

MODELO ESTADISTICO DEL LASER AMPLIFICADOR EN UN SISTEMA DE
TRANSMISION DIGITAL POR FIBRA OPTICA MONOMODO

Sergio Ruiz, J.R. Usandizaga y G. Junyent.
ETSI Telecomunicación - UPC, c/ J.G. Salgado, s/n, 08034 Barcelona

RESUMEN

En este trabajo se obtiene un modelo estadístico del laser amplificador semiconductor y se desarrolla la metodología y el software necesarios para poder obtener resultados analíticos.

En definitiva, se consigue conocer la estadística de la luz amplificada por este dispositivo de estado sólido. El número de momentos estadísticos que puede obtenerse depende, únicamente, de la capacidad del ordenador. Pueden entonces evaluarse, mediante la función densidad de probabilidad, el valor medio y la potencia de la información y del ruido cuántico a la salida del laser amplificador para poder analizar, finalmente, las prestaciones introducidas por el mismo en un enlace óptico.

INTRODUCCION

Todo dispositivo de efecto laser lleva asociados tres fenómenos fundamentales que determinan sus características de funcionamiento: la emisión estimulada, la emisión espontánea y la absorción. Se obtiene amplificación cuando la emisión estimulada compensa las pérdidas por absorción. Esto se consigue creando la apropiada inversión de población en la unión PN del semiconductor. Un bombeo externo proporciona al sistema la energía necesaria.

La emisión espontánea puede ser considerada como una fuente de ruido inherente al dispositivo. Un primer inconveniente se presenta por el hecho de que este "ruido cuántico" no es simplemente aditivo, sino que aporta componentes multiplicativas (batidos entre la señal y la emisión espontánea) de gran anchura espectral.

Bajo ciertas condiciones de diseño de la estructura de la pastilla semiconductor puede obtenerse un amplificador de luz que actúe como una auténtica guía monomodo, de forma que el acoplo con fibras de este tipo incorpora pérdidas mínimas.

Se entiende por laser amplificador un dispositivo que, utilizando efecto laser, permite amplificar de manera coherente una señal luminosa, es decir, sin alterar su frecuencia y fase. Esto no se consigue del todo debido a la emisión espontánea. Teniendo a la entrada un proceso de Poisson (luz coherente), el amplificador de luz proporciona a su salida una señal cuya estadística es la de una distribución de Laguerre de orden L (número de modos temporales observados). Esta estadística es equivalente (1) a la obtenida como superposición de un campo coherente y un campo gaussiano de banda limitada. Esta equivalencia ha sido confirmada por los autores. El conocimiento de la función densidad de probabilidad es imprescindible para poder calcular, en el proceso de detección, la tasa de error y la relación señal ruido. La estadística de Laguerre es muy complicada. En el presente trabajo se comprueba que, bajo ciertas condiciones, es razonable hacer una aproximación gaussiana. Para ello se ha caracterizado el amplificador en función de sus parámetros fundamentales obteniendo un modelo matemático que permite calcular de forma exacta los momentos estadísticos de la señal amplificada si se conocen los momentos de la señal de entrada (proceso de Poisson).

CARACTERIZACION DEL LASER AMPLIFICADOR

El primer modelo propuesto para el estudio de la estadística de los "cuantos" a la salida de un amplificador fué propuesto, para un maser, por Shimoda, Takahashi y Townes(2). Un modelo más exacto para un laser es el deducido a partir del estudio de la ecuación de la matriz densidad de fotones (3), (4). La versión lineal de esta teoría se corresponde con la teoría STT.

Consideremos el laser amplificador como una guía de longitud s con n fotones a la entrada en $t=0$. Llamemos $P(m/n)$ a la probabilidad de tener m fotones a la salida, en el instante $t=s/c$, si se tienen n a la entrada. Existe una probabilidad por unidad de tiempo y por fotón, A , de que se genere otro fotón idéntico (emisión estimulada), una probabilidad por unidad de tiempo y por fotón, B , de que dicho fotón sea absorbido y, finalmente, una probabilidad por unidad de tiempo, C , de generación espontánea de fotones. La evolución temporal de $P(m/n)$ se puede expresar por:

$$\frac{dP(m/n)}{dt} = - [(A+B)m+C]P(m/n) + B(m+1)P(m+1/n) + [A(m-1)+C]P(m-1/n) \quad (1)$$

Las constantes A, B y C se pueden evaluar mediante:

$$A = n_{sp}(R+1)/T_p, \quad B = n_{sp}/T_p \quad \text{Y} \quad C = L \cdot A,$$

donde n_{sp} es el parámetro de inversión de población, T_p es el tiempo de vida medio del fotón y R el nivel relativo de bombeo.

