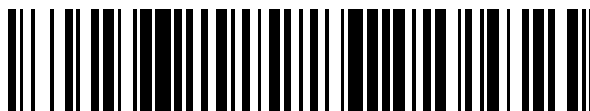


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 416 065**

51 Int. Cl.:

H04L 25/06 (2006.01)

H04L 1/00 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **25.09.2009** **E 09764705 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **13.03.2013** **EP 2332301**

54 Título: **Procedimiento y dispositivo para la cuantificación de cocientes de probabilidad**

30 Prioridad:

26.09.2008 EP 08165233

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:

30.07.2013

73 Titular/es:

**VODAFONE HOLDING GMBH (100.0%)
Mannesmannufer 3
40213 Düsseldorf, DE**

72 Inventor/es:

RAVE, WOLFGANG

74 Agente/Representante:

AZNÁREZ URBIETA, Pablo

ES 2 416 065 T3

Aviso: En el plazo de nueve meses a contar desde la fecha de publicación en el Boletín europeo de patentes, de la mención de concesión de la patente europea, cualquier persona podrá oponerse ante la Oficina Europea de Patentes a la patente concedida. La oposición deberá formularse por escrito y estar motivada; sólo se considerará como formulada una vez que se haya realizado el pago de la tasa de oposición (art. 99.1 del Convenio sobre concesión de Patentes Europeas).

DESCRIPCIÓN

PROCEDIMIENTO Y DISPOSITIVO PARA LA CUANTIFICACIÓN DE COCIENTES DE PROBABILIDAD

Campo técnico

5 La invención se refiere a un procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación del cociente de probabilidad aleatoria binaria en una transmisión entre dos o más unidades de procesamiento de señales.

Además, la invención se refiere a un dispositivo de procesamiento de señales para la cuantificación del cociente de probabilidad aleatoria binaria en una transmisión entre dos o más unidades de procesamiento de señales.

10 **Estado de la técnica**

Son conocidos diversos procedimientos de procesamiento de señales donde las unidades de procesamiento de las señales conectadas intercambian valores de probabilidad para realizar determinadas tareas en una cadena de procesamiento de señales o para facilitar un procesamiento de señales iterativo. Un ejemplo conocido en la técnica de tal tipo de procesamiento de señales es la codificación de "código turbo" que se emplea en redes de telefonía móvil de tercera generación (por ejemplo UMTS). En este ejemplo, dos decodificadores generan cada uno una hipótesis en relación con un patrón de utilización de bit recibido. Para ello se derivan y se utilizan probabilidades, los denominados valores de probabilidad. Los decodificadores intercambian los valores de probabilidad y generan cada uno una nueva hipótesis teniendo en cuenta los valores de probabilidad del otro decodificador. Este procedimiento se repite de forma iterativa las veces necesarias para que ambos decodificadores proporcionen la misma hipótesis para el patrón de utilización de bits.

A menudo se generan los denominados cocientes de probabilidad log y se intercambian como valores de probabilidad entre las diferentes unidades de procesamiento de señales. El cociente de probabilidad log de una variable aleatoria binaria $X \in \{+1, -1\}$ se define como:

25
$$L_X(x) = \log \frac{P_X(x = +1)}{P_X(x = -1)}$$

30 donde $P_X(x)$ describe la probabilidad de que la variable aleatoria X adopte el valor x . Las variables aleatorias como X o $L(X)$ se identifican aquí con su letra mayúscula y su valor x , l con su letra minúscula. Por "log" se entiende el logaritmo natural. El cociente de probabilidad $\log L(X)$ también se denomina en lo que sigue valor L o LLR (Log-Likelihood-Ratio) de la variable aleatoria X . El rango de valores de $L(X)$ va desde $-\infty$ hasta $+\infty$.

El signo de $L(X)$ determina si $x = +1$ ó $x = -1$. Esta determinación se llama también Hard-Decision. El valor $|L(X)|$ describe la fiabilidad de esta determinación.

35 La distribución de los valores L en el rango de valores $\pm \infty$ o bien la densidad de los valores L depende del ruido que aparece en un canal utilizado para la transmisión de los valores x . Para un canal gaussiano los valores L siguen una distribución gaussiana bimodal.

Debido a que para el valor medio μ y la varianza σ^2 se aplica la relación $\mu_L = \sigma_L^2/2$, la densidad LLR $p_L(l)$ depende únicamente de un valor σ_L o σ_L^2 a partir de:

$$p_L(l) = \frac{1/2}{\sqrt{2\pi}\sigma_L} \left[\exp\left(-\frac{\left(l - \frac{\sigma_L^2}{2}\right)^2}{2\sigma_L^2}\right) + \exp\left(-\frac{\left(l + \frac{\sigma_L^2}{2}\right)^2}{2\sigma_L^2}\right) \right]$$

40 La suposición de un canal gaussiano se aplica al AWGN (ruido gaussiano adicional blanco) o a los canales planos Rayleigh y en general, por aproximación, a bloques de datos de grandes longitud.

Los valores L deben transmitirse con una exactitud finita entre las diferentes unidades de procesamiento de señales para su procesamiento digital. El necesario paso de cuantificación genera inevitables ruidos de cuantificación, que son equivalentes a una pérdida de información del sistema de procesado. En general una cuantificación escalar genera valores L continuos en un conjunto limitado de valores r_i discretos de R, denominados valores de cuantificación, nivel de cuantificación o niveles de reconstrucción. Para ello, se determinan los valores límite $D (= R + 1)$ o los niveles de determinación d_i en el rango de valores $\pm \infty$ de L. Un valor L en un intervalo $[d_i, d_{i+1})$ se plasma en el correspondiente nivel de reconstrucción r_i . En lo que sigue se utilizan las denominaciones nivel de reconstrucción y nivel de determinación.

Aumentando el número R del nivel de reconstrucción r_i , se reduce la pérdida de información en la tarea de transmisión de datos y de procesado adicional. Por este motivo se limita el número R de niveles de reconstrucción r_i . Se puede reducir aún más la pérdida de información mediante una determinación adecuada de los niveles de reconstrucción r_i y de los niveles de determinación d_i . Por otro lado, la cuantificación adecuada facilita una reducción ventajosa de la tasa de datos.

Para una distribución gaussiana bimodal de los valores L, una cuantificación uniforme a intervalos uniformes $[d_i, d_{i+1}]$ y niveles de reconstrucción r_i en el centro de estos intervalos conlleva considerables errores o bien un alto ruido de cuantificación. Muchos valores L diferentes en los niveles de reconstrucción r_i generan menos intervalos, mientras que otros niveles de reconstrucción r_i rara vez se utilizan. En particular, no se considera la distribución de probabilidad de los valores L y el contenido de información de los valores L. Los errores de cuantificación se mantienen especialmente durante el procesado iterativo de señales e influyen negativamente en el conjunto del procesado de señales.

Un procedimiento de cuantificación no uniforme conocido para valores escalares es la cuantificación Lloyd Max, según S. Lloyd, "Least squares quantization in PCM," (unpubl Bell Lab. Techn. Note, 1957) IEEE Trans. Inf. Theory, vol. IT-28, pp. 129 -137, 1982 y J. Max, "Quantizing for minimum distortion", IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 6, pp. 7-12, 1960. En esta cuantificación se minimiza el error cuadrático medio (MSE: Mean Square Error) entre las densidades de probabilidad de los valores continuos y cuantificados. Para ello, se adaptan a varios pasos iterativos los niveles de determinación d_i y los niveles de reconstrucción r_i . Cuando se trata de cocientes de probabilidad logarítmicos, este procedimiento tiene la desventaja de utilizar muchos niveles de valores L de gran tamaño para mantener el error cuadrático medio en valores pequeños, aunque una modificación de la fiabilidad ya es muy pequeña para estos valores L.

