

TEMA 1. RADIOCOMUNICACIÓN.

1.1 Generalidades.

1.1.1 Transmisión radiada frente a transmisión guiada.

1.1.2 Tipos de servicios.

1.1.3 Organismos de regulación y normalización.

1.2 Modelo de sistema de radiodifusión.

1.2.1 Diagrama de bloques.

1.2.2 Fundamentos de radiación.

1.3 Gestión del espectro.

1.3.1 Bandas de frecuencia.

1.3.2 Reglamento de radiocomunicación. CNAF

1.4 Ruido e interferencias.

1.4.1 Ruido interno: F , T_{eq} .

1.4.2 Ruido externo: T_a .

1.4.3 Conexión de elementos en cascada.

1.4.4 Cálculo de la relación señal-ruido en un sistema

1.4.5 Interferencias. Definiciones.

1.1. GENERALIDADES.

1.1.1. Transmisión radiada frente a transmisión guiada.

Dependiendo de la naturaleza del canal se pueden distinguir dos tipos de sistemas de telecomunicación:

Sistemas de canal artificial o GUIADOS: Son aquellos que emplean como soporte de comunicación un medio físico, como cable coaxial, línea bifilar, fibra óptica, etc.

Sistema de canal natural o RADIADOS: No existe ningún soporte físico para la comunicación. Ej: radiación electromagnética.

Ventajas de los sistemas radiados:

- Se permite la movilidad de los usuarios que componen el sistema. Esto implica la no necesidad de una línea que una el tx y el rx.

- El coste es más reducido, ya que al no existir un medio físico de unión no será necesario la instalación y el mantenimiento.
- Para grandes distancias estos sistemas presentan menor atenuación, aunque esto dependerá del soporte físico, ya que si el medio es fibra óptica la atenuación será también muy pequeña.

Guiado: $L = \alpha d$

Radio: $L = \frac{1}{d^2}$

L

guiado

radio

d

También se puede expresar la atenuación en función de la potencia recibida en el receptor:

Guiado: $P_R = P_T \frac{1}{e^{2\alpha d}}$

Radio: $P_R = P_T \frac{1}{d^2}$

$P_R \text{ [dBm]} = P_T \text{ [dBm]} - L \text{ [dB]}$

guiado

radio

d

Si suponemos que la radiación es de forma esférica, el aumentar la distancia al doble solo implica un aumento de la atenuación en +6 dB.

Ejemplo: Comparación entre dos sistemas.

a) Sistema guiado con coaxial de $\alpha = 17 \text{ dB/km}$ a $f = 60 \text{ Mhz}$.

b) Sistema radio con antena omnidireccional y $G = 1$.

$L[\text{dB}]$	$d[\text{km}]$	2	4	5	10	100
Guiado		34	68	85	170	1700
Radio		74	80	82	88	108

$L_G = \alpha(\text{dB} / \text{km}) d(\text{km})$

$$L_R = L_{if} (dB) = 10 \log \frac{4\pi d^2}{\lambda} = 8 + 20 \log d(m)$$

! pérdidas básicas en espacio libre.

Vemos que en este sistema, a partir de 5 km. el sistema de radio tendrá unas pérdidas menores que el sistema guiado.

Inconvenientes de los sistemas de radio. Todos estos inconvenientes están relacionados con que los sistemas de radio utilizan un medio de tx compartido.

- Interferencias: En los sistemas guiados la señal de información está confinada en un soporte en concreto y ninguna otra señal la va a interferir. En un sistema de radio si que aparecen interferencias.

C / I = Relación Potencia ñ deseada / potencia ñ interferente.

RP = Relación de protección (C / I mínima).

- Influencia del entorno de propagación: Si varían las condiciones del medio puede que la señal de información se vea alterada o distorsionada.
- Regulación internacional: Como consecuencia de que el medio es compartido, se necesita una regulación internacional para evitar que unas señales interfieran con otras en otras zonas o países.

1.1.2. Tipos de servicios.

Servicios fijos: Entre puntos fijos determinados, por ejemplo los radioenlaces entre estaciones fijas.

Servicios móviles: Entre estaciones móviles o entre una estación móvil y una fija (al menos una de las estaciones ha de ser móvil).

Servicios de radiodifusión: Sus emisiones se destinan al público en general de forma directa.

Todos estos servicios se pueden transmitir vía terrestre (radiodifusión terrenal) o por satélite (radiodifusión por satélite).

1.1.3. Organismos de regulación y normalización.

UIT / ITU: Unión Internacional de Telecomunicación. Es un organismo a nivel mundial, el cual presenta varias secciones. La que se encarga de la radiocomunicación y el espectro radioeléctrico es la UIT-R. Este organismo genera informes, recomendaciones y normas. Ej: UIT-R Rec. 370.

ETSI: Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación. Organismo a nivel europeo que genera normas. Ej: DAB, DVB.

UER / EBU: Unión Europea de Radiodifusión. Asociación de entes de radiodifusión nacionales. Se encarga de temas diversos entre los que se encuentran la generación de normas y estándares.

