TEMA 1: INTRODUCCIÓN - DISTORSIÓN Y RUIDO

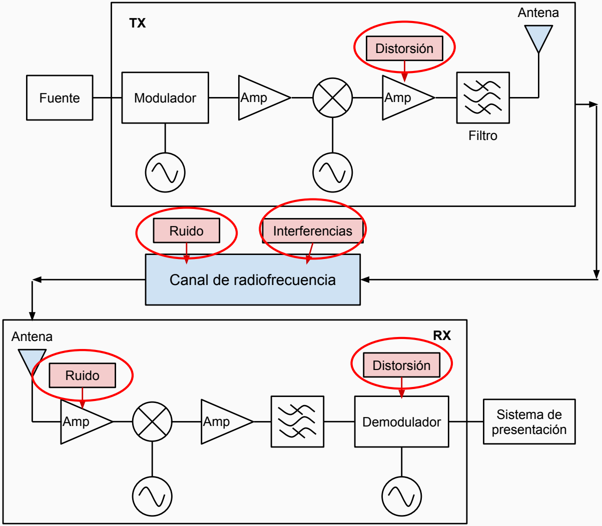
Comunicaciones Inalámbricas

Marina Zapater

Primavera 2015

Departamento de Física Aplicada III, Universidad Complutense de Madrid

RUIDO Y DISTORSIÓN



DISTORSIÓN

- Dado un sistema (red de dos puertas), al aplicar $x(t)$ a la entrada, se obtendrá una señal $y(t)$ a la salida. Consideramos que no hay distorsión si:

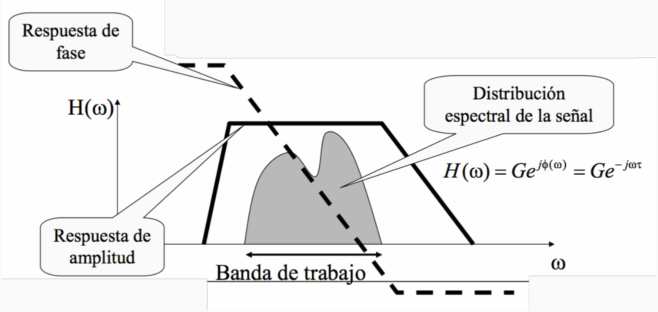
$$y_{ideal}(t) = k \cdot x(t - \tau) \tag{1}$$

$\rightarrow$ entrada y salida sólo difieren en ganancia y retardo.

- Definimos el error como: $e(t) = y(t) - y_{ideal}(t)$
- Y la distorsión como la relación de las potencias medias de error y de señal:

$$D = \frac{< e^2(t) >}{< y^2(t) >} = \frac{P_e}{P_y} \tag{2}$$

- La respuesta es lineal e invariante con el tiempo.
- La respuesta en amplitud es constante con la frecuencia.
- La respuesta en fase es lineal con la frecuencia, es decir, el retardo es constante: $\tau = -d\phi/d\omega$

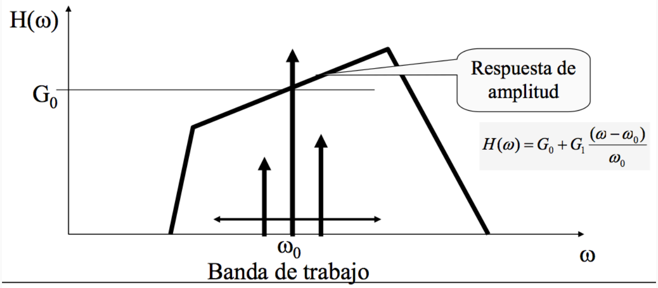


Importante: hablamos siempre de dentro de la banda de trabajo.
Fuera de la banda de interés, nos interesa que la señal caiga rápidamente (para minimizar ruido).

TIPOS DE DISTORSIÓN

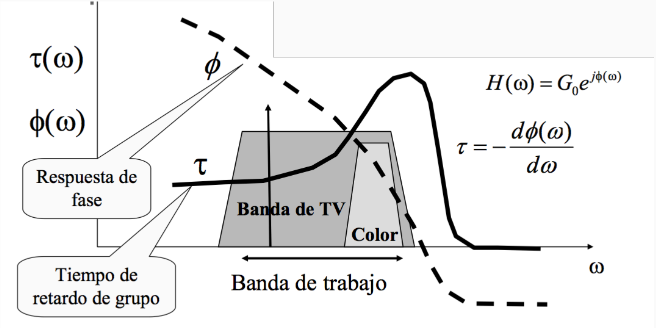
- Distorsión lineal
  - de amplitud
  - de fase (retardo no uniforme)
  - por ecos
- Distorsión no lineal
  - Saturación y armónicos
  - Productos de intermodulación
  - en señales moduladas

- La respuesta espectral varía en amplitud con la frecuencia.
  - En modulación PM/FM genera una modulación AM.
  - En digital, depende mucho de la respuesta (y tipo) de filtro.
- Suele ser efecto de intentar que la señal caiga rápidamente en los extremos de la banda.
- Se recupera mediante ecualizadores.

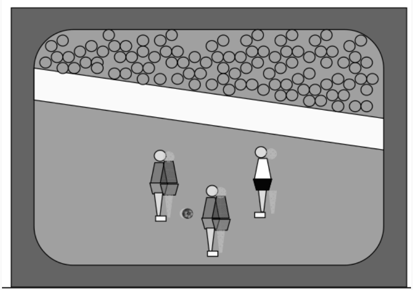


- Hemos visto que, si la fase es lineal, el retardo es constante.
- Se corrige mediante ecualizadores.
- Especialmente importante en transmisión de señales de banda ancha.

  Por ejemplo: Distorsión lineal en TV color.