En el artículo de S. Khattak, W. Rave y G. Fettweis, "Distributed Iterative Multiuser Detection through Base Station Cooperation", EURASIP J. on Wireless Comm. and Networking Volume 2008, Article ID 390489, se describe una cuantificación no uniforme para cocientes de probabilidad logarítmicos. Para generar los valores L se usan los denominados "Soft-Bits" $A(X) = E\{X\} = \tanh(L(X)/2)$. Con esta transformación se limita el rango de valores a $[-1, 1]$ y se consigue una saturación con creciente fiabilidad o una alta magnitud para los valores L. La cuantificación Lloyd Max se aplica ahora a una expresión para la densidad "Soft-Bit" para determinar los niveles de determinación d_i y los niveles de reconstrucción r_i adecuados. Con esta medida se adaptan mejor los niveles d_i y r_i a una distribución existente y a un contenido de información de los valores L.

Sin embargo, sigue existiendo la necesidad de un procedimiento optimizado para la cuantificación de cocientes de probabilidad log para minimizar los errores durante el procesado de señales y el esfuerzo necesario. Especialmente el error cuadrático medio entre los cocientes de probabilidad log continuos y cuantificados no es un criterio óptimo para determinar los niveles de determinación d_i y los niveles de reconstrucción r_i .

Descripción de la invención

Así un objetivo de la invención es evitar las desventajas del estado de la técnica actual y optimizar la sintonización mutua de la tasa de datos y de la exactitud de la cuantificación de cocientes de probabilidad durante una transmisión.

Según la invención, este objetivo se alcanza mediante un procedimiento según la reivindicación 1 y mediante un dispositivo de cuantificación según la reivindicación 6.

La información mutua entre las variables binarias y los cocientes de probabilidad cuantificados se puede obtener como función de los niveles de reconstrucción y de determinación cuando existe una distribución de probabilidad y una densidad de probabilidad predeterminadas. Según la invención, se maximiza la información mutua antes de una cuantificación de los cocientes de probabilidad mediante la variación de los niveles de reconstrucción y de determinación. Para ello se puede utilizar, por ejemplo, un procedimiento de descenso más inclinado y otro procedimiento de optimización numérica adecuado. Los niveles optimizados se utilizan a continuación para cuantificar los cocientes de probabilidad.

5 Mediante tal optimización directa de los niveles de reconstrucción y de determinación en cuanto a la información máxima mutua tras el procedimiento según la invención y con el dispositivo según la invención, se minimiza la pérdida de información mutua durante la cuantificación. Cuando se transmiten los cocientes de probabilidad cuantificados entre las unidades de procesado de señales se producen ventajosamente menor ruido de cuantificación. Con la misma tasa de datos, la pérdida de información mutua es inferior y el procedimiento de procesado de señales se puede llevar a cabo con mayor exactitud. Por otro lado, se facilita la reducción de la tasa de datos mediante un nivel más bajo con la misma pérdida de información mutua, pudiendo realizar el procesado de señales con más rapidez y menor esfuerzo.

10 En una realización preferente del procedimiento según la invención, para determinar los niveles de determinación y de reconstrucción se procesan las señales para cuantificar los cocientes de probabilidad teniendo en cuenta la varianza de los cocientes de probabilidad antes de la cuantificación. La varianza es adecuada, por ejemplo, para una distribución gaussiana bimodal, como ocurre en los canales AWGN o en los canales planos Rayleigh, para describir la distribución de probabilidad o la densidad de probabilidad de los cocientes de probabilidad. Para la cuantificación se pueden determinar de forma óptima los niveles de reconstrucción y de determinación adecuados adaptados a una varianza determinada del cociente de probabilidad. La pérdida de información mutua se minimiza correspondientemente gracias a una cuantificación adaptada a la varianza existente.

20 Otra realización preferente del procedimiento de la invención prevé la adaptación de una función de aproximación como función de varianza a los niveles de reconstrucción o de determinación determinados en diferentes varianzas y determinar los niveles de reconstrucción y de determinación durante la cuantificación mediante la función de aproximación. Por ejemplo, se utiliza una función de aproximación correspondiente para uno, varios o todos los niveles de reconstrucción y de determinación. Con esta medida se facilita la determinación rápida y sencilla de los niveles óptimos correspondientes a una varianza determinada. Así, no es necesaria una maximización laboriosa y complicada de la información mutua mediante un procedimiento adecuado de optimización para cada cuantificación.

25 Para la aplicación del procedimiento según la invención preferentemente se utiliza una tabla de valores y/o una interpolación cuando se determinan los niveles de reconstrucción o de determinación. Esto es posible de forma adicional o alternativa a la función de aproximación. Así, se pueden realizar también determinación de niveles óptimos en el sentido de la información mutua máxima de forma rápida y sin laboriosos procedimientos de optimización.

30 Además, en una realización ventajosa del procedimiento según la invención, se lleva a cabo una codificación entrópica de los niveles de reconstrucción. Al realizar una cuantificación con maximización de la información mutua se consiguen niveles de reconstrucción que se utilizan con diferentes probabilidades. Con esta codificación entrópica a los niveles de reconstrucción se les adjudica los denominadores de nivel o patrones de bits de diferente longitud. Para ello se utiliza un código sin prefijo y los niveles de reconstrucción más frecuentes tienen un denominador de nivel más corto. Como codificación entrópica se utiliza por ejemplo la codificación Huffman. De esta forma se consigue una compresión de datos en los niveles de reconstrucción a transmitir. Esto conlleva una reducción eficaz de la tasa de datos cuando se transmiten los cocientes cuantificados de probabilidad.

40 Una realización preferente del dispositivo de cuantificación según la invención en un procesado de señales para cuantificar los cocientes de probabilidad se consigue proporcionando medios de aproximación para adaptar una función de aproximación como función de varianza a los niveles de reconstrucción o de determinación determinados en diferentes varianzas y un generador de nivel para determinar los niveles de reconstrucción y de determinación cuando se aplica la cuantificación con la función de aproximación. Como en la realización correspondiente del procedimiento según la invención, con esto se evita una maximización laboriosa de muchos recursos de la información mutua mediante los procedimientos de optimización. Se determinan los niveles óptimos dependiendo de la varianza predeterminada de forma rápida y fácil.

50 Otras realizaciones del dispositivo de cuantificación según la invención se corresponden respectivamente con una realización ya descrita del procedimiento según la invención y disponen de determinadas ventajas que se deducen del objeto de las reivindicaciones dependientes.

A continuación se ilustra un ejemplo de realización de la invención con referencia a las figuras adjuntas.