Las recomendaciones no son de obligado cumplimiento y no se convierten en normas hasta que no lo decide la administración, elaborando en reglamento técnico que se publicará en un boletín del estado.

1.2. MODELO DE SISTEMA DE RADIODIFUSIÓN.

1.2.1. Diagrama de bloques.

Transmisión: Antena Ex

BB BB RF RF

señal Amplificador Amplificador C Canal

+ Modulador + O RF

Filtrado Filtrado . M

. B

. I

BB BB FI RF N

Ampl. Mod Conversor Amplif

señal Filtrado Elevador Filtrado

- Amplificador + Filtrado ! Modulador: Adecua el nivel de la señal para que tenga suficiente nivel y compense las pérdidas (amplificación) y ajusta el ancho de banda para adecuarlo al canal (filtrado).
- Modulador: Desplaza el espectro de la señal a la banda de interés.
- Combinador: Este elemento es opcional, ya que sólo se coloca si se va a compartir la antena para diversas señales.
- Conversor elevador: Para trasladar la señal a una frecuencia distinta mayor para adaptarla mejor a las características del canal.
- Antena exterior: Antena omnidireccional (no directiva). Es la encargada de entregar la señal al medio y su diseño depende de la frecuencia de trabajo. Debe tener la misma polarización que la antena receptora y funciona como un filtro, es decir, es selectiva en frecuencia.
- Canal de radio: Distorsiona la amplitud y fase de la señal. Además el canal es variable con las condiciones climáticas y con la frecuencia de trabajo.

Recepción:

ñ información

ruido

interferencias

Amplific Conversor Amplific

+ inferior + demod tratamiento

Filtrado Filtrado

Sñ

recibida

- Antena de recepción: Suele ser directiva y selectiva en frecuencia. Debe tener la misma polarización que la antena emisora. También recibirá ruido e interferencias de otras antenas emisoras que se deberá separar de la señal de información.
- Amplificador y filtrado: Esta es una etapa de entrada que no suele ser muy selectiva porque se pueden recibir varios anchos de banda.
- Conversor inferior: Se traslada la señal a frecuencia intermedia.
- Amplif + Filtrado: Ahora nos quedamos con el ancho de banda de interés (canal o emisora de interés), eliminando el resto.
- Demodulador: Pasa la señal a banda base. A la entrada de este bloque debe haber una relación S/N mínima (para asegurar una cantidad y calidad mínima de señal).

Ventajas de la modulación:

- Transmisión eficiente: Las antenas trabajan en un determinado margen de frecuencias. Existe una relación entre tamaño de la antena y frecuencia de radiación. Para que una antena radie de forma eficiente su tamaño físico debe ser mayor que la longitud de onda que debe radiar. Exactamente $D > \lambda/10$.

La transmisión es eficiente si la potencia que se radia es mucho mayor que la potencia que se disipa por calor.

Ejemplo:

a) Tx de señal audio BB (100Hz – 4Khz)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^2 \text{ ciclos/s}} = 300 \text{ Km}$$

Sería necesaria una antena de 30 Km, lo que es inviable.

b) Tx señal audio modulada FM (100 Mhz)

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ ciclos/s}} = 3 \text{ m}$$

! La antena necesaria es mas reducida.

- Superar las limitaciones del Hardware: La complejidad de un circuito depende de la frecuencia, por lo que se establecerá un margen de complejidad viable.

$$1\% < B / f < 10\%$$

B es el ancho de banda de la señal modulada y f es la frecuencia central de la señal. Si se incrementa la

frecuencia de la señal, menor será el coste del sistema.

- Combatir ruido e interferencias: Se podría aumentar la calidad aumentando la potencia de la señal, pero esta solución no es muy eficiente, además elevaría mucho los costes y esto no siempre es posible. La modulación resuelve este problema ya que aumenta la calidad de la señal sin tener que aumentar la potencia de tx.

Ejemplo: Tx de TV por satélite.

sat C / N demodulador S / N

C/N: Relación portadora/ruido (antes de demodular)

S/N: Relación señal/ruido (después de demodular ! señal en BB)

Con BLV (modulación de banda lateral vestigial) se alcanza una C/N = 15 dB, lo cual haría imposible la recepción de la señal de TV. Por esto se usan modulaciones FM (TV analógica) o QPSK (TV digital), las cuales aumentando el ancho de banda de la señal consiguen aumentar su calidad. El problema es que el ancho de banda ocupado en el canal es mayor que en BLV.

C/N S/N C/N

Demod FM Mod BLV TV

15 dB 50 dB 50 dB

- Permite compartir el espectro: Se pueden transmitir varias señales en el mismo espectro sin mas que desplazar cada una de ellas a frecuencias distintas.
- Permite la multiplexación: Similar al caso anterior pero referido a la creación de señales en BB desplazadas en frecuencia antes de modular.

1.2.2. Fundamentos de radiación.

Para que exista radiación (energía que escape de la antena) es necesario que exista movimiento de cargas. Ya se vio que no es posible tx en banda base porque la longitud física de la antena debería ser muy grande. Por tanto el movimiento de cargas debe ser tal que la longitud de onda asociada (λ) sea comparable a la dimensión de la antena. Es necesario mover cargas continuamente para radiar a la frecuencia buscada.