Distorsión en TV color



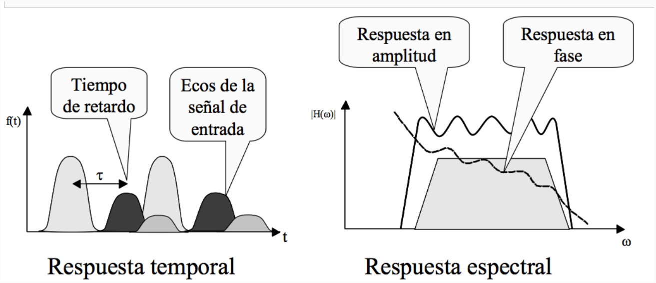
Otros ejemplos:

- Propagación medio dispersivo (índice de refracción dependiente de la frecuencia): reflexión ionosférica.

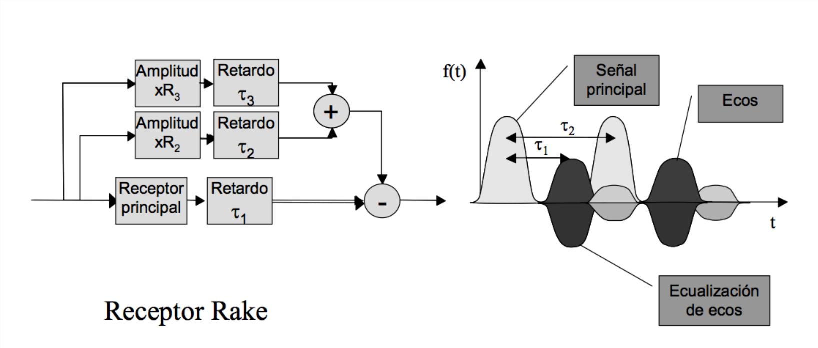
- Ecos y reflexiones múltiples: reflexión multitrayecto, reflexiones por desadaptaciones.
- $y(t) = G[k_1 \cdot x(t - \tau_1) + k_2 \cdot x(t - \tau_2) + k_3 \cdot x(t - \tau_3) + ...]$
  Se supone que $k_1 > k_2 > k_3$ y $\tau_1 < \tau_3$ (aunque esto último no es siempre así)
- Afecta a: transmisión en banda ancha (vídeo), modulación FM, transmisiones digitales
- Los ecos afectan cuando el tiempo de retardo sea:
  - del orden o superior al tiempo entre pulsos (en sistemas digitales),
  - del orden o superior al inverso de la banda de transmisión (en sistemas analógicos).

DISTORSIÓN (LINEAL) POR ECOS

- Provocan rizado en la respuesta de amplitud y fase
- Es posible ecualizar la señal para eliminar ecos, pero si varían con el tiempo, esto es muy difícil.
- Por ejemplo: telefonía móvil digital (propagación de señal en ambiente urbano).

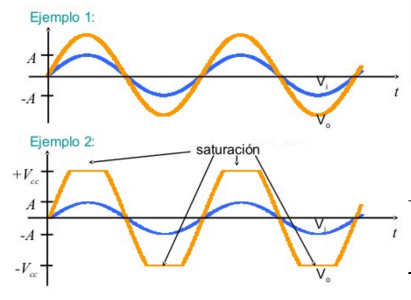


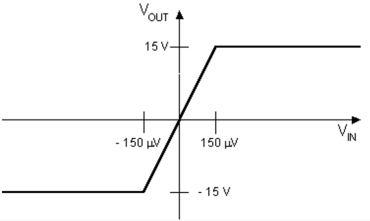
- Para ecualizar los ecos, el receptor Rake hace un filtrado adaptativo.
- Recibe con cierta periodicidad secuencias conocidas, para conocer cómo debe ecualizar los ecos (modifica estrategia).



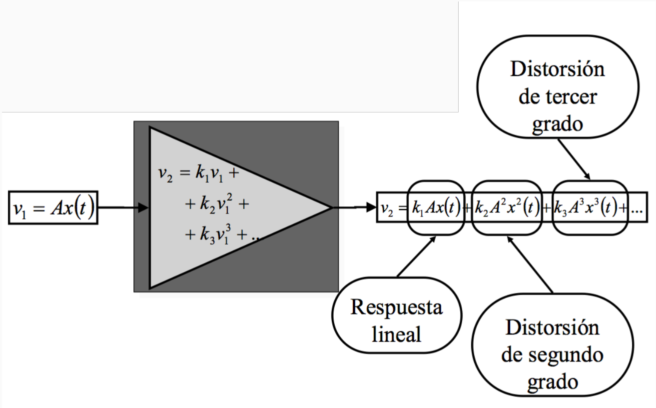
DISTORSIÓN NO LINEAL

- Pensamos en sistemas donde la no-linealidad es un factor pequeño y no deseado.
- Tenemos distorsión no-lineal en amplificadores, mezcladores, etc.
- Cuando hay distorsión no-lineal a la salida aparecen frecuencias que no había a la entrada.
- Por ejemplo, pensemos en un amplificador:

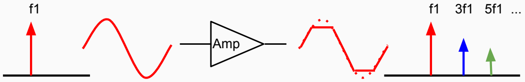




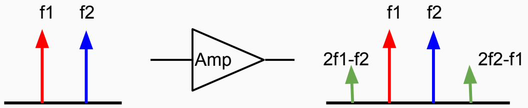
- Suponemo un sistema sin memoria, invariante en el tiempo, con una entrada $v_1 = A \cdot x(t)$
- Estimamos la no-linealidad utilizando un modelo polinómico (nos podemos quedar con una aproximación de 3r orden).