Breve descripción de las figuras

- 55 Fig. 1: diagrama de flujo esquemático de un ejemplo de realización del procedimiento de la invención.
- Fig. 2: una comparación de los niveles de reconstrucción r_i y de los niveles de decisión d_i para $R = 5$ niveles de reconstrucción que, mediante un procedimiento para la maximización de la

- información mutua, se optimizan directamente según un procedimiento Max-Lloyd utilizando los valores L y según un procedimiento Max-Lloyd utilizando los valores L en "soft bits".
- Fig. 3: una comparación de la pérdida de información mutua ΔI entre los valores L cuantificados y los valores L no cuantificados como función de la información mutua media I_c para los niveles de reconstrucción $R = 2 - 8$. Se comparan además las cuantificaciones con la maximización de la información mutua por cuantificación directa de los valores L y por cuantificación "soft bits" de los valores L respectivamente según el procedimiento de Max Lloyd.
- Fig. 4: tabla de los coeficientes adaptados a , b y c de la función de aproximación $f(\sigma_L) = a\sqrt{\sigma_L} + b\sigma_L + c\sigma_L^2$ para los niveles de reconstrucción y los niveles de decisión en los niveles de reconstrucción $R = 2, 3, 4, 5, 6, 8$.
- Fig. 5: porcentaje de error en bit de una decodificación Log-Map de un código PCC ($G = [1,5/7]$, longitud de bloque $N = 2000$, canal AWGN) cuando se emplea una cuantificación para maximizar información mutua en comparación con un la utilización de una cuantificación directa del valor L según Lloyd-Max.
- Fig. 6: muestra la entropía de los valores L , que se cuantifica con la maximización de información mutua $I_q(X;L)$ como función de σ_L^2 (líneas continuas) y la longitud de identificador media (grados) alcanzable con una codificación tridimensional de Huffman.

Ejemplo de realización preferente

- 20 A continuación se explican en detalle los fundamentos y las expresiones matemáticas para posteriormente describir un procedimiento a modo de ejemplo de cualificación de los cocientes de probabilidad junto con su correspondiente ajuste.

La información mutua o trans-información es una cantidad conocida por los expertos de la teoría de la información, e indica la fuerza de un contexto estadístico entre dos variables aleatorias. La información mutua $I(X, L)$ entre dos variables X y L describe la disminución media de la incertidumbre de x cuando se conoce l y viceversa. Ésta se describe, por ejemplo, en Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, *Elements of Information Theory*; segunda edición, John Wiley & Sons, 2006. Se utiliza aquí la información mutua para determinar el promedio de pérdida de información de datos binarios en una cuantificación de los correspondientes valores L . Con un conjunto determinado de niveles de reconstrucción r_i y niveles de decisión d_i se calcula la información mutua $I(X, L)$ entre las variables binarias $X \in \{1, -1\}$ y la correspondiente densidad discreta cuantificada del valor L , así como la densidad del valor L continua no cuantificada. La información mutua para una densidad continua es:

$$I_c(X;L) = \sum_{x=\pm 1} \int \frac{p(l|x)}{2} \text{ld} \frac{2p(l|x)}{p(l|x=1) + p(l|x=-1)} dl$$

- 35 Para un canal gaussiano, la integración es factible en caso cuantificable discreto. La información mutua entre X y el correspondiente cociente de probabilidad log cuantificado con la suma de los dos posibles valores bit de la información bit $X \in \{+1, -1\}$ se puede representar como:

$$I_q(X;L) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^R [1 - \text{ld}(1 + e^{-r_i})] \text{erf} \left(\frac{l - \mu_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) \Big|_{d_i}^{d_{i+1}} \dots$$

$$+ [1 - \text{ld}(1 + e^{r_i})] \text{erf} \left(\frac{l + \mu_L}{\sqrt{2}\sigma_L} \right) \Big|_{d_i}^{d_{i+1}}$$

- 40 En lugar de la función de error $\text{erf}(x)$, también puede utilizarse la distribución normal estándar. Con "ld" se describe el logaritmo en base 2. Con $\mu_L = \sigma_L^2 / 2$ se describe la ecuación, en el número predeterminado R de los niveles de reconstrucción y la varianza predeterminada σ_L^2 o la desviación estándar μ_L de los valores L , la información mutua $I_q(X,L)$ en función de los niveles de reconstrucción r_i y de los niveles de decisión d_i .

La diferencia $\Delta I = I_c - I_q$ entre las dos informaciones mutuas representa la pérdida de información por cuantificación. Las derivadas con respecto a los niveles de reconstrucción r_i para $1 \leq i \leq R$ son:

$$\frac{\partial I_q}{\partial r_i} = \frac{1}{4 \ln 2} \frac{e^{-r_i}}{1 + e^{-r_i}} \operatorname{erf} \left(\frac{l - \mu_L}{\sqrt{2} \sigma_L} \right) \Big|_{d_i}^{d_{i+1}} - \frac{1}{4 \ln 2} \frac{e^{r_i}}{1 + e^{r_i}} \operatorname{erf} \left(\frac{l + \mu_L}{\sqrt{2} \sigma_L} \right) \Big|_{d_i}^{d_{i+1}}$$

Las derivadas con respecto a los niveles de decisión d_i para $1 \leq i \leq R+1$ son:

$$\begin{aligned} \frac{\partial I_q}{\partial d_i} = & \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_L} \operatorname{ld} \frac{1 + e^{-r_i}}{1 + e^{-r_{i-1}}} \exp \left(-\frac{(d_i - \mu_L)^2}{2\sigma_L^2} \right) \dots \\ & + \frac{1}{2\sqrt{2\pi}\sigma_L} \operatorname{ld} \frac{1 + e^{r_i}}{1 + e^{r_{i-1}}} \exp \left(-\frac{(d_i + \mu_L)^2}{2\sigma_L^2} \right) \end{aligned}$$

- 5 Para minimizar la pérdida de información ΔI , la información mutua I_q debe maximizar la densidad del valor L cuantificado. Para una varianza predeterminada σ_L^2 y un número predeterminado R de niveles de reconstrucción, la maximización de la información mutua I_q se obtiene mediante el correspondiente ajuste de los niveles de reconstrucción r_i y de decisión d_i .

10 La Fig. 1 muestra un diagrama de flujo esquemático de un ejemplo de realización. En una primera etapa del procedimiento de descenso inclinado u otro procedimiento de optimización numérico adecuado, para maximizar la información mutua I_q se emplea un rectángulo 10. Además, para el ajuste de cuantificación correspondiente se proporcionan medios para determinar los niveles de reconstrucción y de decisión mediante la maximización de la información mutua. Con la maximización de la información mutua I_q se obtiene como resultado una mínima pérdida de información ΔI con respecto a los niveles de reconstrucción optimizados r_i y los de decisión d_i .

15 En los diagramas de la Fig. 2 se representa tal maximización para niveles de reconstrucción determinados r_i y para los niveles de decisión d_i ejemplificados para $R = 5$ y ciertas varianzas como puntos huecos (°) y con "máx. MI" la "Información Mutua Máxima". Para niveles de reconstrucción $R = 5$, los niveles de decisión d_1 y d_{R+1} tienen los valores σ_L^2 , mientras que los cuatro niveles de decisión restantes tienen valores finitos. Por motivos de simetría aparecen tanto en los niveles de reconstrucción como en los niveles de decisión dos pares de niveles, cuyos valores sólo se diferencian en el signo. Asimismo, en la Fig. 2 sólo se representan los niveles positivos. Además, el nivel de reconstrucción $R = 5$ es independiente de la varianza de valor L , que siempre es igual a cero. Para la comparación se muestran en la Fig. 2 los correspondientes niveles de reconstrucción y de decisión según una cuantificación Lloyd-Max directa de los valores L (LLR cuant.) y una cuantificación Lloyd-Max de "soft bits" (bitquant. soft).