En función de la geometría de la antena, esta radiará de una forma u otra. La energía necesaria para que la antena radie la aporta un generador. Éste trabaja a una frecuencia determinada cuya λ es comparable a las dimensiones de la antena.

Zg

Vg

D "

Radiación

Generador de la

Antena antena

La radiación producida por la antena afecta tanto al campo eléctrico como al campo magnético existente en el aire. En radiodifusión se trabaja con el campo eléctrico (r, f) , cuyas características dependen de la distancia a la antena. Se pueden establecer tres zonas diferentes.

- Zona de campo próximo: Dominio del campo de inducción $E = f(r, f)$. En esta zona no hay escape de energía, por lo que no hay campo radiado.
- Zona intermedia o de Fresnel.
- Zona de campo lejano: Dominio del campo de radiación $E = f(r, f) \cdot g(r)$. En esta zona si existe campo radiado o de radiación. El campo eléctrico (E) depende de las mismas variables, pero de forma separada. Esta es la zona de trabajo para las distintas aplicaciones de radiodifusión. La condición para que se alcance esta zona es que $r \gg \lambda$ y $r \gg D$, donde r es la distancia del punto de estudio a la antena y D la dimensión de ésta.

Aunque la antena radia un frente de ondas esférico, en la zona de campo lejano el receptor puede aproximar el frente de ondas como un frente de ondas plano, es decir, el receptor recibe una onda plana. En este tipo de ondas, el campo eléctrico (E) y el campo magnético (H) son siempre perpendiculares entre sí y transversales a la dirección de propagación. El flujo de energía es saliente en la dirección de propagación.

Lo que caracteriza al campo lejano es que la distribución angular de energía del campo no depende de la distancia, es decir, que si en una dirección se mide un campo 10 veces menor que en otra dirección, esta diferencia se va a mantener aunque me aleje aun más o me acerque a la antena. Esta conclusión se obtiene como consecuencia de la separación de las variables del campo eléctrico en $g(r)$ y $f(r, f)$.

/10

/10

, ,

,

Concepto de polarización.

Los campos eléctrico y magnético no permanecen estáticos, sino que presentan una variación con el tiempo. La polarización es el lugar geométrico que describe el extremo del vector E al variar con el tiempo. Dependiendo de la forma de variación que presente el vector E , existen distintos tipos de polarización.

$r \cdot r \cdot r$

Polarización lineal polarización elíptica polarización circular

En las polarizaciones, la envolvente que forma la variación del campo E es una senoide que debe coincidir

en frecuencia con la frecuencia del generador. En general todas las polarizaciones son elípticas, la lineal y la circular son casos particulares de la elíptica. En la circular y en la elíptica se puede girar en ambos sentidos, por lo que habrá que distinguir dos tipos de polarizaciones:

- Dextrógira: polarización a derechas (giro en el sentido de las agujas del reloj).
- Levógira: polarización a izquierdas.

Cualquier tipo de polarización se puede descomponer en dos polarizaciones lineales ortogonales o en dos polarizaciones circulares ortogonales.

Para que una antena receptora y otra transmisora se entiendan ambas deben tener la misma polarización, de lo contrario habrá muchas pérdidas. En el caso límite de que una antena posea polarización perpendicular a la otra las pérdidas serán infinitas, por lo que no se recibirá señal. Las pérdidas van a depender del ángulo que formen las polarizaciones de las dos antenas, concretamente dependen del coseno al cuadrado del ángulo:

- $\theta = 0^\circ$! $\cos^2 \theta = 1$! No existen pérdidas.
- $\theta = 90^\circ$! $\cos^2 \theta = 0$! Pérdidas infinitas, no se recibe señal.

Ejemplo: Si se transmite una señal con polarización circular y se recibe con una antena con polarización lineal, la señal se recibe siempre, pero con unas pérdidas de 3 dB. Esto es porque en polarización circular el campo va girando en todas direcciones a medida que se va propagando, por lo que siempre habrá una dirección que coincida con la que posee la antena de polarización lineal (cuyas variaciones de campo siempre coinciden con la dirección de su eje). Por tanto se recibirá la mitad de la potencia que se envió originalmente.

Si en un LNB (Low noise block, bloque de recepción de señal de una antena) se colocan dos antenas cada una con una polarización perpendicular a la otra, se pueden transmitir dos señales de información distintas sin que se mezclen, teniendo así dos canales aun teniendo la misma frecuencia los dos generadores. Esto es una gran ventaja, ya que permite reutilizar frecuencias. Por ejemplo, en un mismo LNB, se puede recibir tanto la información que viaja en la polarización horizontal del campo como la que viaja en la polarización vertical, ya que ambas polarizaciones son perpendiculares y cada antena solo recibirá su señal y nada de la otra, aun cuando ambas señales posean la misma frecuencia. Con esto se consigue mayor eficiencia de ancho de banda.

H f2 f4

V f1 f3 f5

Estas frecuencias son utilizadas por ambos canales (H y V), por lo que se consigue mayor eficiencia de ancho de banda aún trabajando ambos canales a la misma frecuencia.