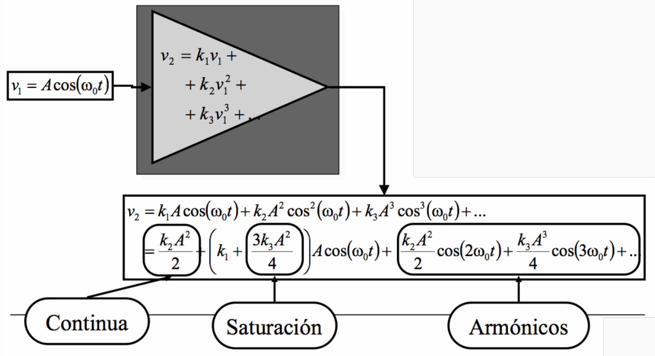
- En emisión: un amplificador no-lineal, cuando satura, añade armónicos que pueden interferir en otros sistemas → estudiamos la respuesta del amplificador a un tono puro.



- En recepción (cabezal RF): aparecen productos de intermodulación → estudiamos la respuesta del amplificador a dos tonos muy próximos.

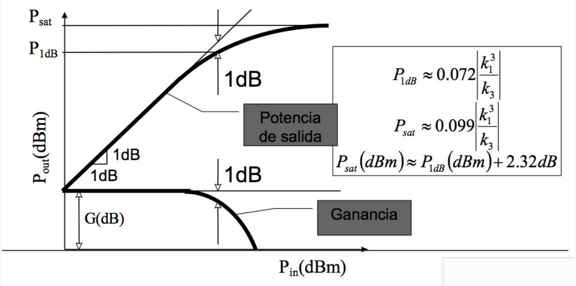


Si inyectamos un tono sinusoidal puro al dispositivo no lineal:

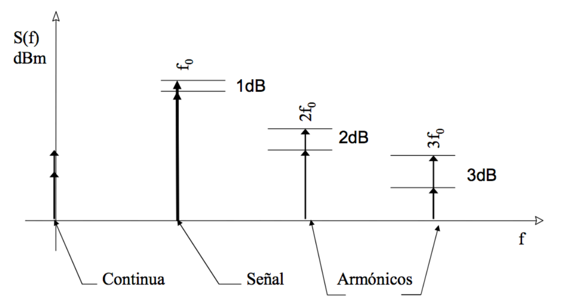


- La saturación se especifica indicando la potencia de salida para la cual la ganancia se ha reducido 1dB. Le llamamos Punto de compresión a 1dB (P_{1dB}).
- Potencia de saturación (P_{sat}), nivel máximo de potencia a la salida.
- En amplificadores, usamos "Potencia de salida referida a saturación" $\rightarrow$ "Output Power Back-Off" (OPBO):

$$OPBO(dB) = P_{sat}(dBm) - P_o(dBm)$$



- La saturación provoca la aparición de armónicos de la señal de entrada.



DISTORSIÓN NO LINEAL. ARMÓNICOS

- Se eliminan por filtrado en señales de banda estrecha (y es una pérdida de ganancia).
- En señales de banda base, o que cubren más de 1octava son importantes.
- Se mide en % de la tensión eficaz del armónico respecto a la tensión de salida, o en dB de potencia.
- Calculamos el nivel de un armónico de orden N (P_{AN}) en un punto de potencia de salida (P_0)como:

$$P_{AN} = P_{AN0}(\frac{P_0}{P_{REF}})^N \qquad (3)$$

o bien: $P_{AN}(dBm) = P_{AN0}(dBm) + N(P_0(dBm) - P_{REF}(dBm))$
donde: P_{REF} es la potencia de salida en el punto tomado como referencia para medir el armónico (P_{AN0})

EJEMPLO 1: SATURACIÓN DE UN AMPLIFICADOR

Libro, p.24, errata

Un amplificador de potencia trabaja con una señal de RF cuya relación de potencia media a potencia de pico es $P_{med}/P_{pico} = 0.2$. Si el nivel de saturación está 2dB por encima del pto. de compresión de 1dB, que es de 50dBm,

1. Determine la potencia máxima de salida para que nunca sature
$$P_{media}(dBm) = P_{pico}(dBm) - 7 = P_{1dB} - 7 = 43dBm$$
2. Determine el OPBO en este caso.
$$OPBO(dB) = P_{sat}(dBm) - P_{media}(dBm) = 52 - 43 = 9dB$$

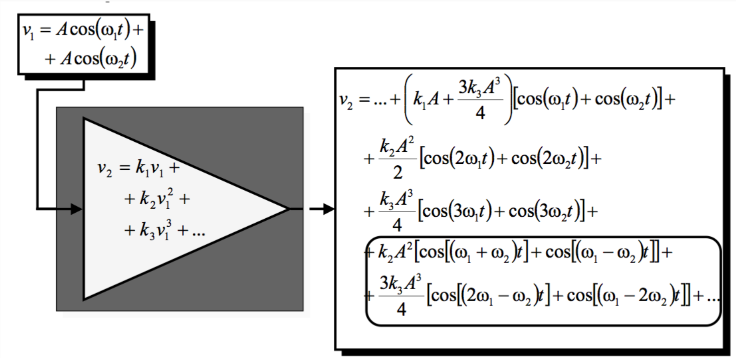
Un amplificador de potencia lejos de saturación genera una distorsión no lineal de forma que, al poner una entrada formada por un tono puro con una potencia de 10dBm a la salida produce una potencia del fundamental de 22dBm, un segundo armónico de -10dBm y un tercer armónico de -18dBm. Determine la potencia del segundo y tercer armónicos para una potencia de entrada de 13dBm.