25 En la Fig. 2 se observa claramente una saturación del nivel esperado después de la cuantificación soft-bit con una varianza creciente σ_L^2 y, por tanto, una mayor cantidad de valores L . Está menos marcado en la maximización de la información mutua. Junto con la optimización ventajosa de los niveles directamente por la expresión no lineal, con esta cuantificación para la información mutua se obtiene, por una optimización independiente de los niveles de decisión, un nuevo grado de libertad a utilizar. Los niveles de decisión no deben estar en el centro entre dos niveles de reconstrucción. Así se consigue una reducción significativa de la pérdida de información mutua durante la cuantificación.

35 En la Fig. 3 se muestra la disminución de la información mutua ΔI entre valores L cuantificados y no cuantificados en función de la información mutua media de los valores L para los niveles de reconstrucción $R = 2, 3, 4, 5, 6, 8$. En el diagrama se compara la cuantificación mediante la maximización de información mutua (máx MI cuant.) con la cuantificación directa de los valores L (LLR cuant.). Claramente se observa la gran reducción de la pérdida de información mutua cuando se sustituye la cuantificación basada en LLR por la maximización de la información mutua. La reducción disminuye al aumentar el número R de niveles. El otro diagrama de la Fig. 3 compara la cuantificación mediante la maximización de la información mutua (máx. MI cuant.) con la cuantificación "soft-bit" (bitquant. soft). Con la cuantificación "soft-bit" ya se obtiene una
40 reducción significativa de la disminución de la información mutua frente a la cuantificación LLR directa. En una comparación de los dos diagramas se debe tener en cuenta la diferente escala del eje Y. Sin embargo, la pérdida de información mutua se redujo gracias a la cuantificación por maximización de información mutua frente a la cuantificación "soft bit" de nuevo en $\frac{1}{4}$. En particular, se debe atribuir a la optimización independiente de los niveles de decisión, como se puede ver en el caso $R = 2$. En $R = 2$ no se produce este

grado de libertad adicional, con lo que ambos procedimientos de cuantificación son esencialmente equivalentes.

5 En otra etapa del procedimiento, rectángulo 12, se ajusta una función de aproximación adecuada de la varianza o de la desviación estándar de algunos σ_L^2 mediante la maximización de la información mutua de determinados valores de un nivel de reconstrucción r_i o de decisión d_i para diferentes varianzas σ_L^2 . Para ello, el ajuste de cuantificación dispone de un medio de aproximación. Como función de aproximación se utiliza

$$f(\sigma_L) = a\sqrt{\sigma_L} + b\sigma_L + c\sigma_L^2$$

10 para todos los niveles en el ejemplo de realización. En la Fig. 2 se representan los dos niveles de reconstrucción y los dos niveles de acuerdo con las funciones ajustadas $f(\sigma_L)$ como líneas. En el ajuste se determinan los coeficientes apropiados a , b y c para un nivel. En un número predeterminado R de niveles de reconstrucción y $R+1$ de niveles de decisión no es necesario determinar los coeficientes a , b y c debido a la simetría de cada nivel, sino que se reduce a la mitad el número de ajustes necesarios. Además se aplica $d_1 = -\infty$, $d_{R+1} = +\infty$, $r_{(R+1)/2} = 0$ para R impar y $d_{R/2+1} = 0$ para R par, independientemente de la varianza σ_L^2 .

15 En la Tabla de la Fig. 4 se muestran todos los coeficientes necesarios a , b y c para los niveles de reconstrucción $R = 2, 3, 4, 5, 6, 8$. Con la ayuda de las funciones de aproximación para cada nivel de reconstrucción y de decisión, se observa una determinación rápida y fácil de los niveles óptimos en respuesta a una varianza predeterminada. Así, no siempre es necesario realizar, antes de cada cuantificación, una lenta y larga maximización de la información mutua I_q mediante un procedimiento de optimización adecuado, por ejemplo un procedimiento de descenso más inclinado.

20 En una realización alternativa, en lugar de la función de aproximación $f(\sigma_L)$ con los respectivos coeficientes se prevé la utilización de una tabla de valores para todos los niveles de reconstrucción y de decisión para el mayor número posible de varianzas diferentes σ_L^2 y una interpolación adecuada. También así es posible la determinación del nivel óptimo en términos de información mutua máxima de σ_L^2 y en función de un procedimiento de optimización rápido y fácil antes de la cuantificación.

25 Antes de la cuantificación de los valores L primero se determina la varianza o la desviación estándar σ_L^2 de los valores L en una unidad de recogida, rectángulo 14. Con la ayuda la función de aproximación $f(\sigma_L)$ y los correspondientes coeficientes a , b , y c se fijan los niveles de reconstrucción óptimos r_i y los niveles de decisión d_i , dependiendo de σ_L^2 o de σ_L con respecto a la información mutua mediante un generador de nivel, rectángulo 16. Por último, se realiza una cuantificación, rectángulo 18, de los valores L empleando los niveles de reconstrucción r_i y los de decisión d_i mediante una unidad de cuantificación. Las etapas de procedimiento 14, 16 y 18 se realizan de nuevo, por ejemplo, en un procesamiento de señal iterativo en toda cuantificación para producir los valores L .

35 A continuación se ilustran las etapas del procedimiento mediante ejemplos de decodificación turbo de un código convolucional paralelo concadenado (PCCC: código convolucional concatenado). Además también se muestra la comparación de una cuantificación directa de los valores L utilizados según Lloyd-Max y la influencia de un procedimiento de cuantificación para valores L en un proceso de procesamiento de señal.

40 Como código PCC se utiliza un PCCC simple sistemático recursivo con generadores $G = [1,5/7]$, longitud de bloque $N= 2000$ y un intercalador de probabilidad con puntuación para conseguir una tasa $1/2$. Tal código es conocido por los expertos, por ejemplo, de Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, *Elements of Information Theory*, segunda edición, John Wiley & Sons, 2006. Para la decodificación se utiliza un algoritmo BCJR, donde la aproximación máxima Log-Map (MAP: máxima probabilidad a posteriori) conduce básicamente a los mismos resultados que la versión Log-Map exacta. Aquí se intercambia la información extrínseca existente en una salida de decodificador entre dos decodificadores que trabajan conjuntamente. Para ello, es necesaria una cuantificación de los valores L de la información extrínseca.

45 En primer lugar, se determina la varianza de los valores L de forma adaptada a la salida del decodificador MAP con el medio de recogida. Para ello, la varianza de $|L(X)|$, del valor absoluto L de los bits de código, se representa como varianza σ_L^2 . Con ayuda de la función de aproximación y de los correspondientes coeficientes válidos a , b y c (véase Fig. 3) se determinan, a partir de la varianza determinada, los niveles de reconstrucción r_i y los niveles de decisión d_i . Para ello, se utiliza en el ajuste de cuantificación el generador de nivel. Por tanto, los niveles determinados se optimizan para maximizar la información mutua en función de la varianza. Por último, se cuantifican los valores L con los niveles de reconstrucción r_i y con los niveles de decisión d_i determinados mediante la unidad de cuantificación. Este procedimiento se aplica en cada iteración de decodificación. Para varianzas superiores a $\sigma_L^2 = 100$ se utilizan los niveles para este valor y se escala la distribución del valor L actual para obtener información a partir del valor relativo entre los valores L de forma correspondiente. En este punto es posible interrumpir la iteración.