1.3. GESTIÓN DEL ESPECTRO.

1.3.1. Bandas de frecuencia.

Se define el espectro radioeléctrico como el conjunto de frecuencias de que se dispone para realizar comunicaciones. Este espectro se divide en bandas de frecuencia numeradas. Para la radiodifusión las bandas que interesan son de la 4 a la 12.

Numero de la banda	Símbolos (en ingles)	Gama de frecuencias (excluido límite inferior, incluido el superior)	Subdivisión métrica	Abreviaturas métricas
--------------------	----------------------	--	---------------------	-----------------------

3		300 – 3000 Hz	Hectokilométricas	B.hkm
4		3 – 30 KHz	Miriamétricas	B.Mam
5	ULF	30 – 300 KHz	Kilométricas	B.km
6	VLF	300 – 3000 KHz	Hectométricas	B.hm
7	LF	3 – 30 MHz	Decamétricas	B.dam
8	MF	30 – 300 MHz	Métricas	B.m
9	HF	300 – 3000 MHz	Decimétricas	B.dm
10	VHF	3 – 30 GHz	Centimétricas	B.cm
11	UHF	30 – 300 GHz	Milimétricas	B.mm
12	SHF	300 – 3000 GHz	Decimilimétricas	B.dmm
13	EHF	3 – 30 THz	Centimilimétricas	B.cmm
14		30 – 300 THz	Micrométricas	B. m
15		300 – 3000 THz	Decimicrométricas	B.d m

La banda MF es la que se emplea en modulaciones AM, la VHF para FM, mientras que las bandas UHF y SHF se emplean para la televisión analógica convencional y para televisión por satélite respectivamente.

Este cuadro puede ser ampliado a otras frecuencias (véase cuadros 1 a 4 transparencia numero 58).

1.3.2. Reglamento de radiocomunicación. CNAF.

El espectro es limitado, aunque reutilizable a cierta distancia. Por ello es necesaria una regulación internacional para que funcionen el mayor número de servicios con el menor grado de interferencia mutua. Es la Unión Internacional de Telecomunicaciones quien gestiona y planifica el espectro y quien publica el Reglamento de las Comunicaciones, donde se incluyen todos los aspectos de la regulación internacional del espectro. Dentro de este documento existe un apartado llamado *Cuadro de atribución de frecuencias*, donde se especifica que servicios se pueden utilizar y en que bandas de frecuencias.

CNAF: Cuadro nacional de atribución de frecuencias. Es como el cuadro de atribución de frecuencias pero con las particularidades de España. Esta información está disponible en el BOE.

1.4. RUIDO E INTERFERENCIAS.

Se define por ruido cualquier alteración no deseada de la señal que es independiente que ésta exista o no. Como los requisitos de calidad de los sistemas se miden mediante la relación señal a ruido (S/N), es importante el estudio y caracterización de este ruido. En un sistema de transmisión– recepción de señales, existe un ruido externo debido al canal de transmisión (ruido radioeléctrico externo, muy elevado y nada deseable) y un ruido interno propio del equipo que añaden los distintos componentes que lo forman, el cual tendrá un valor diferente dependiendo del punto de la circuiteria del equipo en el que nos encontremos.

1.4.1. Ruido interno.

Este tipo de ruido se caracteriza mediante los parámetros *Figura de ruido* (F) y *Temperatura equivalente de ruido* (Teq). Este ruido es producido por los distintos componentes del equipo receptor debido a diferentes causas:

- Ruido Térmico: Es el ruido asociado al valor óhmico de una resistencia. Es el tipo de ruido más común y siempre está presente en todos los elementos.
- Ruido Shot: Ruido debido a electrones que atraviesan una barrera de energía, y que se produce en transistores y diodos.
- Ruido Flicker: Aparece en transistores y es importante a BF.

Ruido Térmico:

Es el ruido más sencillo de analizar y se puede caracterizar de forma simple. Si existe otro tipo de ruido, se puede analizar colocando una fuente de ruido térmico equivalente. Se produce debido al movimiento aleatorio de electrones en una resistencia por estar ésta a una temperatura distinta de 0 K, produciendo entre sus terminales una tensión aleatoria. El valor medio de este ruido es cero ($V_n=0$), pero no así su potencia ($V_n^2 \neq 0$). Siempre que exista una resistencia a una temperatura, esa resistencia es una fuente de ruido térmico.

$K = \text{Cte de Boltzman} = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$

$B = \text{Ancho de banda}$

$R = \text{valor del resistor}$

$T = \text{Temperatura en K}$

El ruido térmico es un *ruido blanco*, es decir, su espectro de ruido tiene componentes a todas las frecuencias. Se puede modelar una resistencia real como un sistema compuesto por un generador y una resistencia ideal no ruidosa.

R

+

+ sistema

$R \sim -$

-

$P_{n \text{ tx}}$

resistencia modelo de

ruidosa resistencia ideal

La potencia de ruido transmitida ($P_{n \text{ tx}}$) dependerá de la impedancia (Z_{in}) del sistema. Para el caso ideal de que exista adaptación ($Z_{in} = R$):

B = Ancho de banda equivalente de ruido [Beq].

