

文章编号: 0258-7025(2008)12-1878-05

异步相干扩时光码分多址系统的干扰性能分析

吉建华 张立东 吴青 龚方平

(深圳大学信息工程学院, 广东 深圳 518060)

摘要 从码字的非周期互相关函数出发,分析异步相干扩时光码分多址(OCDMA)系统的多址干扰(MAI)和差拍噪声(BN)。干扰用户不同的传输时延,非周期互相关强度均值随之变化,差拍噪声和多址干扰也随之变化。给出了差拍噪声和多址干扰与非周期互相关强度均值的关系,讨论了异步相干扩时 OCDMA 系统的误码率(BER)与非周期互相关强度均值的关系。最后,以码长 511 的 Gold 码为例,针对干扰用户之间不同的传输时延,得到了异步相干扩时 OCDMA 系统的误码率上界与平均误码率性能。在平均误码率情况下,OCDMA 系统能支持 12 个干扰用户,而在最差情况下(误码率上界),系统容纳的干扰用户数不超过 4 个。

关键词 光通信;光码分多址;多址干扰;差拍噪声;非周期互相关函数

中图分类号 TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1878

Analysis of Interfering Performance in Coherent Time-Spreading Optical Code-Division Multiple Access System

Ji Jianhua Zhang Lidong Wu Qing Gong Fangping

(College of Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen, Guangdong 518060, China)

Abstract Multiple-access interference (MAI) and beat noise (BN) in coherent time-spreading optical code-division multiple access (OCDMA) system are analyzed according to aperiodic cross-correlation function. The mean intensity of aperiodic cross-correlation depends on the transit delay of interfering users, and MAI and BN will change with the mean intensity of aperiodic cross-correlation accordingly. The relationship between the mean intensity of aperiodic cross-correlation and MAI and BN is deduced, and then the relationship between the bit error rate (BER) and the mean intensity of aperiodic cross-correlation is discussed for coherent time-spreading OCDMA. For Gold sequence with the length $N=511$, mean and upper bound of BER performances are derived according to the different transit delay of the interfering users in coherent time-spreading OCDMA system. In the case of mean BER performance, OCDMA system can support about 12 interfering users. However, for the worst case (upper bound of BER), OCDMA system can support no more than 4 interfering users.

Key words optical communication; optical code-division multiple access; multiple-access interference; beat noise; aperiodic cross-correlation function

1 引言

光码分多址(OCDMA)结合了光纤的海量带宽和电 CDMA 的优点,具有高速的光信号处理、无延迟随机异步接入、网络控制简单、业务透明性好且安全可靠等特点,是未来宽带接入网的可选方案之一。按编码方式,OCDMA 分为相干和非相干 OCDMA 系统^[1]。非相干 OCDMA 包括时域强度编码、频域强度编码和时频域二维编码^[2~4],相干 OCDMA 包括相干频域编码^[5]和相干扩时编码^[6~11]。目前,随

着超结构光纤光栅和平面光路编解码器的发展,采用相干光源的相干扩时编码成为 OCDMA 的研究热点。

在相干扩时 OCDMA 系统中,影响系统性能的噪声包括多址干扰(MAI)、差拍噪声(BN)、散粒噪声和热噪声等。其中,不同用户之间的码字不完全正交将导致多址干扰,目标信号和干扰信号经过光电检测器时将导致差拍噪声。文献[12,13]分析了异步相干扩时 OCDMA 系统中的差拍噪声和多址

收稿日期:2008-03-24;收到修改稿日期:2008-05-22

基金项目:国家自然科学基金(60772027)资助项目。

作者简介:吉建华(1970—),男,江苏人,副教授,主要从事光通信方面的研究。E-mail:jjh@szu.edu.cn

干扰,结果表明,差拍噪声是相干扩时编码 OCDMA 系统的主要噪声。然而,在异步相干扩时 OCDMA 系统中,由于用户之间存在相对时延,目标用户的每个比特受到干扰用户相邻二个比特的干扰。因此,在异步相干扩时 OCDMA 系统中,必须考虑干扰用户相邻比特的互相关强度均值和方差,即干扰用户相邻比特导致的多址干扰和差拍噪声。本文从码字的非周期互相关函数值出发,分析异步相干扩时 OCDMA 系统的多址干扰和差拍噪声,得出差拍噪声和多址干扰与非周期互相关强度均值的关系。最后,以码长 511 的 Gold 码为例,针对用户之间不同的相对时延,得到了异步相干扩时 OCDMA 系统的误码率(BER)上界及平均误码率性能。

2 系统模型

如图 1 所示,对异步 OCDMA 系统,由于用户之间存在相对时延,目标用户的每个比特受到单个干扰用户二个相邻比特的干扰。假设异步 OCDMA 系统有 m 个干扰用户,则目标用户的每个比特受到