- Para la comparación se realizan las codificaciones con los diferentes R (número de niveles de reconstrucción) en la cuantificación y, además de cuantificación por maximización de información mutua, se lleva a cabo también una cuantificación directa de los valores L según el procedimiento de Lloyd-Max. En la Fig. 5 se representa la frecuencia de error de bit (BER: tasa de error de bits) de la codificación individual como función de la energía de bit de las relaciones de densidad de potencia/ruido E_b/N_0 . La relación de la energía empleada E_b para un bit de información con respecto a la densidad de potencia de ruido espectral N_0 se refiere a la relación ruido/señal de un bit de información. Al aumentar el ruido, es decir, disminuir E_b/N_0 , en general se incrementa la tasa de error de bit. En el diagrama superior se representan las tasas de error de bit para diferentes R y E_b/N_0 utilizando la cuantificación con la maximización de la información mutua (máx. MI cuantificada). Se reconoce claramente una disminución de la tasa de error de bit con el aumento de R . Como referencia (no cuant.) se utiliza la representación no cuantificada de la información *a priori*. El diagrama inferior muestra las tasas de error de bit para los correspondientes R y E_b/N_0 cuando se emplea la cuantificación directa de Lloyd-Max para los valores L . Esta cuantificación generalmente conduce a una tasa de error de bit más elevada que la máx. cuantificación MI.
- En otro ejemplo de realización se lleva a cabo adicionalmente la codificación de entropía, rectángulo 20, de los niveles de reconstrucción mediante un codificador de entropía del ajuste de cuantificación. Las codificaciones de entropía son conocidas por los expertos, por ejemplo, de A. Gersho, R. M. Gray, *Vector Quantization and Signal Compression*, Boston, MA, Kluwer, 1992, y de Thomas M. Cover, Joy A. Thomas, *Elements of Information Theory*, segunda edición, John Wiley & Sons, 2006. La cuantificación para maximizar la información mutua, así como la cuantificación "soft-bit" proporcionan niveles de reconstrucción que se utilizan con diferentes probabilidades. Las áreas bajo la curva de densidad gaussiana bimodal para cada nivel de reconstrucción son diferentes. Los niveles de reconstrucción clasifican identificadores de nivel o patrones de bits de diferentes longitudes. Para ello, se utiliza un código de prefijo libre y a menudo los niveles de reconstrucción utilizados obtienen un identificador de nivel más corto. De esta forma, se logra una compresión de datos y, en consecuencia, una reducción efectiva de la tasa de datos.

Se calcula un límite inferior de la longitud media del identificador necesaria mediante la entropía de los niveles de reconstrucción:

$$H_R(L_q) = - \sum_{i=1}^R P_i \log P_i + (1 - P_i) \log (1 - P_i)$$

- En la Fig. 6, $H_R(L_q)$ se representa como función de la varianza σ_L^2 de diferentes R (número de niveles de reconstrucción) con líneas continuas. La codificación de entropía se realiza, por ejemplo, mediante una codificación tridimensional de Huffman. Para ello, los tres valores L se representan conjuntamente en términos de una cuantificación vectorial. La longitud media del identificador se representa para diferentes R y σ_L^2 en la Fig. 6, respectivamente, como función de paso sobre la curva de entropía. Sin embargo, también es posible utilizar una dimensión diferente u otro procedimiento de codificación. Por ejemplo, se observa una cuantificación de la distribución de valor L -gaussiana bimodal con niveles de reconstrucción $R = 4$ mediante la maximización de la información mutua. Para $\sigma_L^2 = 10$, la entropía supone la probabilidad de nivel bits $H = 1,743$, una codificación de Huffman mono, bi o tridimensional conduce a una longitud media del identificador de 1,816; 1,775; y 1,746 bits. Si aumenta la varianza de los valores L en $\sigma_L^2 = 20$, se reduce la entropía a bits $H = 1,340$, que se aproxima mediante una codificación de Huffman mono, bi o tridimensional a los correspondientes bits 1,595; 1,368 y 1,363. También son posibles dimensiones superiores para los correspondientes libros de códigos.

REIVINDICACIONES

- 5 1. Procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación de coeficientes de probabilidad de variables aleatorias binarias, siendo éstos probabilidades cuantificadas, transmitiéndose los coeficientes entre dos o más unidades de procesamiento de señales, caracterizado por

maximizar (10) la información mutua entre las variables aleatorias binarias y las correspondientes cuantificadas en una distribución de probabilidad predeterminada de los coeficientes de probabilidad mediante la variación de los intervalos de cuantificación y de los valores de cuantificación, y

10 determinar los intervalos de cuantificación y los valores de cuantificación de la información mutua máxima, y

cuantificar (18) los coeficientes de probabilidad utilizando el intervalo de cuantificación y los valores de cuantificación de la de información mutua máxima.
- 15 2. Procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación de coeficientes de probabilidad según la reivindicación 1, caracterizado porque se calcula (14) una varianza del cociente de probabilidad antes de la cuantificación para determinar los mencionados intervalos de cuantificación y los valores de cuantificación.
- 20 3. Procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación de coeficientes de probabilidad según la reivindicación 2, caracterizado porque se ajusta (12) una función de aproximación como función de la varianza de los valores de cuantificación determinados o de los intervalos de cuantificación en diferentes varianzas de los mencionados coeficientes de probabilidad y se determinan (16) los valores de cuantificación y los intervalos de cuantificación en la cuantificación mediante dicha función de aproximación.
- 25 4. Procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación de coeficientes de probabilidad según las reivindicaciones 1 a 3, caracterizado porque se emplea una tabla de valores y/o una interpolación en la determinación de los citados valores de cuantificación o intervalos de cuantificación.
- 30 5. Procedimiento de procesamiento de señales para la cuantificación de coeficientes de probabilidad según las reivindicaciones 1 a 4, caracterizado porque se lleva a cabo una codificación entrópica (20) de los valores de cuantificación.
- 35 6. Dispositivo de cuantificación para el procesamiento de señales para la cuantificación de los coeficientes de probabilidad de variables aleatorias binarias, donde los citados coeficientes de probabilidad cuantificados se transmiten entre dos o más unidades de procesamiento de señales, caracterizado porque

se proporcionan medios (10) para maximizar la información mutua entre las variables binarias y los correspondientes coeficientes de probabilidad cuantificados para una densidad de probabilidad dada de los coeficientes de probabilidad mediante la variación de los intervalos de cuantificación y de los valores de cuantificación, y

40 medios para determinar los intervalos de cuantificación y los valores de cuantificación de la información mutua máxima y

medios para cuantificar (18) los coeficientes de probabilidad utilizando los intervalos de cuantificación y los valores de cuantificación de la información mutua máxima.
- 45 7. Dispositivo de cuantificación para el procesamiento de señales para la cuantificación de los coeficientes de probabilidad según la reivindicación 6, caracterizado porque se proporciona una unidad de registro para registrar una varianza de los coeficientes de probabilidad antes de la cuantificación para determinar los mencionados intervalos de cuantificación y los valores de cuantificación.
- 50 8. Dispositivo de cuantificación para el procesamiento de señales para la cuantificación de los coeficientes de probabilidad según la reivindicación 7, caracterizado porque incluye medios de aproximación para ajustar una función de aproximación como función de la varianza en los intervalos de cuantificación determinados o en los valores de cuantificación para diferentes varianzas de los

mencionados coeficientes de probabilidad y un generador para determinar los valores de cuantificación y los intervalos de cuantificación en la cuantificación con la función de aproximación.