Para explicar este concepto de Beq, vemos el siguiente esquema, en el que se supone que todos los elementos están adaptados.

$H(f)$

El ruido presente a la entrada del sistema será el ruido térmico de valor constante KT , mientras que el ruido a la salida será ese ruido térmico multiplicado por la respuesta en frecuencia del filtro $H(f)$, la cual presenta una forma gaussiana. Por tanto el ruido a la salida dejará de ser constante y presentará una forma también gaussiana.

Ruido $|H(f)|^2$ Ruido

Entrada G salida

$KT B_{w3dB}$

$f f f$

$fG ?$

Si el filtro fuera ideal, el ancho de banda a la salida sería B , pero como no es ideal, para saber la potencia de ruido a la salida hay que hacer la integral.

Como no se conoce la forma de la respuesta en frecuencia del filtro, no se puede resolver esta integral. Para solucionar este problema se define un sistema equivalente al anterior en el que si se conozca la respuesta en frecuencia del sistema. Según esto, se elige un sistema cuya respuesta tenga la misma frecuencia central (fG) y el mismo área, pero con respuesta ideal.

$|H(f)|^2_{eq}$

Beq

Área = Beq $\cdot G$

$fG f$

Como el área de este sistema es igual al área del sistema original, podemos establecer la ecuación:

$$G \text{ Beq} = \int |H(f)|^2 df \quad \text{Beq} = \frac{\int |H(f)|^2 df}{G}$$

G es el valor de $|H(f)|^2$

para fG

Luego entonces se puede definir el ruido a la salida del sistema en función del ancho de banda equivalente del sistema:

$$N_s = K T \text{ Beq } G$$

Nota: No es lo mismo B_{eq} que B_{w3dB} . El parámetro que se usa para calcular el ruido será el B_{eq} más estricto (el del filtro de frecuencia intermedia FI), aunque si no se dispone de este valor se puede aproximar por el valor de B_{w3dB} . Además, esto es suponiendo que solo existe ruido interno.

FACTOR DE RUIDO [F]:

Se define como la pérdida de calidad (pérdida de relación S/N) que sufre una señal al atravesar un sistema, suponiendo que esté adaptado y que la fuente esté a una temperatura $T_o = 290$ K (temperatura de referencia). Solo si se cumplen estas condiciones la pérdida de calidad es el Factor de ruido.

$$T = T_o (S/N)_e (S/N)_s$$

R Sistema

R = fuente de ruido

V_g térmico

La misma definición, pero expresada en dB, se conoce como Figura de ruido. Este parámetro es el que normalmente se utiliza.

$$F[dB] = (S/N)_e[dB] - (S/N)_s[dB]$$

Figura de ruido

$$F[veces] = \frac{(S/N)_e}{(S/N)_s}$$

Factor de ruido

Si suponemos que el sistema con el que trabajamos es un amplificador de ganancia G:

$$F = \frac{(S/N)_e}{(S/N)_s} = \frac{\frac{S_e}{K T_o B}}{\frac{S_e G}{G K T_o B + N_{int}}} = 1 + \frac{N_{int}}{G K T_o B}$$

F siempre > 1 ; F (dB) siempre > 0 dB

$$N_{int} = (F-1) G K T_o B$$

Si la temperatura a la que se encuentra la resistencia es igual a T_o , el ruido a la salida será

En cambio, si la temperatura del resistor, en lugar de ser T_o , es igual a la temperatura de la fuente T_F , el valor del ruido será

Nota: Estos dos últimos resultados serán válidos siempre que el sistema esté adaptado.

TEMPERATURA EQUIVALENTE DE RUIDO [T_{eq}]

Se define como la temperatura que tendría una fuente de ruido térmico a la entrada del sistema de forma que a su salida el ruido producido fuese idéntico al ruido interno del sistema.

$$N_{int} = K T_o B G (F - 1) = K T_{eq} B G \quad ! \quad T_{eq} = T_o (F - 1)$$

$$T_o + T_{eq}$$

Sistema

(amplificador)

Suponemos este sistema ideal (sin ruido interno). Se puede considerar que el ruido interno se encuentra fuera del sistema, solo añadiendo a la temperatura que tuviera el resistor una temperatura equivalente de ruido T_{eq} .

Por tanto, $K(T_o + T_{eq})B$ será el *ruido total* del sistema referido a la *entrada*. Para referir el ruido a otro punto del sistema, solo tengo que multiplicar este valor por la ganancia. Si el sistema tuviera más de un bloque, para referir el ruido a otro punto solo tengo que multiplicar el valor a la entrada por las ganancias de los distintos bloques que atravesara.

$$\text{Valor de ruido de salida: } N_s = K T_o B G + N_{int} = K T_o B G + K T_{eq} B G = K(T_o + T_{eq}) B G$$

Ahora al incorporar la T_{eq} al valor del resistor, ya no se trabaja con el ruido interno, ya que éste se encuentra incluido en el valor del resistor. Esto quiere decir que puedo suponer que se trabaja con sistemas ideales.

!

