

OCDMA 系统二维 2D-OOSC 方阵码的参数优化和性能分析

李传起, 孙小菡, 张明德, 丁东

(东南大学电子工程系, 南京 210096)

[摘要] 给出了二维 $\lambda-t$ 光正交方阵码 2D-OOSC 的设计方案, 重点讨论了 2D-OOSC 码字的相关性及码字参数对系统性能的影响。详细分析了 2D-OOSC 系统的用户容量以及由多用户干扰引起的误码性能。研究表明, 在占用相同带宽的条件下, 系统的用户容量远大于基于 1D-OOC 的 WDM-CDMA 混合系统, 特别是在传输距离不太远的局域网中, 光纤色散引起的传输损失较小。基于 2D-OOSC 地址码的 OCDMA 系统有着现实的应用价值。

[关键词] 光码分多址(OCDMA); 二维正交方阵码(2D-OOSC); 多址干扰 MUI; 误码率(BER)

[中图分类号] TN929 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2003)04-0050-05

1 引言

近年来, 非相干光谱幅编解码技术得到广泛的研究, 取得了重大突破^[1-3]。使得具有超大信息承载能力、随机异步接入、保密性好、光子进光子出等特点的光码分多址(OCDMA)系统朝着实用化方向迈进了一大步。该系统是在光域对各路信号进行光编码和光解码, 实现多址通信。克服了 WDM 光网络残留在发送端和接收端的电子瓶颈, 从而成为实现真正意义上的全光通信网最有希望的多址复用技术^[4]。OCDMA 系统采用宽带光源, 且无须精确控制波长, 对传输光纤无特殊要求, 系统中器件数量少, 降低了网络成本, 简化了网络管理, 并增加了网络的可靠性。

OCDMA 技术实用化的关键在于寻找性能优良的光地址码码集。光码集的性能优劣主要取决于最大码字容量 ϕ_{\max} 以及由多址干扰引起的系统误码率 (MUI-BER)。自 1983 年 Shaar 等提出光素数码概念^[5]以来, 光码集的性能得到不断优化^[6-8], 但是对于一维光地址码而言, 要提高用户容量就必须增加码字长度, 从而导致信道码速的下降。此外, 对于多用户、长码字的 OCDMA 系统, 随着

用户数量的增加, 多址干扰增大, 系统误码率上升, 系统性能将不断恶化。1988 年, P. A. Perrier 等^[9]提出了波分复用和码分复用的混合系统, 亦即先对光纤的有效可用带宽进行波长分割, 然后对每一波长信道应用码分复用技术, 有效缩短了码字长度。不过, 这种方法只是 WDM 和 CDMA 的简单叠加, 其用户容量和系统性能均没有得到本质上的改进。1997 年, Guu Chang Y. 等提出了多波光二维正交码(2D-OOC)的理论模型^[10], 将基于光纤延时线的时域扩频技术与空分复用技术结合起来, 在时域和谱域同时对光脉冲进行编码。这样, 缩短了码字长度。改善了系统性能。

二维光正交地址码的码字参数表示为 $(m \times n, w, \lambda_a, \lambda_c)$, 其中 m 为码字所用的波长片数, n 为码字长度, 每个码字由矩阵表示; w 为码重, 即分布在矩阵中的 1 的个数; λ_a 和 λ_c 分别为自相关和互相关限制系数, 分别为

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} x_{i,j \oplus \tau} \leq \lambda_a, \quad (1)$$

$$\sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} x_{i,j} y_{i,j \oplus \tau} \leq \lambda_c, \quad (2)$$

其中, $x_{i,j}$ 为位于码字矩阵中第 i 行、第 j 列的码

[收稿日期] 2002-10-21; 修回日期 2002-12-28

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(60272048)

[作者简介] 李传起(1964-), 男, 安徽六安市人, 南京气象学院副教授, 东南大学博士研究生

元, \oplus 表示模 n 和运算。二维码的性能与这些参数的关系密切。给出二维 $\lambda-t$ 光正交方阵码(2D-OOSC)($n \times n, w, 1, 1$)的设计方案, 分析其相关性质, 讨论用户容量, 研究误码性能。

