

Ruido en sistemas ópticos

Introducción

Como todo sistema de comunicaciones la capacidad máxima de transferencia de información un sistema óptico estará limitada por el teorema de Shannon-Hartley.

Y por consiguiente es importante identificar los mecanismos de generación y acumulación de ruido.

Enlaces simples, de una portadora, sin amplificación

Podemos estimar, en primera instancia, que el transmisor está exento de ruido.

En rigor el laser es un oscilador, es decir un amplificador realimentado, y como todo amplificador tiene algún mecanismo de generación de ruido, similar a otros que se describirán a continuación. Si embargo, debido al fuerte nivel de potencia de la señal en ese punto, su efecto puede no ser tenido en cuenta en un primer análisis.

Tratándose de sistemas de una sola portadora no existen mecanismos que puedan generar ruido a ser tenido en cuenta en la propia FO.

Nos queda entonces el receptor, es el propio diodo fotodetector en donde está el principal mecanismo de generación de ruido de estos sistemas.

Un diodo fotodetector consiste básicamente en una juntura PIN, y opera polarizado en inversa.

Si no se recibe luz, en principio, no hay circulación de corriente.

Cuando se recibe, los fotones que interactúan con la capa I generan pares de carga electrón-hueco. Debido a la presencia de campo eléctrico, estas cargas se desplazan y finalmente tenemos una corriente que es función directa de la luz recibida.

Pero en realidad, aún sin recibir luz, si existe la generación espontánea de pares de carga, debido a la agitación térmica. En definitiva, se trata de una juntura y esto es solo otro caso de ruido Shot y se los suele nombrar así para distinguirlo de otros mecanismos dentro de los sistemas de comunicaciones ópticos.

Este ruido no es en rigor óptico sino un ruido eléctrico, que se genera en el conversor óptico-eléctrico.

Eventualmente esta corriente de ruido se combinará con la variación de corriente que transporta información y tendremos una determinada relación señal/ruido y una probabilidad de error asociada.

Para mantener la tasa de error por debajo de una cierta especificación (10^{-9} por ejemplo) será necesario recibir una determinada potencia de luz. A este parámetro se lo denomina sensibilidad del receptor óptico.

Ruido en sistemas amplificados

Se trata de cadenas en las que se alterna algún tipo de línea (coaxil, guía de ondas, FO) con amplificadores. El propósito de estos amplificadores es solamente compensar las pérdidas de la línea.

Tomando las debidas precauciones de limitación de ancho de banda, transferencias de potencia, y homogeneidad de temperatura no es mas que otro caso de aplicación de la fórmula de Friis.

$$F_1 = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \frac{F_4 - 1}{G_1 G_2 G_3} + \dots + \frac{F_n - 1}{G_1 G_2 \dots G_n}$$

Con algunas particularidades:

Las F impares serán las perdidas de los vanos previos a los amplificadores.

$$F1=L1, F3=L3, etc$$

El propósito de la cadena es mantener la potencia, será igual a la salida de cada amplificador. Entonces la ganancia de los amplificadores deberá ser de idéntica magnitud que la pérdida del tramo de línea precedente:

$$G1 = 1/L1$$

$$G2 = L1$$

El producto de cada ganancia impar por la ganancia par que le sigue será:

$$G1G2 = L(1/L) = 1$$

Para facilitar un primer calculo diremos que todas las secciones son iguales en atenuación (por lo tanto, en ganancia) y en cifra de ruido de los amplificadores.

La fórmula de Friis se reescribe

$$F_{tot} = L + \frac{NF - 1}{1/L} + \frac{L - 1}{1} + \frac{NF - 1}{1(\frac{1}{L})} + \dots$$

También consideraremos que la atenuación es $\gg 1$

$$F_{\text{tot}} = L + \frac{L \cdot NF}{1} + \frac{L}{1} + \frac{L \cdot NF}{1} + \dots$$

Y agrupando cada amplificador con su vano previo:

$$F_{\text{tot}} = L(1 + NF) + L(1 + NF) + \dots$$

Si consideramos que la cifra de ruido es superior a 1 (esto si es una aproximación).