Si en lugar de sistemas amplificadores trabajamos con atenuadores, éstos presentarán una atenuación $[L]$ en la señal. Para el cálculo del ruido será necesario conocer el valor del Factor de ruido del atenuador (si éste es un equipo amplificador atenuador o un mezclador este dato lo proporciona directamente el fabricante del equipo).

Si se trata de un tramo de cable (por ejemplo coaxial), el valor de F se calculará según la ecuación: $F = 1 + (L - 1) \cdot T_{amb} / T_o$. Para el caso ideal (que es el que normalmente se da) de que la temperatura ambiente (T_{amb}) sea igual a T_o , el cálculo de F se simplifica, de forma que se puede decir que el factor de ruido coincide con las pérdidas del atenuador.

Para el caso de que existan varios sistemas interconectados, el factor de ruido y la temperatura equivalente total del sistema se calculan del siguiente modo:

(2)

(1) (5)

$$T = T_o \quad G_1 \quad G_2 \quad G_n$$

$$R \quad F_1, \quad T_{eq1} \quad F_2, \quad T_{eq2} \quad F_n, \quad T_{eqn} \quad R$$

$$V_g$$

(3) (4)

$$K T_o B$$

$$(1) \quad K(T_{eq} + T_o)B \quad (2) \quad K(T_{eq} + T_o)B G_1$$

$$(3) \quad K T_o B G_1 + K T_o B G_1 (F_1 - 1) = X_1 \quad (5) \quad K T_o B G_1 T_{FT}$$

$$(4) G_2 X_1 + K T_o B G_2 (F_2 - 1) = X_2$$

Para el cálculo de los valores totales buscados se usan las expresiones siguientes. La segunda de ellas se conoce como Formula de Friis.

$$G_T = G_1 G_2 \dots G_n$$

$$F_T (\text{vecas}) = F_1 (\text{vecas}) + \frac{F_2 - 1}{G_1} (\text{vecas}) + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} (\text{vecas}) + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

$$T_{eq_T} = T_{eq1} + \frac{T_{eq2}}{G_1} + \frac{T_{eq3}}{G_1 G_2} + \dots + \frac{T_{eqn}}{G_1 G_2 \dots G_{n-1}}$$

Es muy importante el orden en que se colocan los diferentes bloques que componen el sistema. Como se aprecia en la fórmula, el elemento que mas domina es el primero de la cadena, puesto que el resto viene ponderado por los anteriores. Por tanto, si se quiere un sistema que tenga un F pequeño, se ha de colocar en las primeras posiciones los mejores elementos, puesto que son los que mas influyen en la calidad final.

1.4.2. Ruido externo.

El ruido externo se caracteriza por la *Temperatura de ruido de la antena [TA]*. Este ruido es debido a los campos electromagnéticos que existen en el espacio y que son captados por la antena.

Este ruido no es un ruido térmico, pero para trabajar de forma mas simple se define una fuente de ruido térmico equivalente que mide el mismo nivel de ruido que la antena. Para poder suponer que se ha medido un nivel de ruido térmico de valor V_n (rms), es necesario que exista una resistencia que genere este ruido [R_r = resistencia térmica o resistencia de radiación de la antena].

+ Ruido térmico !

R_r equipo

TA medida RL Si suponemos que $T = T_A$ y que $R = R_r$:

—

A partir de esta expresión ya podemos calcular la temperatura de ruido de la antena T_A :

Suponiendo el caso de que el equipo de medida y la antena estuvieran adaptados, es decir, la resistencia de carga de éste fuera igual a la resistencia de radiación de la antena ($R_r = R_L$), el cálculo de la temperatura de ruido T_A se simplifica a:

ya que $K T_A B = P_n$ (P_n = Pot de ruido medido con el equipo)

Si la antena no fuera ideal y tuviera pérdidas, se pueden modelar esas pérdidas como un bloque atenuador situado detrás de la antena.

antena

real L = pérdidas de la antena

= eficiencia de la antena

N_A' sistema

atenuad

$$L = 1/$$

N_A' representa el valor de ruido total presente en la antena. Este valor de ruido es la suma del ruido que causa la antena ($K T_A B$) y del ruido interno del bloque atenuador colocado ($K T_o (F-1)$). Es decir:

$$N_A' = K T_A B + K T_o B (F-1)$$

Pero se sabe que si la temperatura del atenuador es igual a T_o , su factor de ruido coincidirá con las pérdidas, es decir $F = L = 1/$, por lo que la fórmula anterior se puede simplificar a:

El valor T_A' es la temperatura que engloba tanto al ruido interno como al ruido que causa la antena, es decir $T_A' = T_A - T_o + T_o$.

Si la eficiencia de la antena es 1 (sistemas mas usuales), $T_A' = T_A$. Solo a bajas frecuencias la eficiencia no es igual a 1.

Ejemplo:

N_A N_T

Demodulad

$K T_A B$ T_{eqT} , G_T

$$N_A = K (T_A + T_{eq}) B$$

$$N_T = N_A \cdot G_T$$

También se podría incluir el bloque de pérdidas de la antena en el siguiente bloque, con lo que se tendría una nueva T_{eqT} y G_T .