2 二维光 $\lambda-t$ 正交方阵码的构造

对于码长 n 、码重 w 的一维光正交方阵码, 素数 $n = w(w-1)t + 1$, t 为码字个数, 各码字的区位表示为^[11]

$$[d_0^T, d_2^T, d_2^T, \dots, d_i^T, \dots, d_{w-1}^T], T \in [0, t-1], \quad (3)$$

其中 d_i^T 表示在第 T 个码字中, w 个 1 相对于 $(0, 1)$ 地址码序列起始位置的移位。从一维光正交方阵码出发, 对式(3)同时施行纵向移位(波长变换)和横向移位(时间变换), 应用纵向模和、横向模积的方法, 得到二维矩阵码的码字。取 $i \in [0, m-1], j \in [0, n-1]$, 有如下矩阵码:

$$\begin{aligned} & (d_0^T \oplus i, d_0^T \otimes j), (d_1^T \oplus i, d_1^T \otimes j_1), \\ & (d_2^T \oplus i, d_2^T \otimes j), \dots, (d_{w-1}^T \oplus i, d_{w-1}^T \otimes j), \\ & i \in [0, m-1], j \in [0, n-1], T \in [0, t-1], \end{aligned} \quad (4)$$

其中, \oplus, \otimes 分别为模 m 加以及模 n 乘运算。 (a, b) 内的每一对数字 (a, b) 代表 1 在码字矩阵中的位置, 即相对于左下角起始位置的移位。每一对数字表示纵向向上移位为 a (不同波长片之间的交换), 水平向右移位为 b (不同时间片之间的交换)。

对于二维方阵码, $m = n$, 波长片和时间片数目相等。这样, 横向和纵向各自移位 n 次, 每个一维码将衍生出 n^2 个码字, t 个一维码共产生 $n^2 t$ 个二维码。

考虑到 w 个 1 可以处于同一波长片, 原一维码可整体纵向移动 k 次, 得到

$$[(k, d_0^T), (k, d_1^T), (k, d_2^T), \dots, (k, d_{w-1}^T)], \quad k \in [0, n-1], T \in [0, t-1], \quad (5)$$

共 nt 个码字。至此, 该 2D-OOSC 中, 共有由 t 个一维码衍生出的二维码字 $n(n+1)t$ 个。

3 2D-OOSC 的相关性分析

考察由式(4)确定的码字 X , 对任意给定的 i, j , 其 w 个 1 分别位于 $(d_0^T \oplus i, d_0^T \otimes j), (d_1^T \oplus i, d_1^T \otimes j), (d_2^T \oplus i, d_2^T \otimes j), \dots, (d_{w-1}^T \oplus i, d_{w-1}^T \otimes j)$ 。由于 $d_0^T, d_1^T, d_2^T, \dots, d_{w-1}^T$ 互不相同, $d_k^T \oplus i, k \in [0, w-1]$ 也各不相同, 即 1 分列于不同的行。每

一行上只有一个 1。这样, 码字 X 经 τ ($\tau \pmod n \neq 0$) 次横向移位后, 其 1 的列位置为 $(d_k^T \otimes j) \oplus \tau$, 与移位前的列位置 $d_k^T \otimes j$ 必不相同。由式(1), 自相关限制得到满足。

考察由式(4)确定的 2 个码字 X 和 Y , 设 i_1, j_1 确定码字 X, i_2, j_2 码字 Y , 则有 X 中 1 的位置为

$$(d_0^{T_1} \oplus i_1, d_0^{T_1} \otimes j_1), (d_1^{T_1} \oplus i_1, d_1^{T_1} \otimes j_1), \\ (d_2^{T_1} \oplus i_1, d_2^{T_1} \otimes j_1), \dots, (d_{w-1}^{T_1} \oplus i_1, d_{w-1}^{T_1} \otimes j_1),$$

Y 中 1 的位置为

$$(d_0^{T_2} \oplus i_2, d_0^{T_2} \otimes j_2), (d_1^{T_2} \oplus i_2, d_1^{T_2} \otimes j_2), \\ (d_2^{T_2} \oplus i_2, d_2^{T_2} \otimes j_2), \dots, (d_{w-1}^{T_2} \oplus i_2, d_{w-1}^{T_2} \otimes j_2)。$$