$P_o(dBm) = P_{in} + G(dB) = 26dBm$

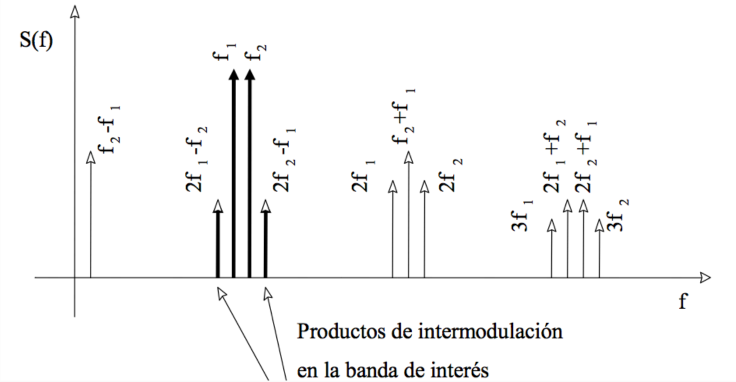
$P_{A2}(dBm) = P_{A20}(dBm) + 2(P_0(dBm) - P_{ref}(dBm)) = -10 + 8 = 2dBm$

$P_{A2}(dBm) = P_{A30}(dBm) + 3(P_0(dBm) - P_{ref}(dBm)) = -18 + 12 = -6dBm$

- Aplicamos 2 tonos de frecuencias próximas a la entrada.
- Aparecen frecuencias procedentes de la mezcla de las anteriores.



- Las frecuencias alejadas de f_1,f_2 se filtran.
- Los productos de intermodulación de 3r orden de $(2f_1 - f_2)$ y $(2f_2 - f_1)$ quedan en la banda original y es difícil filtrar.



INTERMODULACIÓN DE TERCER ORDEN

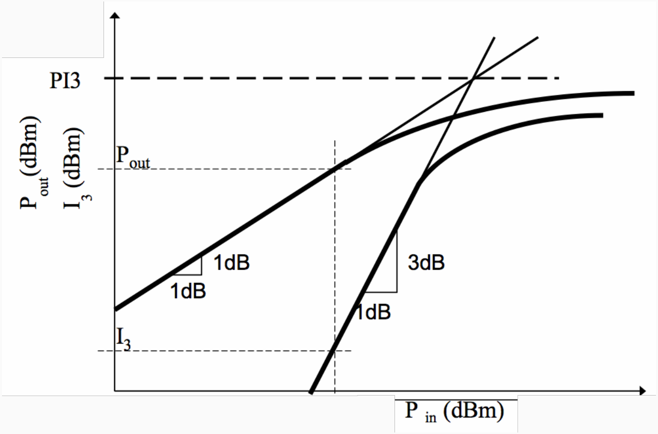
- P_0: potencia total de las señales de entrada
- La potencia de los productos de intermodulación (I_3) es proporcional al cubo de la potencia de entrada: $I_3 = CP_0^3$
- La constante de conversión entre potencia de productos de intermodulación y potencia de salida se da como punto de intersección de tercer orden (PI_3).

  donde intersectan las rectas teóricas
- Obtenemos: Para $P_0 = I_3 = PI_3 \rightarrow I_3 = \frac{P_0^3}{PI_3^2}$

  o bien: $I_3(dBm) = 3[P_0(dBm)] - 2[PI_3(dBm)]$
- Relación señal a producto de intermodulación:

  $\frac{P_0}{I_3}(dB) = 2PI_3(dBm) - 2P_0(dBm)$
- Esto representa una relación de señal a productos de intermodulación generados $\rightarrow$ índice de calidad de la señal.

Punto de intersección de tercer orden (PI_3)



EJEMPLO 3: PRODUCTOS INTERMODULACIÓN CON 2 TONOS

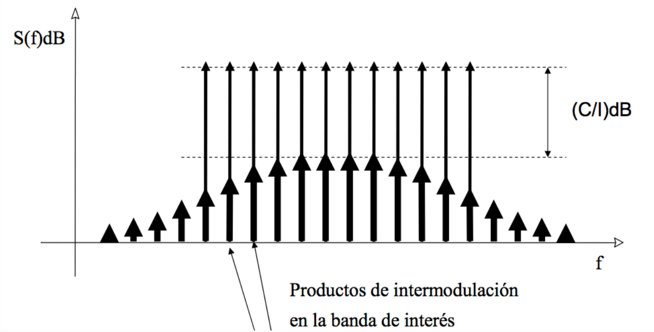
Tenemos un amplificador de potencia en el que el valor $PI_3 = 45dBm$ y con ganancia de 30dB. Para comprobarlo, se conectan a la entrada del amplificador una señal de 2050MHz y 1mW y otra de 2055MHz con la misma potencia. La salida se conecta a un analizador de espectros con un atenuador de 40dB.

1. Dibuje las señales que aparecerán en el analizador de espectros
   $f_1 = 2050MHz, f_2 = 2055MHz,$
   $(2f_2 - f_1) = 2060MHz, (2f_1 - f_2) = 2045MHz$
2. Calcule los niveles de potencia de las señales.
   Potencia total de f_1, f_2 después del amplificador $\rightarrow$ 33dBm
   Potencia de los productos de intermodulación:
   $I_3(dBm) = 3P_0(dBm) - 2PI_3(dBm) = 3 \cdot 33 - 2 \cdot 45 = 9dBm$
   Después del atenador:
   Potencia de cada señal (f_1, f_2): $30dBm - 40dB = -10dBm$
   Potencia de cada producto de intermodulación:
   $6dBm - 40dB = -34dBm$

- Podemos encontrarnos con varios elementos no lineales en cascada, cada uno generando productos de intermodulación.
- No conocemos la fase de las diversas señales, así que no sabemos si tendremos suma constructiva o destructiva.
- Asumiremos:
  - Los PI de cada etapa se deben únicamente a las señales originales de entrada (los PI anteriores son pequeños y no generan nuevos PI)
  - Determinaremos relaciones señal a PI, es decir $\frac{P_0}{I_3}$
  - Si alguna etapa genera PI mucho mayores que las demás, esa domina (diferencia de 10dB) y se consideran despreciables el resto.
  - Para etapas con PI de magnitud semejante, sumaremos niveles de potencia (media estadística).
- Valor para el PI_3 del conjunto de etapas:

$$(PI_3)_{total} = \frac{1}{\sqrt{\sum_i \left(\frac{1}{(PI_{3,i} \cdot g_{i+1} \cdot g_{i+2} \cdot g_N)^2}\right)}}$$

El mismo proceso de generación de productos de intermodulación se da si en vez de 2 tonos a la entrada, ponemos N tonos.