La temperatura de ruido de una antena [T_A] depende de diversos factores:

- Frecuencia: A mayor frecuencia menor será T_A .
- Diagrama de radiación de la antena.
- Orientación de la antena.
- Época del año.

Una antena que apuntara hacia todas direcciones tendría una temperatura de ruido que sería un promedio de la temperatura para cada dirección, cada una ponderada por un peso según el diagrama de radiación. Por ejemplo, una antena que apuntara hacia el espacio tendría una T_A mucho menor que otra que apuntara hacia el suelo.

1.4.4. Cálculo de la relación C/N de un sistema.

Estudiemos el caso de un sistema receptor típico que se encuentra tras la antena y justo antes del demodulador. Existen varios casos:

A FT , GT , TeqT D

(C/N)_D

Filtro Amp conv Filtro Amp Demod

CD (señal) PR ND (ruido) RF FI

NA = ruido referido al punto A ; ND = ruido referido al punto D.

$$P_R = C_A = P[w/m^2] S_{eq} [m^2]$$

$$! S_{eq} = \frac{\lambda^2}{4\pi} G_R$$

$$C_D = C_A G_T$$

$$N_D = N_A G_T + KToB(F_T - 1)G_T$$

$$! N_A = KT_A B = KT_A B\eta + KToB(1 - \eta)$$

$$N_D = K(T_A + Teq_T)BG_T = KT_A BG_T + KBT_o(F_T - 1)G_T$$

$$! To(F_T - 1) = Teq_T$$

$$\frac{C}{N}_D = \frac{C_A G_T}{KTsBG_T} = \frac{C_A}{KTsB}$$

Segundo caso: También se podría modelar la antena como una resistencia ruidosa con una determinada temperatura de ruido TA, y el bloque que le sigue como un solo bloque con una TeqT. Según este esquema, las ecuaciones a plantear serían:

$$Ns_{refA} = K(T_A + Teq_T)B \quad T_A + Teq_T = Ts$$

(Nsref A = Ruido del sistema referido a A)

$$N_D = Ns_{refA} G_T = KTsBG_T$$

! este valor coincide con el anterior ND.

$$\frac{C}{N}_D = \frac{C_A G_T}{KTsBG_T} = \frac{C_A}{KTsB}$$

Tercer caso: Si no se conociera el valor de GT, los cálculos se harían de la siguiente forma:

$$Ns_{refA} = KT_A B\eta + KToB(1 - \eta) + KTeqB$$

$$KT_A B\eta + K T_o B (1-\eta) = K T_A' B$$

El primer término de la ecuación recuadrada corresponde al ruido externo, el segundo al ruido interno de la antena, y el tercero al ruido interno del sistema receptor. El que predomine un tipo de ruido u otro dependerá de la frecuencia de trabajo.

Condiciones de diseño.

- Baja frecuencia. Radiodifusión de AM (f " 1MHz).

En este caso, el ruido que capta la antena es muy elevado, por lo que la temperatura de ruido es enorme ($T_A \approx 10^6$ K). Además, debido a la frecuencia de trabajo la eficiencia de la antena es muy pequeña ($\eta \approx 10^{-4}$). Debido a esto, el ruido externo va a ser muy grande en comparación con el ruido interno de los bloques del sistema de recepción, por lo que aunque los bloques sean de mucha calidad, no sirve para nada.

Aun siendo muy pequeña, este valor se ve multiplicado por $K T_A B \eta$, por lo que el primer término de la ecuación del ruido (ecuación de $N_{sref A}$) será el predominante en este diseño. Esto quiere decir que el ruido que predomina es el exterior y que por tanto un sistema de recepción con gran calidad (bajo ruido interno) no sirve para mejorar el sistema.

$$(C/N)_D - (C/N_{ext})_D - N_{ext} = K T_A B \eta$$

$$(C/N_{ext})_A - (C/N_{ext})_D$$

Vemos que el sist rx no afecta a la C/N

- Alta frecuencia. Radiodifusión por satélite (f " 12 GHz).

En este caso la temperatura de ruido de la antena es muy pequeña ($T_A \approx 10$ K), mientras que su eficiencia es prácticamente la unidad ($\eta \approx 1$). Ahora, en la ecuación del ruido (ecuación de $N_{sref A}$), el primer término (ruido externo captado por la antena) será muy pequeño, y el segundo (ruido interno de la propia antena) será prácticamente nulo (debido al término $1-\eta$). Por tanto en este caso el término dominante será el tercero, lo que significa que el ruido predominante es el ruido interno del sistema de recepción. Ahora la calidad de los bloques es determinante para la relación C/N, por lo que cuanto mejores sean (menor ruido interno presenten) mejor será la calidad de la señal recibida (mayor será la relación C/N).

Ejemplo de alta frecuencia: 1ª forma.

Sistema de recepción (FT,GT,TeqT)

$T_{amb}=290$ K

A B C D

=0'9

ND ?