T_1, T_2 的区别在于 X, Y 有可能来源于不同的一维码字。

现假设在 X, Y 中分别有两个或两个以上的 1 的对应位置相同, 即

$$d_{k_1}^{T_1} \oplus i_1 = d_{k_2}^{T_2} \oplus i_2, d_{l_1}^{T_1} \oplus i_1 = d_{l_2}^{T_2} \oplus i_2, \quad (6)$$

式中 k_1, l_1 对应 X 中的 2 个 1, k_2, l_2 对应 Y 中的 2 个 1, $k_1, l_1, k_2, l_2 \in [0, w-1]$ 。将式(6)中的两式相减得

$$d_{k_1}^{T_1} - d_{l_1}^{T_1} = d_{k_2}^{T_2} - d_{l_2}^{T_2}。 \quad (7)$$

式(7)的左端是原来第 T_1 个一维码字中的 2 个 1 的位置差, 而右端是原来第 T_2 个一维码字的 2 个 1 的位置差。无论 T_1 是否等于 T_2 , 式(7)均违背了一维正交方阵码($n, w, 1, 1$)的性质, 即在自相关和互相关限制均为 1 的条件下, 码字中任意 2 个 1 的位置差一定不等的性质。因此, 在 X, Y 中分别有 2 个或 2 个以上的 1 的对应位置相同的假设不能成立。这样, 互相关限制为 1 的条件得到满足。

对于由式(5)确定的码字, 同一波长片上的 $(0, 1)$ 整体上从一个波长片移至另一波长片, 1 在时间片上的相对位置不变。显然自相关和互相关性质不变, 即满足原来的自相关和互相关限制。

4 2D-OOSC 的误码性能研究

为突出主要矛盾, 主要考虑来自于多用户干扰的噪声源, 而忽略诸如热噪声, 量子噪声等对系统性能的不利影响。在这个前提下, 当某个用户传输数据 0 时, 如果由于其他用户串扰的累积效应, 使

得多用户干扰的功率超过了接收机判决门限,而被判决为1,就形成一个误码。根据撞击法,首先考虑任意两个码字间的撞击率 q 。对于1D-OOC($n, w, 1, 1$),设序列地址码码字携带0信号和1信号的概率均为1/2,则

$$q = w^2/2n. \quad (8)$$

对于二维方阵码($n \times n, w, 1, 1$),先考虑由式(4)确定的码字标识为 T, i, j 的 n^2t 个码字。分析任意两个码字 X, Y 的不同时间片(即标识 j 不同)上的1发生碰撞的概率。

X 中1的位置为

$$(d_0^{T_1} \oplus i_1, d_0^{T_1} \otimes j_1), (d_1^{T_1} \oplus i_1, d_1^{T_1} \otimes j_1), \dots, (d_{w-1}^{T_1} \oplus i_1, d_{w-1}^{T_1} \otimes j_1)。$$

Y 中1的位置为

$$(d_0^{T_2} \oplus i_2, d_0^{T_2} \otimes j_2), (d_1^{T_2} \oplus i_2, d_1^{T_2} \otimes j_2), \dots, (d_{w-1}^{T_2} \oplus i_2, d_{w-1}^{T_2} \otimes j_2)。$$

其中下标1对应码字 $X, 2$ 对应码字 Y 。

1)当 $T_1 = T_2, i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$ 时,码字 X 和 Y 中的1的对应行位置相同。由于各行至多有一个1,分列在 w 行中,其撞击率显然为 $w/2n$ 。取定 X 后,满足 $T_1 = T_2, i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$ 条件的 Y 共 $n-1$ 个。因此这种情况下的总撞击率为

$$q_1 = (n-1)w/2n. \quad (9)$$

$i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$ 的两码字碰撞如图1所示。

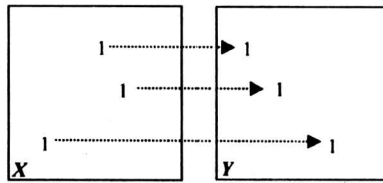


图1 $i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$ 的两码字碰撞示意图

Fig.1 The HIT scheme of two codes with $i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$