INTERMODULACIÓN DE TERCER ORDEN. N TONOS

- En este caso, la relación entre la potencia de la portadora y los productos de intermodulación (C/I) se da, en el peor caso como:

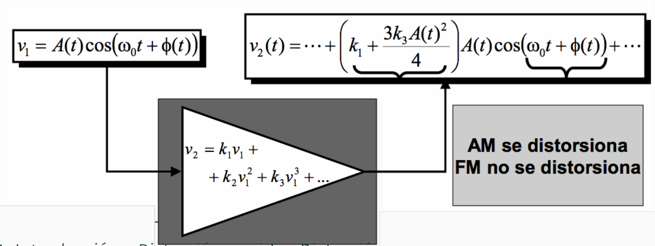
$$\frac{C}{I} = \frac{N^2}{6(N-1)(N-2)}\left(\frac{PI_3}{P_0} + \frac{N-2}{N}\right)^2 \tag{4}$$

- Y en el caso de que N sea elevado queda como:

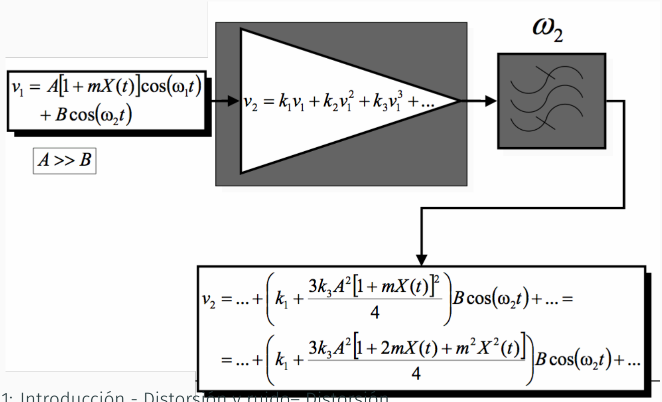
$$\frac{C}{I} = \frac{1}{6}\left(\frac{PI_3}{P_0} + 1\right)^2 \tag{5}$$

DISTORSIÓN NO LINEAL EN SEÑALES MODULADAS

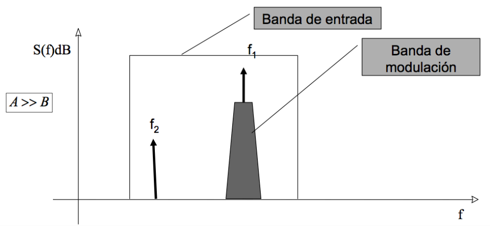
- Cuando a la entrada tenemos una señal modulada en amplitud o fase, también hay distorsión.
- La distorsión en señales moduladas afecta a AM, pero no a FM
- En general, la distorsión no lineal afecta mucho más a señales moduladas en amplitud $\rightarrow$ No podemos pasar una señal AM por un amplificador no lineal.
- En función del acceso al medio, tendremos mayor distorsión (FDM, CDMA, como en UMTS) o menor (TDM, como en GSM).



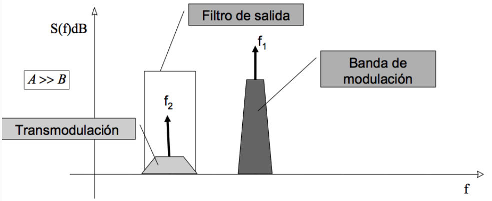
- Se asocia a señales AM
- Tenemos dos señales moduladas en amplitud y de distinta frecuencia, con una de amplitud mucho mayor que la otra.
- La modulación de la primera puede pasar a modular la segunda por distorsión de 3r orden.



Señales de entrada:



Señales de salida:



- La fase de la función de transferencia depende de la amplitud de entrada:
  $\phi = arg[H(\omega, p)] = f(\omega, p)$
- Típica en amplificadores en TWT (Traveling Wave Tubes): amplificadores de válvulas de microondas
- Se modela en grados por dB para la potencia de salida dada P_{REF}

RUIDO

RUIDO

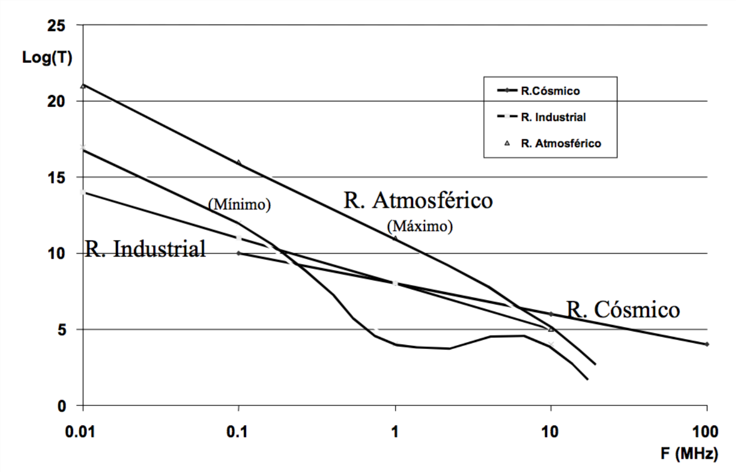
- Definición y tipos de ruido
- Ruido térmico
- Ruido en antenas
- Ruido en diodos y transistores
- Temperatura y figura de ruido