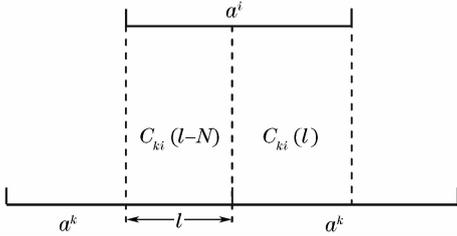


图 1 异步 OCDMA 系统的非周期互相关函数
Fig. 1 Aperiodic cross-correlation function of asynchronous OCDMA system

干扰用户 $2m$ 个相邻比特的干扰。

为了分析异步 OCDMA 系统性能,必须采用码字的非周期相关函数,如图 1 所示。设 $a_j^k (j = 0, 1, \dots, N-1)$ 为第 k 个用户的地址码,码长为 $N, a_j^k \in \{1, -1\}$, 定义码字的归一化非周期互相关函数^[14]:

$$C_{k,i}(l) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1-l} a_j^k \cdot a_{j+l}^i & 0 \leq l \leq N-1 \\ \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1+l} a_{j-l}^k \cdot a_j^i & 1-N \leq l < 0 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (1)$$

对于开关键控(OOK)调制,第 k 个用户的数据信号 $b_k(t)$ 表示为

$$b_k(t) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} b_{k,l} P_T(t-lT), \quad (2)$$

式中 $b_{k,l} \in \{0, 1\}, T$ 为数据比特周期, $0 \leq t < T$ 时 $P_T(t) = 1$ 。用户 k 的码字波形为

$$a_k(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} a_j^k P_{T_c}(t-jT_c), \quad (3)$$

式中 T_c 为切普间隔, $N = T/T_c$ 。所以,第 k 个用户的编码输出信号为

$$s_k(t) = \sqrt{P} a_k(t) \cdot b_k(t) \cdot \exp j[\omega_k t + \theta_k(t)], \quad (4)$$

式中 P 为编码输出信号光强, ω_k 为光信号频率, $\theta_k(t)$ 为相位噪声。

假设 OCDMA 系统共有 m 个干扰用户,每个用户的信号功率相同,则目标用户的接收光场为

$$s(t) = \sqrt{P} a_0(t) \cdot b_0(t) \cdot \exp j[\omega_0 t + \theta_0(t)] + \sum_{k=1}^m \sqrt{P} a_k(t - \tau_k) \cdot b_k(t - \tau_k) \cdot \exp j[\omega_k(t - \tau_k) + \theta_k(t - \tau_k)], \quad (5)$$

式中 τ_k 为第 k 个用户的相对传输时延,并假设切普同步,即 $\tau_k = l_k T_c, l_k$ 是一个整数,则解码器输出光信号为

$$E(t) = \sqrt{P} \{ b_{0,0} \exp j[\omega_0 t + \theta_0(t)] + \sum_{k=1}^m \{ b_{k,-1} C_{k,0}(l_k) \exp j[\omega_k(t + l_k T_c) + \theta_k(t + l_k T_c)] + \{ b_{k,0} C_{k,0}(l_k - N) \exp j[\omega_k(t + l_k T_c - T) + \theta_k(t + l_k T_c - T)] \} \} \} \quad (6)$$

式中 $b_{0,0}$ 为目标用户的当前数据比特, $b_{k,-1}$ 和 $b_{k,0}$ 分别为第 k 个干扰用户对应的两个相邻数据比特。对采用切普速率的光探测器的 OCDMA 系统,其输出为

$$Z = \int_0^{T_c} \mathcal{R} \cdot (E \cdot E^*) dt + \int_0^{T_c} n_0(t) dt = \mathcal{R} T_c P b_{0,0} + \mathcal{R} T_c P \sum_{k=1}^m [b_{k,-1} |C_{k,0}(l_k)|^2 + b_{k,0} |C_{k,0}(l_k - N)|^2] + B_1 + B_2 + \int_0^{T_c} n_0(t) dt, \quad (7)$$

式中 \mathcal{R} 为光检测器的响应度, $n_0(t)$ 为接收机噪声电流。(7) 式中第一项对应目标用户的数据信号,第二项对应干扰用户引起的多址干扰, B_1 对应干扰信号与用户信号之间的差拍噪声, B_2 对应干扰信号与干扰信号之

间的差拍噪声。

$$B_1 = 2\mathcal{R}P \sum_{k=1}^m b_{0,0} b_{k,-1} C_{k,0}(l_k) \int_0^{T_c} \cos[(\omega_0 - \omega_k)t - \omega_k l_k T_c + \theta_0(t) - \theta_k(t + l_k T_c)] dt +$$

$$2\mathcal{R}P \sum_{k=1}^m b_{0,0} b_{k,0} C_{k,0}(l_k - N) \int_0^{T_c} \cos[(\omega_0 - \omega_k)t - \omega_k(l_k T_c - T) + \theta_0(t) - \theta_k(t + l_k T_c - T)] dt, \quad (8)$$