2)当 $T_1 = T_2, i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ 时, X 中的每个1与 Y 中的1相撞的几率为 w/n^2 。所以 X, Y 之间的撞击率为 $w^2/2n^2$ 。取定 X 后,满足 $T_1 = T_2, i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ 条件的 Y 共 $(n-1)^2$ 个。因此有

$$q_2 = (n-1)^2w^2/2n^2. \quad (10)$$

3)当 $T_1 \neq T_2, i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ 时, X 和 Y 中的1相撞的几率也是 $w^2/2n^2$,取定 X 后,满足

$T_1 = T_2, i_1 = i_2, j_1 \neq j_2$ 条件的 Y 共 $(n-1)^2(t-1)$ 个。此时,总撞击率为

$$q_3 = (n-1)^2(t-1)w^2/2n^2. \quad (11)$$

$i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ 的两码字碰撞如图2所示。

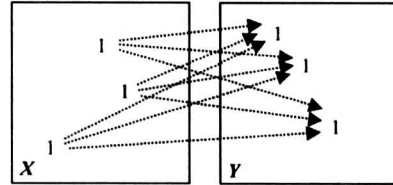


图2 $i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$ 的两码字碰撞示意图

Fig.2 The HIT scheme of two codes with $i_1 \neq i_2, j_1 \neq j_2$

由式(5)确定的二维码字与一维正交方阵码没有本质上的区别,由 t 个一维本原码生成的二维码字的总撞击率为

$$q_4 = tw^2/2n. \quad (12)$$

在2D-OOSC($n \times n, w, 1, 1$)的所有 $n(n+1)t$ 中,与某个确定的码字相撞的其他码字数目为 $n(n+1)t-1$ 。于是,得到平均撞击率为

$$\bar{q} = [q_1 + q_2 + q_3 + q_4] / [n(n+1)t - 1] = [w(n-1)/2n + w^2(n-1)^2/2n^2 + w^2(n-1)^2 \times (t-1)/2n^2 + w^2t/2n] / [n(n+1)t - 1], \quad (13)$$

式中 n, w, t 之间存在关系 $n = w(w-1)t + 1$ 。经化简后,在 n 较大时,有

$$\bar{q} \approx w^2/2n^2. \quad (14)$$

基于2D-OOSC的OCDMA系统,由多址干扰引起的误码率(BER)为

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \sum_{i=T_h}^{K-1} \binom{K-1}{i} q^i (1-q)^{K-1-i}, \quad (15)$$

式中 K 为实际用户数, T_h 为接收机判决门限, $q^i(1-q)^{K-1-i}$ 表示恰有 i 个与该码字相撞的几率, $\binom{K-1}{i}$ 为组合数。

以 \bar{q} 代替 q ,得

$$R_{BE} = \frac{1}{2} \sum_{i=T_h}^{K-1} \binom{K-1}{i} \left(\frac{w^2}{2n^2}\right)^i \left(1 - \frac{w^2}{2n^2}\right)^{K-1-i}. \quad (16)$$

图3给出了2D-OOSC码集($13 \times 13, 4, 1, 1$), ($21 \times 21, 5, 1, 1$), ($31 \times 31, 6, 1, 1$), ($43 \times 43, 7, 1, 1$), ($57 \times 57, 8, 1, 1$)相对于并发用户数的误码性

能,其中接收机的判决门限设为 $T_h = 2w$ 。从图 3 可以看出:对于码字长度为 21, 31, 43, 57 的 2D-OOSC 光码集,在误码率低于 10^{-9} 的条件下,分别能容纳用户数为 30, 65, 125, 225。假设每用户的数据比特率为 10 Gb/s,该系统总理论容量可达到海量级。