- Ruido: cualquier señal aleatoria que aparece superpuesta a la señal útil, degradando la recepción.
- Modelo de ruido: Señal aleatoria, gaussiana, media cero, invariante $\rightarrow$ Additive White Gaussian Noise (AWGN) (N $[W/Hz]$)
- Caracterizada por desviación típica (σ), potencia de ruido ($P = \sigma^2[W]$) y temperatura equivalente de ruido ($T_e = P/kB[k]$)
- En el esquema TX-RX, el ruido es importante en el RX

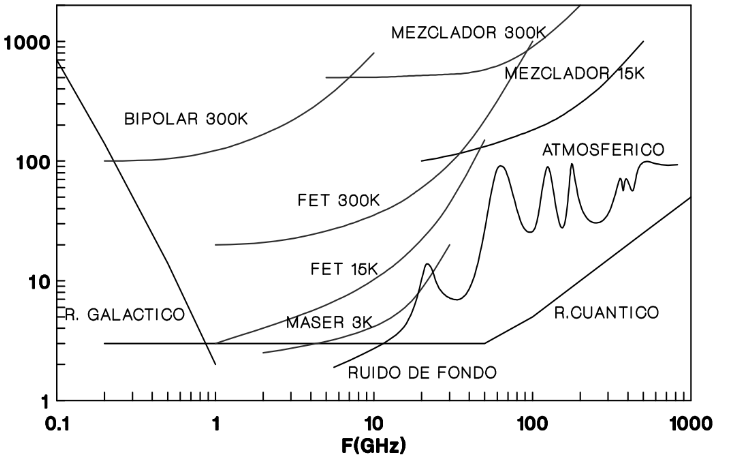
  Porque en el TX la potencia de señal es mucho mayor que el ruido
- Nuestro objetivo es calcular el ruido total del sistema receptor
  - El ruido nos da el límite inferior de la potencia recibida: sensibilidad (asegura una SNR)

- Ruido térmico: debido a la agitación de moléculas y electrones $\rightarrow$ La parte resistiva de una impedancia se comportan como generadores de ruido térmico. Una antena se comporta como una impedancia.
- Ruido shot y flicker: debido al efecto granular de emisión en dispositivos semiconductores $\rightarrow$ afecta a diodos y transistores
- Otros ruidos:
  - Ruido atmosférico: tormentas
  - Ruido cósmico: estrellas o galaxias
  - Ruido industrial: máquinas o motores

Ruido en bajas frecuencias



Ruido en altas frecuencias



Con esta diversidad de dispositivos y fuentes de ruido:

- Cómo calculamos el ruido a la salida de un receptor?
- Cómo facilitan los fabricantes información sobre el ruido de un dispositivo?

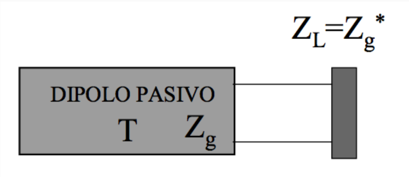
Caracterizaremos ruido en términos de parámetros:

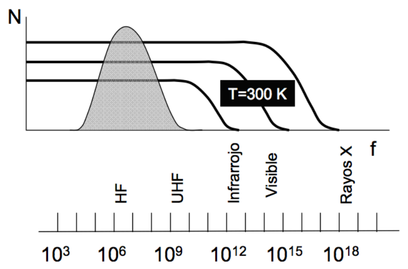
- Que nos permitan calcular el ruido total del receptor
- Que permitan sacar conclusiones de cara al diseño de un receptor

En el resto de capítulos veremos en detalle el ruido de cada dispositivo que estudiemos.

- También conocido como ruido Johnson o Nyquist, es el ruido más común. Debido al movimiento browniano de los electrones.
- Una impedancia a una temperatura T genera un espectro de ruido plano en la banda de RF.
  AWGN de media cero y densidad espectral de potencia (DEP) $kT/2$
- Los elementos capacitivos e inductivos puros no causan ruido.

- La potencia disponible de ruido que entrega una carga adaptada (o sea, un dipolo pasivo) es:
  $n = k \cdot T \cdot B$
- B es el ancho de banda equivalente de ruido, que se define como el ancho de banda de un filtro paso banda ideal
- k: ctte de Boltzman ($1.38 \cdot 10^{-23}[W/(HzK)]$)