- 5
9. Dispositivo de cuantificación para el procesamiento de señales para la cuantificación de los coeficientes de probabilidad según las reivindicaciones 6 a 8, caracterizado porque el ajuste de cuantificación dispone de una memoria con una tabla de valores y/o una unidad de interpolación para determinar los valores de cuantificación o los intervalos de cuantificación.
 10. Dispositivo de cuantificación para el procesamiento de señales para la cuantificación de los coeficientes de probabilidad según las reivindicaciones 6 a 9, caracterizado porque se proporciona un codificador entrópico para los valores de cuantificación.

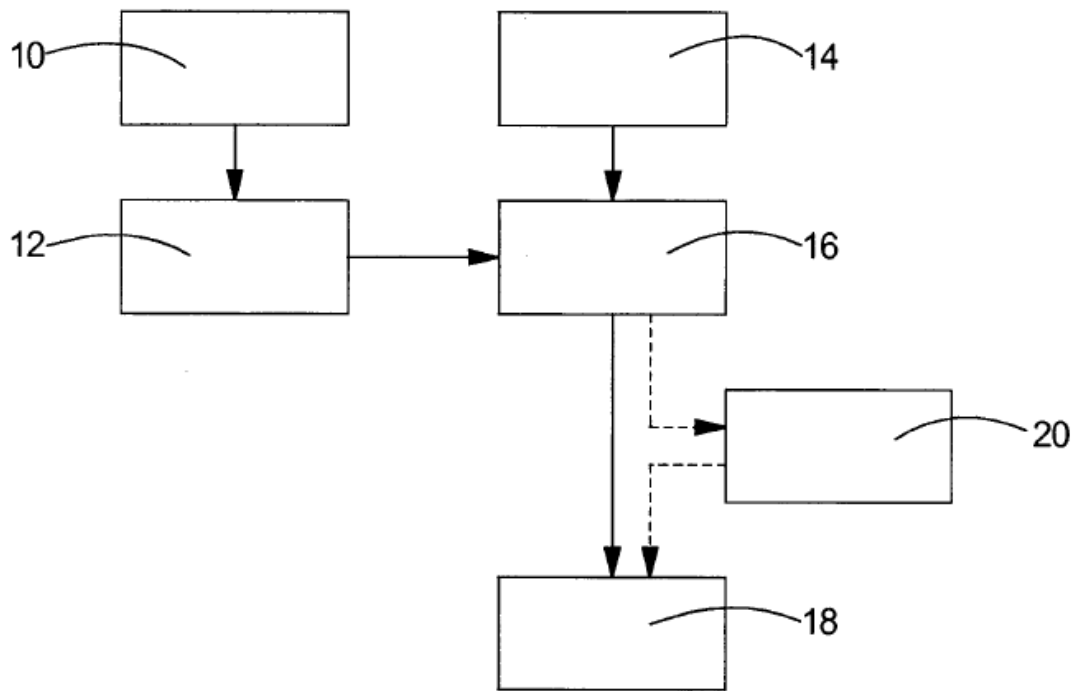


Fig. 1

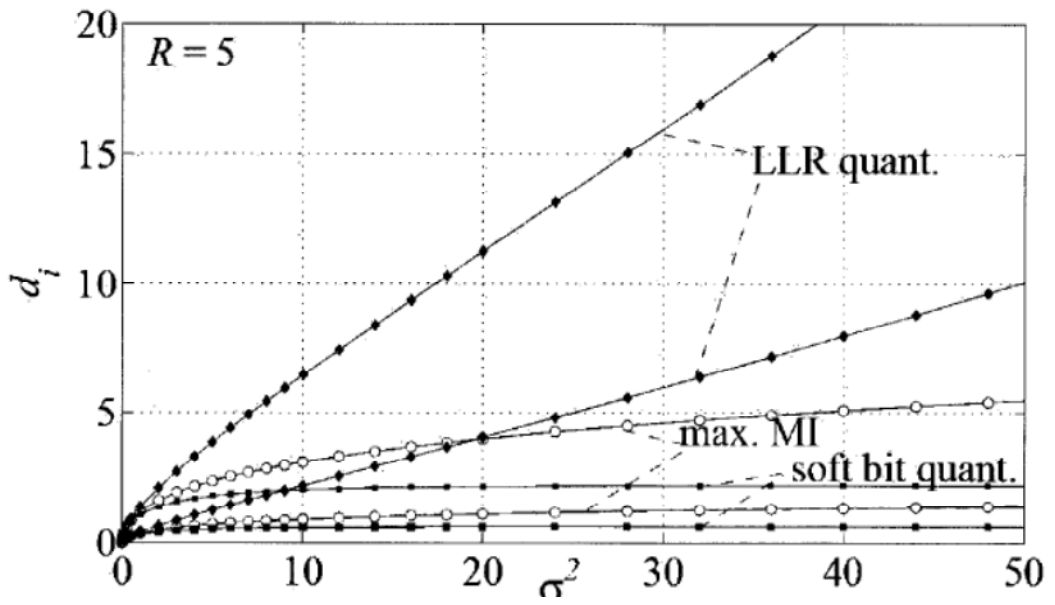
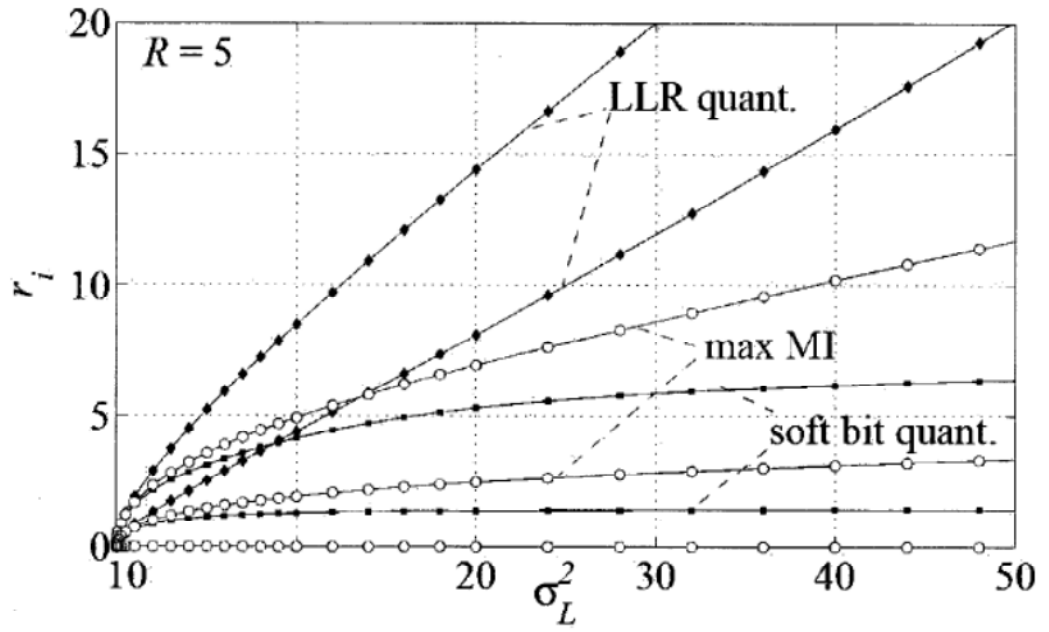