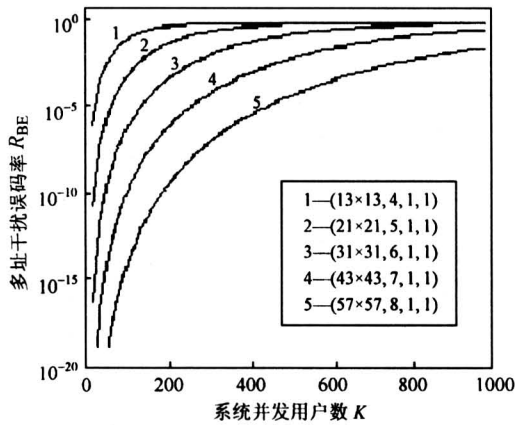


图 3 基于 2D-OOSC 的 OCDMA 系统相对于并发用户数的 BER

Fig.3 BER of 2D-OOSC based OCDMA against number of active users

由式(16)还可以看出,在系统用户数 K 确定时,适当调整码长 n 和码重 w ,可使系统的多址干扰得到进一步的改进。亦即 q 值越小,系统性能越好。图 4 给出的是多址干扰误码性能随 q 的变化关系。不过,由式(14)可见, q 正比于 $(w/n)^2$ 。因此,要获得较小的 q ,就要降低码重或增加码长。前者不利于相关检测,因为码重减轻将引起自相关峰值下降,导致信噪比降低,误码率上升;后者则不利于信道比特率,因为长码字的比特周期大,信道码速低。

2D-OOSC 系统的最大码字容量(可容纳的最大用户数) ϕ_{max} 可从 Johnson 条件^[11]推广得到。对于 $\lambda_a = \lambda_c = 1$ 的正交方阵码,有

$$\phi_{max}(m \times n, w, 1, 1) \leq \frac{m \times (mn - 1)}{w(w - 1)} \quad (17)$$

当 $m = n$, $n = w(w - 1)t + 1$ 时,由式(17)计算得, $\phi_{max}(n \times n, w, 1, 1) \leq n(n + 1)t$,式(4)和式(5)给出的 2D-OOSC 的码字容量正是 $n(n + 1)t$ 。这就是说,基于式(4)和式(5)的二维 OCDMA 系统在用户容量上实现了最优化。对于 $(m \times n, w, 1, 1)$ 矩阵码而言,最大码字容量 ϕ_{max} 由 m, n, w 三

者共同决定。由式(17)可见, ϕ_{max} 随码重的增加迅速下降,即较轻的码重有利于码字容量的提高(见图 5)。但是,码重太轻同时会导致系统误码率的上升。因此,根据不同传输需求,适当地选择波长片数、时间片数以及码的重量,综合考虑三者的总体影响,可以获得满意的用户容量和系统的误码性能。

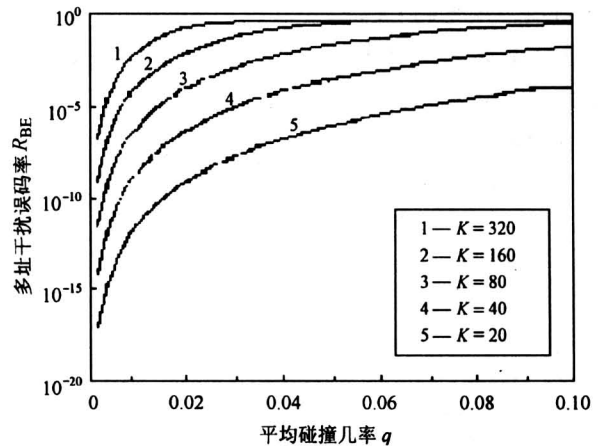


图 4 基于 2D-OOSC 的 OCDMA 系统相对于平均碰撞几率 q 的 BER

Fig.4 BER of 2D-OOSC based OCDMA against number of average q

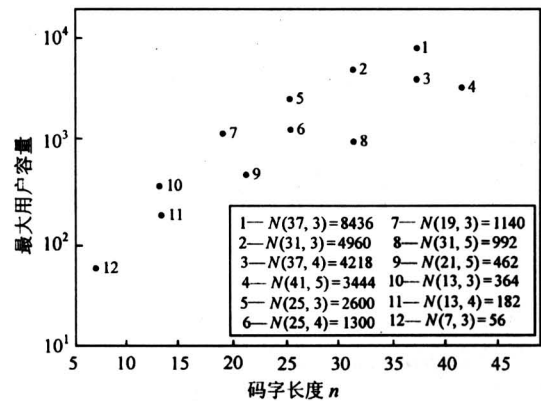


图 5 二维方阵码 OCDMA 系统的用户容量

Fig.5 KNumber of users of 2D-OOSC OCDMA

5 结论

OCDMA 技术实用化的关键问题在于光地址码的优良性能。从不断改进的一维光正交码出发,应用近代代数理论,把一维码拓展为二维矩阵码,提出了二维 $\lambda - t$ 光正交方阵码设计方案。围绕光码