L=3dB

$B_{eq}=10$ MHz $G=20$ dB $G=23$ dB

$$T_A=200 \text{ K } F=3\text{dB } F=10\text{dB}$$

$$N_D(\text{dBw}) = 10 \log \frac{N_D(w)}{1w} = -88\text{dBw}$$

$$\text{Nota: dBm} = \text{dBw} + 30 \text{ dB}$$

2ª forma:

Construir con los dos amplificadores y el atenuador un solo bloque equivalente de parámetros FT, GT y TeqT.

A D

FT GT

TeqT

Sistema Rx

$$T_A' = T_A \eta - T_o \eta + T_o = 209 \text{ K}$$

$$Teq_T = (F_T - 1)T_o = (418 - 1)290 = 922 \text{ K}$$

$$T_s = T_A' + Teq_T = T_A' + T_o(F_T - 1) = 1131 \text{ K}$$

$$N_A = KTsB$$

$$N_D = N_A G_T = KTsBG_T = 155 \cdot 10^{-13} \cdot 10^4 = 155 \cdot 10^{-9} \quad (-88\text{dBw} = -58\text{dBm})$$

3ª forma.

Se puede resolver calculando el ruido en cada punto (A, B, C, D), que se iría acumulando en cada uno de ellos y teniendo en cuenta el BeqT.

$$N_A = KT_A' B \eta + KToBG(F - 1) = KT_A' B \eta + KToB(1 - \eta) = 288 \cdot 10^{-14} \text{ w}$$

1er término ! ruido en la antena (antes del bloque rx)

2º término ! ruido interno (fórmula valida si Tamb = To)

$$N_B = N_A G1 + KToBG1(F1 - 1) = 288 \cdot 10^{-12} + 119 \cdot 10^{-11} = 148 \cdot 10^{-11} \text{ w}$$

$$N_C = N_B G2 + KToBG2(F2 - 1) = 741 \cdot 10^{-12} + 199 \cdot 10^{-14} = 742 \cdot 10^{-12} \text{ w}$$

$$N_D = N_C G3 + KToBG3(F3 - 1) = 148 \cdot 10^{-9} + 718 \cdot 10^{-11} = 155 \cdot 10^{-9} \text{ w}$$

$$N_D(dBw) = 10 \log \frac{N_D(w)}{1w} = -88dBw$$

$$N_D(dBw) = 10 \log \frac{N_Dmw}{1mw} = -58dBw$$

Si nos dieran como dato el nivel de señal de información que capta la antena, ya se podría calcular la relación C/N.

$$\frac{C}{N}_D = C_D - N_D = -28 + 58 = 30dBw$$

$$\frac{C}{N}_D = C_A(dBw) - KTsB(dBw) = -68 + 98 = 30dBw$$

Nota: Todas las definiciones de F y Teq solo son aplicables cuando se cumplen las siguientes condiciones:

- Existe adaptación entre la antena y el sistema de rx.
- La temperatura de los resistores coinciden con la temperatura de referencia To.

1.4.5. Interferencias.

Se denomina interferencia al efecto causado por una o varias emisiones, radiaciones o sus combinaciones en un sistema de radiocomunicación que se manifiesta como degradación, falseamiento o pérdida de información que se obtendría en ausencia de la energía no deseada.

Siguiendo una clasificación técnica, las interferencias se pueden clasificar como *Interferencia por canal* e *Interferencia por canal adyacente*. Si se clasifican según un criterio administrativo, las interferencias se clasifican en *Admisibles*, *Aceptables* o *Perjudiciales*.

- Interferencia por canal: Aquella causada por otro transmisor que emite en la misma frecuencia que la captada por el emisor.
- Interferencia por canal adyacente: Igual definición que para el caso anterior salvo que ahora las frecuencias no coinciden, sino que la frecuencia interferente sería la inmediatamente adyacente a la de interés, denominada frecuencia adyacente.
- Interferencia administrativa: Nivel de interferencia que en condiciones determinadas implica una degradación de la calidad de recepción que se puede considerar insignificante pero debe ser tomada en cuenta en la planificación.
- Interferencia aceptable: Nivel de interferencia más alto que el anterior que produce una moderada degradación de la calidad señal recibida que en condiciones normales puede ser aceptable para la administración.
- Interferencia perjudicial: Nivel de interferencia que degrada gravemente la calidad de la señal, ya que la interrumpe repetidamente o impide el correcto funcionamiento de un sistema.

Las interferencias afectan a la relación C/N cuando se trabaja en un sistema punto a punto. En este caso C/I será la relación entre el nivel de señal deseada [Cd] y el nivel de señal interferente [Ci].

$$(C/I) = (C_d / C_i)$$

Para el caso de una transmisión punto–zona, el parámetro de calidad será la región de protección [$R_p = (C/I)_{\min}$], que se define como el valor mínimo de la relación entre la señal y la interferencia que permite obtener una calidad de recepción dada en un canal determinado en un punto determinado.

En sistemas en los que los transmisores estén muy separados, el parámetro de calidad que se utiliza es la relación C/N . En cambio, si se quiere optimizar el espectro radioeléctrico, se utilizará la relación C/I .

Puede haber una o varias señales interferentes que se sumarán en potencia.

$$G_T = 40dB$$