Fig. 2

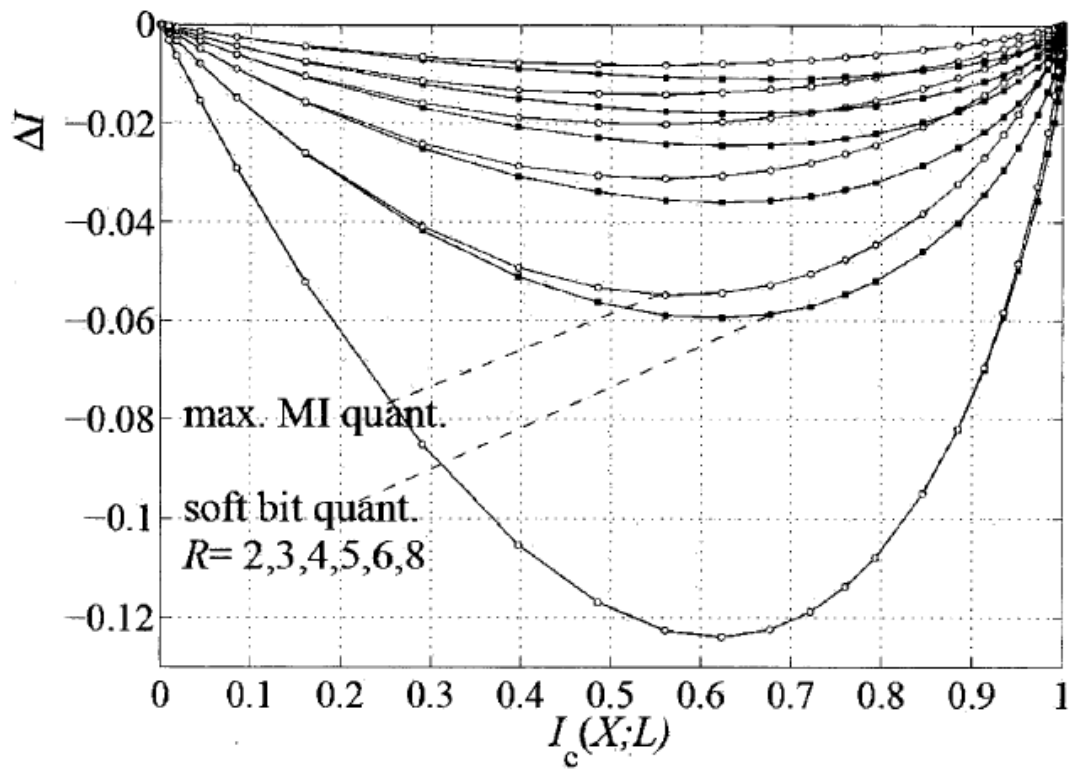
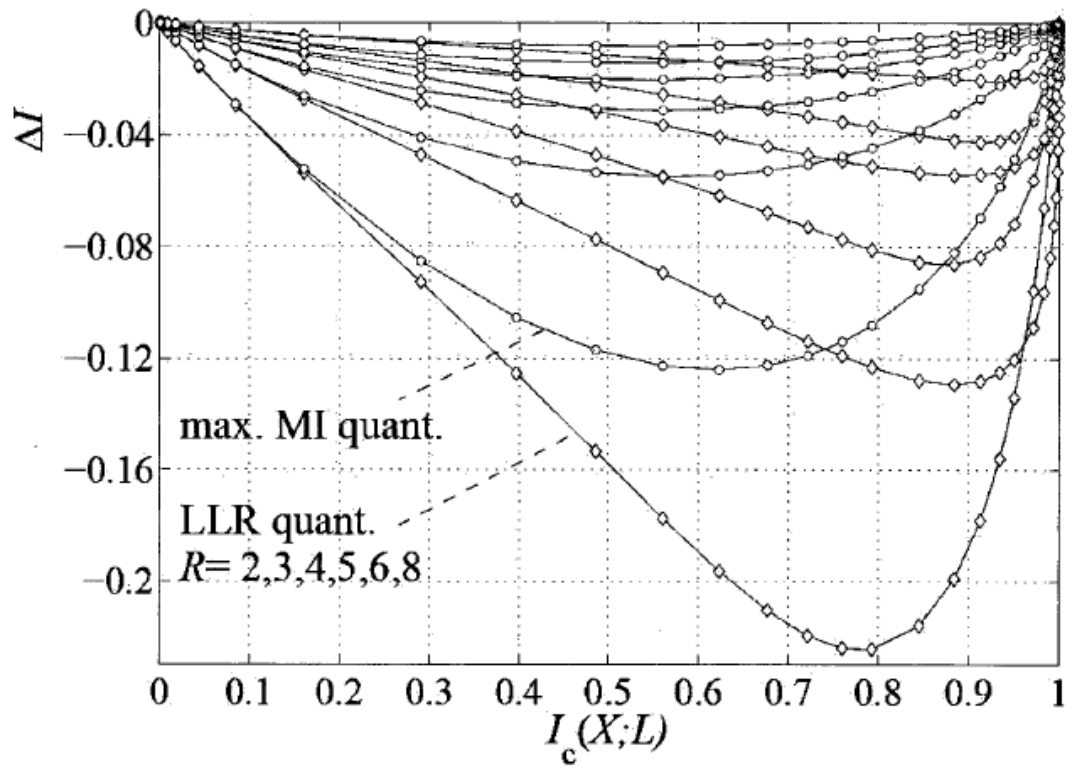


Fig. 3

	a	b	c
$R = 2, r_1$	0.4473	0.2806	0.1075
$R = 3, r_1$	0.6865	0.4861	0.0955
$R = 3, d_1$	0.218	0.4082	-0.01687
$R = 4, r_1$	0.1305	0.3251	-0.01053
$R = 4, r_2$	0.8214	0.6343	0.08861
$R = 4, d_1$	0.33	0.6509	-0.02219
$R = 5, r_1$	0.2361	0.5248	-0.01938
$R = 5, r_2$	0.9179	0.7457	0.08219
$R = 5, d_1$	0.1605	0.2223	-0.01146
$R = 5, d_2$	0.3924	0.8367	-0.02881
$R = 6, r_1$	0.1299	0.1831	-0.009314
$R = 6, r_2$	0.3312	0.6499	-0.02541
$R = 6, r_3$	1.002	0.8184	0.07718
$R = 6, d_1$	0.2813	0.3667	-0.01879
$R = 6, d_2$	0.4546	0.9589	-0.03378
$R = 8, r_1$	0.1358	0.09532	-0.006295
$R = 8, r_2$	0.3794	0.3377	-0.01972
$R = 8, r_3$	0.5314	0.7521	-0.03236
$R = 8, r_4$	1.179	0.8661	0.07178
$R = 8, d_1$	0.2737	0.199	-0.01278
$R = 8, d_2$	0.4993	0.4999	-0.02727
$R = 8, d_3$	0.611	1.063	-0.0398