分多址(OCDMA)技术实用化的两个主要指标——最大并发用户数和以多址干扰为主的误码率进行了较为详细的分析研究。结果表明,较之一维时域扩频码或一维谱域扩频码,2D-OOSC系统大大提高了码字容量,增加了系统在线用户容量。通过适当选择码长和码重,系统满足 10^{-9} 误码率要求的并发用户数高达200以上,总容量可达太量级。远大于目前一维光码OCDMA系统的600 Gb/s的理论上限。在传输距离不太远的局域网中,光纤色散引起的误码较小,基于2D-OOSC的OCDMA系统将会得到广泛应用。

参考文献

- [1] Ghafouri-Shiraz H, Shalaby H M H. Performance analysis of optical spectral-amplitude-coding CDMA systems using a super-fluorescent fiber source [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13(8): 887~889
- [2] Zhou X, Shalaby H M, Lu C, et al. Code for spectral amplitude coding optical CDMA systems [J]. Electron Lett, 2000, 36(6): 728~729
- [3] Huang J F, Hsu D Z. Fiber-grating-based optical CDMA spectral coding with nearly orthogonal M-sequence codes [J]. IEEE Photo Tech Letters, 2000, 12(9): 1252~1254
- [4] David M. Code-division multiple accesses: novel multiplexing strategy in optical fiber networks [A]. ICTON [C]. 2001. 299~303
- [5] Shaar A A, Davies P A. Prime sequences: quasi-optimal sequences for or channel code division multiplexing [J]. Electronics Letters, 1983, 9(21): 888~889
- [6] Fathallag H, Rusch L A, Larochelle S. Passive optical fast frequency hop CDMA communication system [J]. Journal of L Giftware Technology, 1999, 13(17): 397~405
- [7] Yang G C. Variable-weight optical orthogonal codes for CDMA networks with multiple performance requirements [J]. IEEE Trans on Comm, 1996, 44(1): 47~51
- [8] Kwong W C, Zhang J G, Yang G C. 2n prime-sequence code and its optical CDMA coding architecture [J]. Electronics Letters, 1994, 30(6): 509~510
- [9] Perrir P A, Prucnal P R. Wavelength-division integral-ton of code-division in fiber-optic system [J]. Int J Diginal Analog Cabled Syst, 1988, 1: 149~157
- [10] Yang, G C, Kwong C. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks [J]. IEEE Trans on Comm, 1997, 45(11): 1426~1436
- [11] Chung, F R K, Salehi J A, Wei V K. Optical orthogonal codes: design, analysis, and application [J]. IEEE Trans Inform Theory, 1989, 35(5): 595~604

Performance Optimization Analysis of 2D - OOSC Codeword for OCDMA System

Li Chuanqi, Sun Xiaohan, Zhang Mingde, Ding Dong

(Department of Electronic Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

[Abstract] The scheme of 2-dimensions optical orthogonal square codes (2D - OOSC) in optical code-division multiple-access (OCDMA) networks is given in this paper. The influence of coding parameters to the performance of the system is mainly discussed. It is proved that the relativity of the codeword satisfies the system requirement, and the system BER based on multiple user interference is ascertained. The results indicate that the number of simultaneous users that can be contained in this system will be much larger than that in the system with 1D - OOC under the same conditions, the total transmitting capacity of the system will reach the level of Tb/s, and the performance of 2D - OOSC system will be largely enhanced, especially under the heavy transmitting traffic.

[Key words] optical code division multiple access (OCDMA); 2-dimensions optical orthogonal square codes (2D - OOSC); multi-users interfering (MUI); based bit-error-ratio (BER)