La expresión del momento de orden r viene dada por:

$$m_r = \sum_m m^r P(m/n) \quad (2)$$

Se puede demostrar (5) que:

$$\frac{dm_r}{dt} = \sum_{s=1}^r \frac{r!}{s!(r-s)!} \left[m_{r-s+1} (A+(-1)^s B) + C \cdot m_{r-s} \right] \quad (3)$$

Desarrollando la expresión anterior se obtiene el siguiente sistema lineal de ecuaciones diferenciales de primer orden:

$$\frac{dm_1}{dt} = (A-B)m_1 + C$$

$$\frac{dm_2}{dt} = 2(A-B)m_2 + (A+B+2C)m_1 + C$$

$$\frac{dm_3}{dt} = 3(A-B)m_3 + 3(A+B+C)m_2 + (A-B+3C)m_1 + C$$

⋮

Se trata de un conjunto de ecuaciones diferenciales acopladas cuyas condiciones iniciales vienen condicionadas por los momentos de la señal de entrada, $n_1, n_2, n_3 \dots$, que puede expresarse en forma matricial:

$$\frac{d\bar{M}}{dt} = A \cdot \bar{M} + \bar{F} \quad (4)$$

siendo \bar{M} un vector columna formado por los momentos de la señal de salida, A la matriz característica del sistema (triangular) y \bar{F} un vector columna que contiene la parte inhomogénea del sistema.

Los autores han desarrollado un método exacto (5), basado en la teoría de autovalores, que se referencia por razones de espacio. Se ha desarrollado también el software necesario para poder obtener un número cualquiera de momentos estadísticos de la señal entregada por el laser amplificador, quedando éste completamente caracterizado pudiendo, así, realizar simulaciones mediante ordenador.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado que la salida del laser amplificador puede ser modelada por un proceso gaussiano si el número de fotones a la entrada es suficientemente elevado (como, evidentemente, ocurre en la realidad). Así mismo, se confirma la equivalencia de Personick mencionada anteriormente. En efecto, puede considerarse la luz am-

plificada como la superposición de un campo coherente y un campo gaussiano. Ocurre, sin embargo, que al ser la ganancia y el número de fotones usualmente elevados, la propia estadística de Poisson converge a un proceso gaussiano (teorema central del límite). Las subrutinas desarrolladas así lo confirman.

Puede, por tanto, modelarse la señal entregada por el dispositivo amplificador de luz por un proceso gaussiano cuya función densidad de probabilidad tiene, como media y varianzas las siguientes expresiones exactas:

$$E(m) = m_1 = G \cdot n_1 + (G-1)L \cdot p$$

$$\sigma^2 = m_2 - m_1^2 = G n_1 + (G-1)Lp + 2G(G-1)p n_1 + (G-1)^2 Lp^2$$

donde G es la ganancia de la cavidad, $p=A/(A-B)$ es el parámetro de emisión espontánea y L el número de modos temporales. Si la cavidad actúa unimodalmente, L expresa la relación entre los anchos de banda de la emisión espontánea y de la señal.

Es de destacar el hecho de que el valor esperado de la señal amplificada, $E(m)$, es fuertemente probable ya que la desviación típica es comparativamente pequeña si la emisión espontánea no es excesivamente grande. Esta aumenta con el número de modos temporales, de lo cual se desprende que es necesario utilizar filtros ópticos de ancho de banda reducido (el imprescindible para no degradar la señal transmitida). Para una señal PCM, de ancho de banda teóricamente infinito, esto crea un serio compromiso para poder conseguir la potencia mínima detectable en la etapa de detección y decisión.

Por limitaciones de espacio, se omite el cálculo de la probabilidad de error y de la relación señal ruido, el cual ha sido desarrollado por los autores (ver referencias). Idealizando todos los procesos externos al laser amplificador, se comprueba que, en el mejor de los casos, el dispositivo degrada la relación señal ruido en 3 dB. Esto limita el número de etapas de una cadena de repetidores que incorporen como etapa básica el amplificador laser.

REFERENCIAS

- (1) S.D. PERSONICK.
Applications for Quantum Amplifiers in simple digital Optical communication Systems. B.S.T.J. - Vol. 52, Nº1, Jan. 1973.
- (2) K. SHIMODA, H.TAKAHASHI and C.H. TOWNES.
Fluctuations in amplification of quanta with application to Laser Amplifiers. J. Phys. Soc. Japan, 1957 - Vol. 12
- (2) A. YARIV.
Quantum Electronics. John Wiley & Sons, Inc. 1975
- (4) C. BENDJABALLAH and G. OLIVER.
Detection of Coherent Light after Nonlinear Amplification. IEEE Trans. on Aerosp. and El.Syst. Vol AES-17, Nº 5, Sept 81
- (5) J.R. USANDIZAGA.
Proyecto Fin de Carrera: Caracterización y modelo estadístico de un laser amplificador semiconductor en transmisión digital por fibra óptica. E.T.S.I. de Telecomunicación de Barcelona, U.P.C., 1985.

TERMINAL DE LINEA PARA TRANSMISION POR FIBRA OPTICA

A 2/8 Mbit/s EN 2ª VENTANA ($\lambda = 1,3 \mu\text{m}$)

Emilio Gil Delicado,
Alfredo Martín Minguez
TELETTRA ESPAÑOLA, S.A.

RESUMEN

El empleo de fibra óptica en aplicaciones militares es de particular interés dada su especial invulnerabilidad, tanto en detección como interferencia.

La liviandad y flexibilidad de un cable óptico lo cualifica como idóneo por su fácil y rápida instalación y recogida, siendo pues un medio de transmisión muy adaptado, no solo en comunicaciones estratégicas, sino también tácticas.

Se describen a continuación las características más importantes de un equipo terminal de línea para la transmisión por fibra óptica de una señal digital de 2 u 8 Mbit/s en 2ª ventana y con dos tipos de transmisor óptico: LED y LASER.