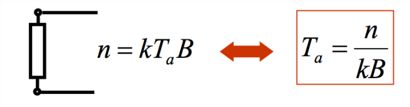


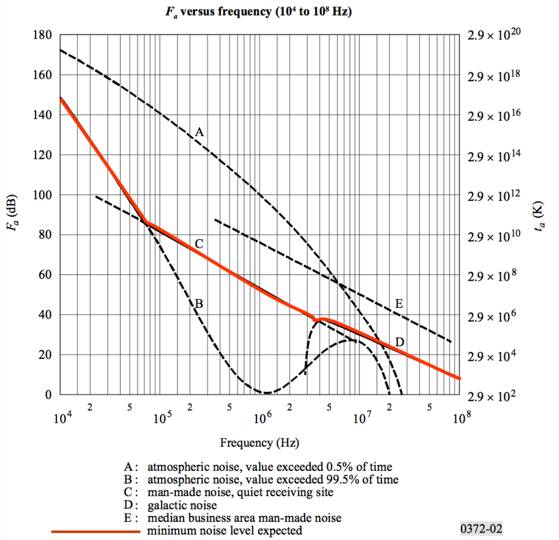


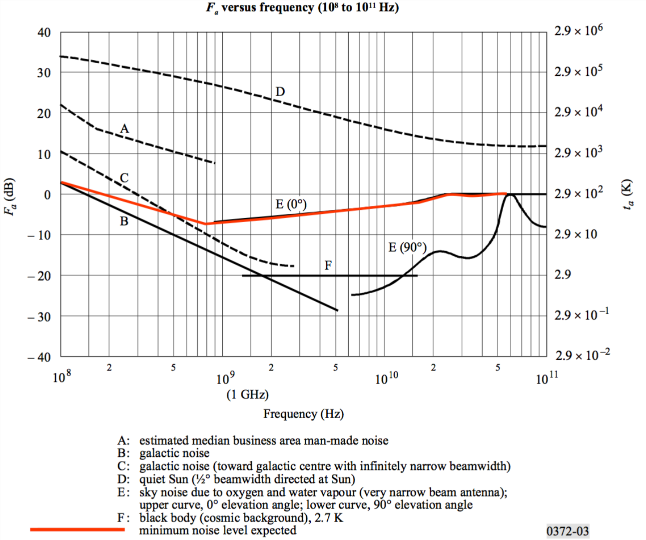
- El ruido generado por un dipolo activo nos permite definir la temperatura de ruido
  $n = k \cdot T_e \cdot B \rightarrow T_e = \frac{n}{k \cdot B}$

RUIDO DE UNA ANTENA

- Una antena es básicamente un colector de potencia útil y de ruido
- Se comporta como un dipolo activo: es una impedancia a determinada temperatura.
  $T_a = \frac{n_a}{k \cdot B}$
- la temperatura efectiva de ruido es la temperatura a la que tendría que estar una impedancia para generar la misma potencia de ruido en un ancho de banda dado
- La temperatura de ruido de una antena la obtenemos mediante gráficas.




F_a versus frequency (10^4 to 10^8 Hz)
180
160
140
120
100
80
60
40
20
0
F_a (dB)
2.9×10^{20}
2.9×10^{18}
2.9×10^{16}
2.9×10^{14}
2.9×10^{12}
2.9×10^{10}
2.9×10^{8}
2.9×10^{6}
2.9×10^{4}
2.9×10^{2}
t_a (K)
A
B
C
D
E
10^4 2 5 10^5 2 5 10^6 2 5 10^7 2 5 10^8
Frequency (Hz)
A : atmospheric noise, value exceeded 0.5% of time
B : atmospheric noise, value exceeded 99.5% of time
C : man-made noise, quiet receiving site
D : galactic noise
E : median business area man-made noise
minimum noise level expected
0372-02



F_a versus frequency (10^8 to 10^{11} Hz)
40
30
20
10
0
– 10
– 20
– 30
– 40
F_a (dB)
2.9×10^6
2.9×10^5
2.9×10^4
2.9×10^3
2.9×10^2
2.9×10
2.9
2.9×10^{-1}
2.9×10^{-2}
t_a (K)
D
A
C
B
E (0°)
E (90°)
F
10^8
2
5
10^9
(1 GHz)
2
5
10^{10}
2
5
10^{11}
Frequency (Hz)
A: estimated median business area man-made noise
B: galactic noise
C: galactic noise (toward galactic centre with infinitely narrow beamwidth)
D: quiet Sun (½° beamwidth directed at Sun)
E: sky noise due to oxygen and water vapour (very narrow beam antenna); upper curve, 0° elevation angle; lower curve, 90° elevation angle
F: black body (cosmic background), 2.7 K
minimum noise level expected
0372-03

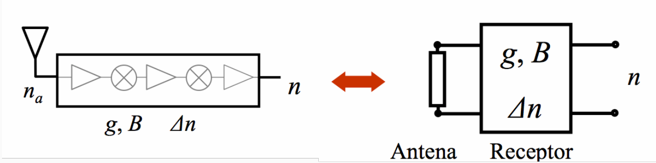
Ruido shot

- Ruido impulsivo o shottky
- Producido por electrones que saltan la barrera de potencial
- Es un ruido AWGN
- Es de naturaleza discreta

Ruido flicker

- También ruido rosa o ruido $1/f$
- La densidad espectral de potencia decae con $1/f^{\alpha}$
- Importante para frecuencias por debajo de 100KHz

- Hemos dicho que el ruido afectaba principalmente al receptor
- Nuestro objetivo es calcular el ruido total del sistema receptor
  - En general, es el ruido entregado al demodulador
  - Denotamos sistema al conjunto antena-receptor (impedancia-cuadripolo)



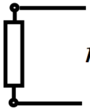
Solución: definir algún parámetro del ruido para cada elemento, y para el sistema $\rightarrow$ temperatura efectiva y factor de ruido.

Tendremos que ser capaces de calcular el ruido de:

1. Una red de una puerta $\rightarrow$ antena
2. Una red de dos puertas (cuadripolo) $\rightarrow$ receptor
3. Una red de una puerta seguida de una de dos $\rightarrow$ sistema
4. Un cuadripolo pasivo
5. Una cadena de cuadripolos

Asumiremos siempre que las impedancias están adaptadas.
Para cada uno, calculamos temperatura y factor de ruido.

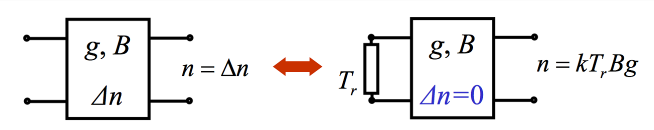
- Definimos como temperatura T_a a la que tendría que estar una impedancia para generar la misma potencia de ruido en un ancho de banda dado.



$$n = kT_aB \quad \longleftrightarrow \quad \boxed{T_a = \frac{n}{kB}}$$

- El factor, o figura, de ruido (NF, noise figure) se define para un cuadripolo. Es el cociente entre la SNR a la entrada y la salida cuando el ruido a la entrada es el de una impedancia a la temperatura ambiente $T_0 = 290K$
- Para una antena, lo definimos como: $f_a = \frac{T_a}{T_0}$

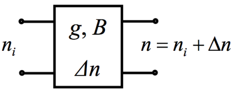
- Definimos como temperatura T_r a la que tendría que estar una impedancia situada a la entrada para generar a la salida la misma potencia de ruido en un ancho de banda dado, y supuesto el cuadripolo ideal sin ruido.