Fig. 4

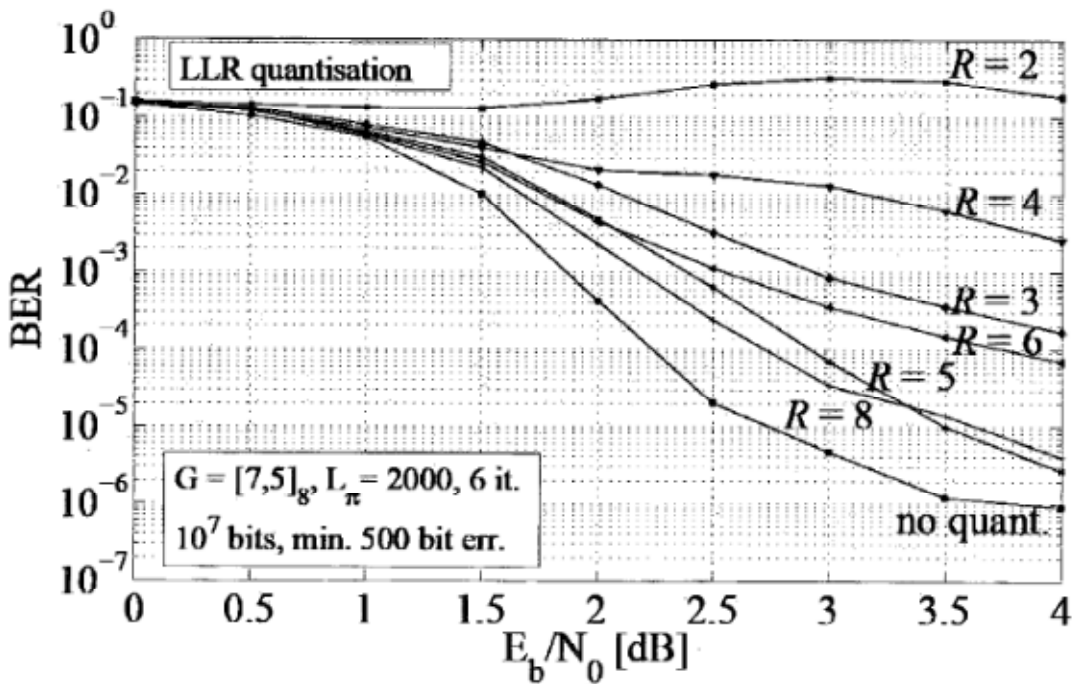
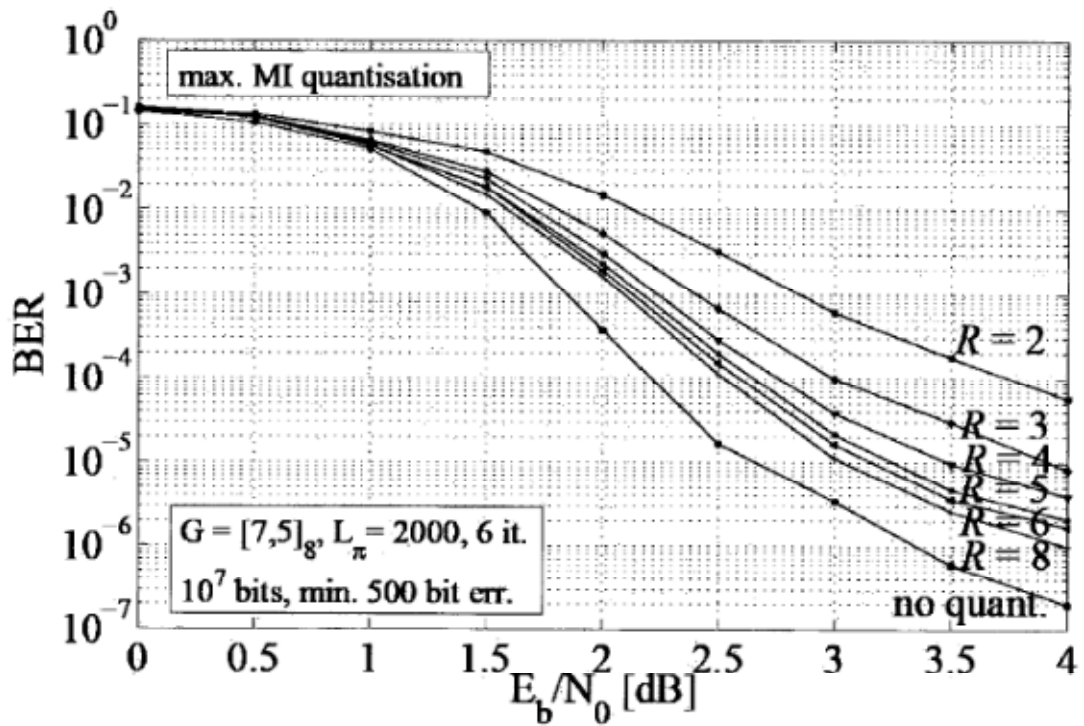


Fig. 5

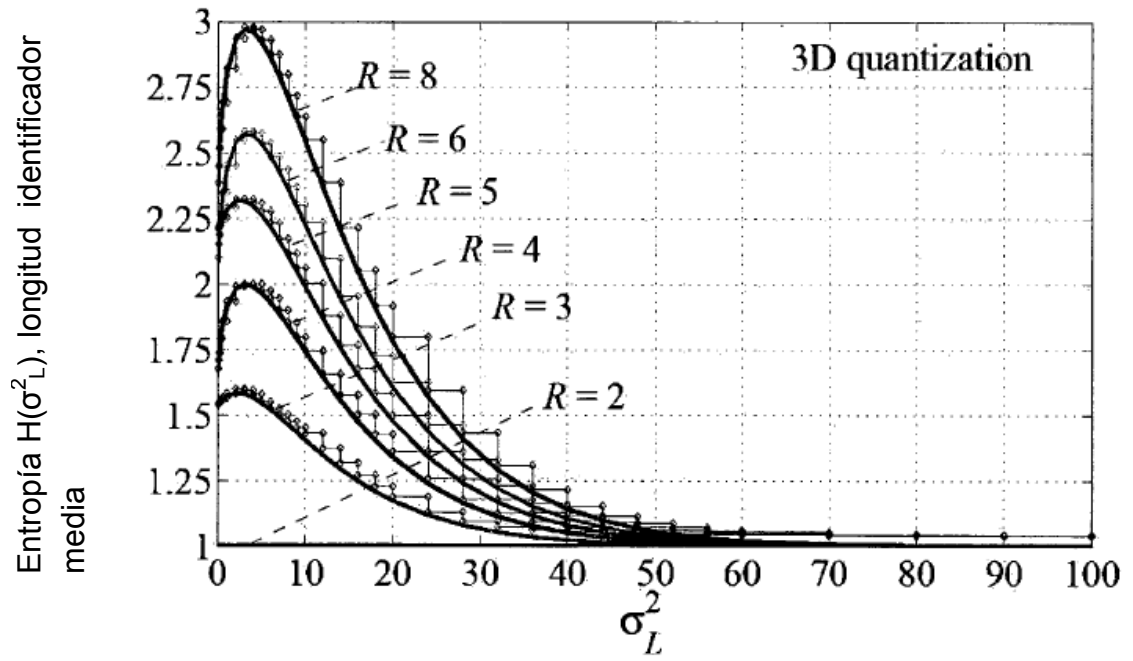


Fig. 6