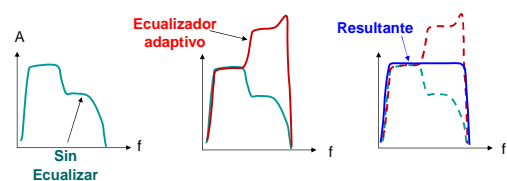
52

- El principio del ecualizador IF es linealizar la respuesta de frecuencia adaptivamente, creando una función de transferencia complementaria a la función de transferencia actual del canal.
- Este puede solo puede afectar directamente a la respuesta de amplitud, y por lo tanto su rendimiento contra los desvanecimientos de fase mínima y fase no mínima son substancialmente diferentes.

Sistemas de Microondas

53

En otras palabras, una respuesta en frecuencia con una inclinación positiva es contrarrestada con un ecualizador de inclinación negativa y una respuesta de frecuencia con una muesca es compensada para con un tope complementario.



Sistemas de Microondas

54

### Técnicas de no diversidad

- Debido a las implicaciones financieras de las técnicas de diversidad y de no diversidad deberían ser consideradas primero: una de tales técnicas depende en el hecho que solo rayos arrojados en aproximadamente 0.5 grados desde la horizontal están sujetos a ductos.
- Para colocar la antena mucho más alta a un extremo que el otro, un arreglo alto-bajo puede ser obtenido donde el desvanecimiento es grandemente reducido

Sistemas de Microondas

55

Otra técnica es inclinar la antena lentamente hacia arriba, causando una ligera pérdida de señal bajo condiciones normales pero reduciendo el rayo reflejado terrestre ( y por tanto la interrupción debido al multitrayecto) bajo condiciones de desvanecimiento

Sistemas de Microondas

56

- Algunas direcciones de la posición de la antena baja, permitiendo una pérdida de difracción bajo condiciones normales pero al mismo tiempo asegurando que el rayo reflejado es bloqueado.
- Este es un método arriesgado como fue discutido anteriormente debido a que los enlaces difractados pueden sufrir diversos interrupciones debido a bajos valores de  $k$ .

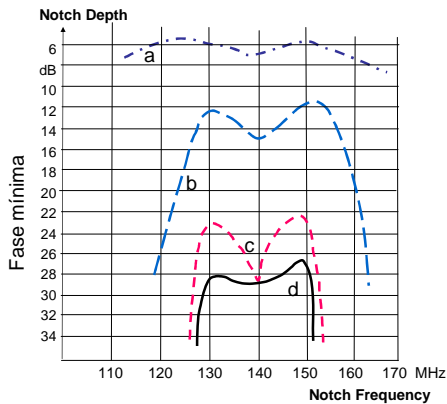
Sistemas de Microondas

57

- Finalmente, una antena anti-reflectora puede ser posicionada tal que las reflexiones son canceladas.
- La desventaja de este método es que viene a ser caro.
- Sistemas de antenas anti-reflectoras además tienden a tener una carga de antena alta debido a los pesados mecanismos requeridos para optimizar el espacio.
- Esta técnica hace, sin embargo, ofrecer considerables ventajas para un problema de reflexión especular.

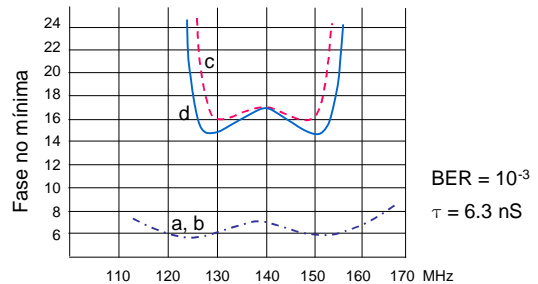
Sistemas de Microondas

58



Sistemas de Microondas

59



a: Sin ecualizador b: Con ecualizador en el dominio de la frecuencia  
c: con ecualizador en el dominio del tiempo d: con ambos tipos

### Mejora de la signatura usando ecualizador

Sistemas de Microondas

60

## Técnicas de Diversidad

- De ángulo;
- De espacio con combinadores RF o IF, los cuales pueden ser dispersión mínima o potencia máxima;
- De espacio con bandabase conmutada;
- De frecuencia (en la banda o banda cruce;  $1 + 1$ , o  $n + 1$ );
- Híbrida (diversidad de espacio y diversidad de frecuencia con dos o cuatro receptores).

Sistemas de Microondas

61

**La diversidad de ángulo:** ha sido citada en algunas literaturas como de buen rendimiento contra el desvanecimiento selectivo, sin embargo, no ha sido ampliamente implementado a ún porque no ha sido concluyentemente probado que sea efectivo en la práctica.

Sistemas de Microondas

62

**La diversidad de frecuencia** en banda cruce es un método muy eficiente desde el punto de vista de propagación pero no es muy eficiente en espectro porque este requiere que dos bandas de frecuencia sean disponibles. La diversidad de frecuencia en la banda es la forma más común de diversidad porque cuando un sistema  $n + 1$  es configurado,

Sistemas de Microondas

63

- Uno de los canales puede ser usado para protección.
- Un canal de protección dedicado tal como un sistema  $1 + 1$  no es eficiente en frecuencia pero proporciona un alto nivel de protección.

Sistemas de Microondas

64

**La diversidad de espacio** es muy eficiente en espectro y provee un excelente rendimiento contra el desvanecimiento por multitrayecto pero es caro. El concepto es separar las dos antenas en el plano vertical tal que cuando hay cancelación de fase en el trayecto principal debido al desvanecimiento por multitrayecto,

Sistemas de Microondas

65

la diversidad de los trayectos no es afectado debido a la longitud del trayecto extra.

- Típicamente, con tal que exista un mínimo de doscientos longitudes de onda de separación entre las antenas los dos trayectos no serán correlacionados.

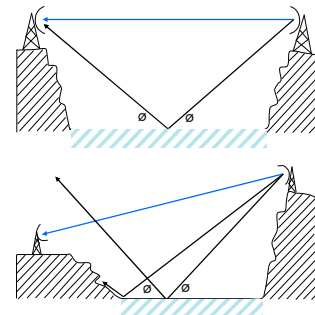
Sistemas de Microondas

66

### Análisis de Reflexión

- El desvanecimiento por multitrayecto es causado predominantemente por reflexiones en la tierra interfiriendo con la señal principal atenuada durante condiciones de ducting.
- La condición de reflexión no es estable, por tanto el desvanecimiento intenso ocurre para cada periodo corto, típicamente milisegundos.
- Las reflexiones en la tierra llegan a ser más serio si el frente de onda total es reflejado en fase, así llamada reflexión especular (espejo).

Figura 8.8 Geometría de la Reflexión



- Cuando se hace un análisis de reflexión uno debe recordar que el punto de reflexión cambiará como cambia el factor  $k$ .
- Es posible ser cuidadoso posicionando las alturas de las antenas para minimizar el efecto de una reflexión.
- La posición de antena debería ser elegido para minimizar la atenuación a la condición promedio de  $k$  mientras se asegura que una aceptable atenuación pequeña para bajos y altos valores de  $k$ .

- Cuando esto no se puede conseguir, se va a necesitar diversidad de espacio.
- La posición de las antenas para diversidad debería ser tal que ésta experimenta una buena señal bajo las condiciones donde la antena principal esté experimentando una recepción de señal nula.
- Esto debería ser revisado para todos los valores esperados de  $k$ .

### Apuntes

.....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....  
 .....



**Muchas gracias por su atención**



**UNI FIEE  
 Lima Perú**