Y obtenemos: $T_r = \frac{\Delta n}{kBg}$

siendo g la ganancia del cuadripolo y B el ancho de banda

- Repetimos definición de NF: cociente entre la SNR a la entrada y la salida cuando el ruido a la entrada es el de una impedancia a la temperatura ambiente T_0
- Dado el cuadripolo, cuánto vale el NF (f_r)? Calculamos las SNRs.



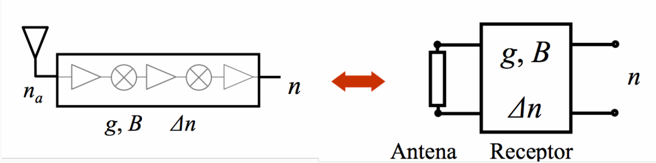
$$\left.\begin{aligned} snr_i &= \frac{s_i}{n_i} \\ snr_o &= \frac{s_o}{n_o} = \frac{g s_i}{g n_i + \Delta n} \end{aligned}\right\} \quad f_r = \frac{snr_i}{snr_o} = \frac{s_i}{n_i} \cdot \frac{g n_i + \Delta n}{g s_i} = 1 + \frac{\Delta n}{g n_i}$$

- El NF del cuadripolo quedaría como:

$$\boxed{\Delta n = n_i (f_r - 1) g = k T_0 B (f_r - 1) g} \xleftrightarrow{\Delta n = k T_r B g} \boxed{T_r = T_0 (f_r - 1)}$$

Que también se puede expresar como $f_r = \frac{kT_0Bg + \Delta n}{kT_0Bg}$ (hemos sustituido $n_i = kT_0B$)

- Ahora definimos T_s igual que en el caso anterior, supuesto el cuadripolo sin ruido.
- En este caso, el ruido es el de la red de dos puertas más el cuadripolo. Definimos ambos a partir de las temperaturas



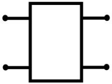
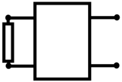
efectivas.

Y tenemos:

$T_s = T_a + T_r = \frac{n}{kBg}$

- Y el factor de ruido quedaría como: $f_s = \frac{T_s}{T_0}$

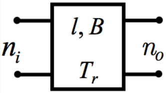
$f_s = f_a + (f_r - 1)$

	T^{ra} efectiva	Figura	Ruido
	$T_r = T_0(f_r - 1)$	$f_r = \frac{T_r}{T_0} + 1$	$\Delta n = kT_0B(f_r - 1)g$
	$T_a = T_0 f_a$	$f_a = \frac{T_a}{T_0}$	$n = kT_aB$ $n = kT_0 f_a B$
	$T_s = T_0 f_s$ $T_s = T_a + T_r$	$f_s = \frac{T_s}{T_0}$ $f_s = f_a + (f_r - 1)$	$n = kT_sBg$ $n = kT_0 f_s Bg$

Quedaría calcular:

- Red pasiva (cuadripolo pasivo)
- Cuadripolos en cascada

- Un cuadripolo pasivo es un atenuador, con atenuación $l = 1/g$. No tiene elementos activos, y sólo genera ruido la parte resistiva.

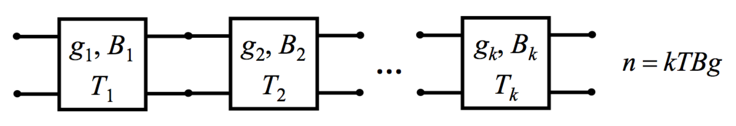


$$n_o = \Delta n + n_i / l$$

- A la entrada tiene una resistencia R a la temperatura T_L.
  $T_r = T_0(f_r - 1) = T_L(l - 1)$
  $f_r = 1 + \frac{T_L}{T_0}(l - 1)$
  Si $T_L = T_0$ entonces $f_r = l$
- Una red pasiva deja igual el ruido y atenúa la señal.

TEMPERATURA Y FACTOR DE RUIDO. CADENA DE CUADRIPOLOS.

- Un receptor se compone de diferentes elementos en serie, cada uno con su temperatura y factor de ruido.
- Queremos calcular la temperatura o NF de toda la cascada.
- Data la serie de cuadripolos con ganancia total $g = g1 \cdot g2 \cdot \ldots \cdot g_k$



- El ruido a la salida es:
  $n = kTBg = kT_1Bg_1 \ldots g_k + kT_2Bg_2 \ldots g_k + \ldots + kT_kBg_k$
- La temperatura efectiva de ruido total:

$$\boxed{T = T_1 + \frac{T_2}{g_1} + \ldots + \frac{T_k}{g_1 g_2 \cdots g_{k-1}}}$$

- Y el factor de ruido total:

$$T = T_1 + \frac{T_2}{g_1} + \ldots + \frac{T_k}{g_1 g_2 \cdots g_{k-1}} \Rightarrow f = f_1 + \frac{f_2 - 1}{g_1} + \ldots + \frac{f_k - 1}{g_1 g_2 \cdots g_{k-1}}$$

$$f_r = T_r / T_0 - 1$$

Observaciones:

- La ganancia del primer elemento es fundamental en el resultado total. Si es grande anula a los demás elementos.
  Primer elemento es el front-end (cabezal RF)
- Si un cuadripolo de factor de ruido f_r está precedido de una red pasiva de pérdidas l, el factor de ruido se calcula como: $f = l \cdot f_r$
- En los receptores, los anchos de banda suelen ir reduciéndose $\rightarrow$ el que hay que usar es el último, el menor de ellos.

Con los resultados obtenidos, podemos abordar el cálculo del ruido a la entrada del demodulador.

Preguntas?