La cifra de ruido de la cadena amplificada será

$$F_{\text{tot}} = L(NF) + L(NF) + \dots$$

$$F_{\text{tot}} = L \cdot NF \cdot N_s$$

Siendo N_s el número de secciones (vano+amplificador)

Expresado en dB

$$F_{\text{tot}}[\text{dB}] = L + NF + 10\log(N_s)$$

Ruido de fondo a frecuencias ópticas

En sistemas de comunicaciones en frecuencias inferiores a THz solemos calcular la potencia de ruido al inicio de una cadena como

$$P_n = KBT$$

Siendo K la constante de Boltzmann, T la temperatura equivalente de ruido y B el ancho de banda de ruido que por regla general estará asociado al ancho de banda de la señal.

Esto es el resultado de integrar la densidad espectral de potencia del ruido. Que se toma como constante KT.

Es en realidad la expresión a “bajas” frecuencias, de una expresión más general de la distribución espectral de potencia de ruido:

$$\eta(f) = \frac{hf/k_B T}{e^{hf/k_B T} - 1},$$

A frecuencias ópticas (~200THz) la integración resulta

$$P_n = h \times F_c \times B$$

Siendo h la constante de Plank, F_c la frecuencia central del canal y B el ancho del canal.

Por convención se toma un ancho de banda referencial de 12.5GHz (0.1nm).

Nos queda:

Pn=	h		THz	GHz
			fc	Bref
	J.s	x	Hz	x
Pn=	6.63E-34		1.93E+14	1.25E+10
Pn=	1.60E-09	[w]		
Pn=	1.60E-06	[mW]		
Pn=	-57.95	[dBm]		

Relación señal/ruido a la salida de una línea óptica

La relación señal ruido a la salida de un sistema es:

$$So/No = Si/Ni - Ftot$$

$$So/No = Si - Ni - Ftot$$

Si será la potencia del canal analizado a la entrada de la línea.

Si seguimos con la hipótesis de una cadena homogénea, y considerando que el propósito de la cadena es mantener está potencia, será igual a la salida de cada amplificador.

Adaptando a la terminología de la industria:

$$So/No = OSNR$$

$$Ni = -58dBm$$

En ambos casos basado en el ancho de banda de referencia 0.1nm=12.5GHz.

$$Si = Pch \text{ (potencia por canal)}$$

Entonces:

$$So/No = Si - Ni - Ftot$$

$$OSNR = Pch - (-58dBm) - Ftot$$

Reemplazando Ftot

$$OSNR = Pch + 58 - L - NF - 10 \log Ns$$

El receptor óptico ubicado al final de la cadena deberá poder operar con el OSNR entregado por la cadena. O invirtiendo los términos, dada una cierta tecnología de receptor se deberán ajustar los parámetros de la cadena para tener el OSNR necesario.

Cada uno de estos factores tiene limitaciones prácticas.

La potencia por canal es el resultado de dividir la potencia óptica total del amplificador (TOP) por el número de canales.

En dB:

$$P_{ch} = TOP - 10 \log(N_{ch})$$

Si bien existe un cierto rango de amplificadores disponibles, no es común superar los 23dBm por cuestiones de seguridad. Muy raramente se usa más de 27dBm.

Notar que esa potencia se inyecta en una FO cuyo núcleo tiene una muy pequeña área (60-120micrones).

Lo más común es trabajar con TOP aún más bajas debido a que con altas potencias ocurren efectos no lineales en la FO que son acumulativos.

La atenuación de cada vano estará dada por la distancia y la atenuación de la FO.

En este punto cabe aclarar que se debe considerar la atenuación a fin de vida (EoL) es decir con márgenes por envejecimiento y reparación.

La cifra de ruido está dictada mayormente por la tecnología de los amplificadores que son de tipo EDFA. Si bien el rango puede ser amplio en este tipo de aplicación oscila entre 4.2-5 dB para aplicaciones submarinas y 5-7dB para sistemas terrestres.