式中 $\Delta\phi_{k1} = (\omega_0 - \omega_k)t - \omega_k l_k T_c + \theta_0(t) - \theta_k(t + l_k T_c)$ 和 $\Delta\phi_{k2} = (\omega_0 - \omega_k)t - \omega_k(l_k T_c - T) + \theta_0(t) - \theta_k(t + l_k T_c - T)$ 为总相位噪声,在积分间隔 T_c 内保持不变,而不同数据比特时在 $[-\pi, \pi]$ 范围内随机均匀变化,从而导致用户信号与干扰信号之间的差拍噪声。

$$B_2 = 2\mathcal{R}P \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=k+1}^m b_{k,-1} b_{j,-1} C_{k,0}(l_k) C_{j,0}(l_j) \times$$

$$\int_0^{T_c} \cos[(\omega_k - \omega_j)t - \omega_k l_k T_c + \omega_j l_j T_c + \theta_k(t + l_j T_c) - \theta_j(t + l_j T_c)] dt +$$

$$2\mathcal{R}P \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=k+1}^m b_{k,0} b_{j,0} C_{k,0}(l_k - N) C_{j,0}(l_j - N) \times$$

$$\int_0^{T_c} \cos[(\omega_k - \omega_j)t - \omega_k l_k T_c + \omega_j l_j T_c + \theta_k(t + l_j T_c - T) - \theta_j(t + l_j T_c - T)] dt +$$

$$2\mathcal{R}P \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^m b_{k,-1} b_{j,0} C_{k,0}(l_k) C_{j,0}(l_j - N) \times$$

$$\int_0^{T_c} \cos[(\omega_k - \omega_j)t - \omega_k l_k T_c + \omega_j(l_j T_c - T) + \theta_k(t + l_j T_c) - \theta_j(t + l_j T_c - T)] dt, \quad (9)$$

式中的相位噪声如(8)式所述,对于采用 Gold 序列的相干 OCDMA 系统,由于 $|C_{k,0}(l_k)| \ll 1$, 干扰信号与干扰信号之间的差拍噪声相对较小。

3 性能分析

考虑所有用户等概率地发送数据比特“0”和“1”。对于给定的干扰用户传输时延 l_1, l_2, \dots, l_m , 当目标用户发送数据“1”时(即 $b_{0,0} = 1$), 检测器的输出均值为

$$Z_1 = \mathcal{R}T_c P \left\{ 1 + \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m [|C_{k,0}(l_k)|^2 + |C_{k,0}(l_k - N)|^2] \right\}, \quad (10)$$

此时,忽略干扰信号与干扰信号之间的差拍噪声,即考虑用户信号与干扰信号之间的差拍噪声,根据(8)式,检测器的差拍噪声为

$$\sigma_{b1}^2 \approx \mathcal{R}^2 P^2 T_c^2 \sum_{k=1}^m \{ [|C_{k,0}(l_k)|^2 + |C_{k,0}(l_k - N)|^2] \}, \quad (11)$$

同理,当目标用户发送数据“0”时(即 $b_{0,0} = 0$), 输出均值为

$$Z_0 = \mathcal{R}T_c P \left\{ \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m [|C_{k,0}(l_k)|^2 + |C_{k,0}(l_k - N)|^2] \right\}, \quad (12)$$

此时,只存在干扰信号与干扰信号之间的差拍噪声,根据(9)式,当 m 较大时,差拍噪声为

$$\sigma_{b0}^2 \approx \frac{1}{2} \mathcal{R}^2 P^2 T_c^2 \sum_{k=1}^{m-1} \sum_{j=k+1}^m \{ [|C_{k,0}(l_k)|^2 + |C_{k,0}(l_k - N)|^2] \times [|C_{j,0}(l_j)|^2 + |C_{j,0}(l_j - N)|^2] \}. \quad (13)$$

在相对延时 l_k , 定义两个码字的非周期互相关强度均值 $\psi_{k,0}(l_k)$ 为

$$\psi_{k,0}(l_k) = \frac{1}{2} [|C_{k,0}(l_k)|^2 + |C_{k,0}(l_k - N)|^2]. \quad (14)$$

从(10) ~ (13) 式可以看出,干扰用户的不同传输时延 l_1, l_2, \dots, l_m , 码字的非周期互相关强度均值随之变化,目标用户接收机输出信号的均值和方差也随之变化。

采用 Gold 码的相干扩时 OCDMA 系统, 当干扰用户数较多时, 多址干扰的方差为

$$\sigma_{\text{MAI}}^2 = m\mathcal{R}^2 P^2 T_c^2 \sigma_{\text{MAI-0}}^2, \quad (15)$$

式中 $\sigma_{\text{MAI-0}}^2$ 为单个多址干扰信号的归一化方差^[1], 对于码长为 $(2^L - 1)$ 的 Gold 码, $\sigma_{\text{MAI-0}}^2 \approx (2^{2L} + 2^{L+2}) / (2^L - 1)^4$ 。显然, 码长越大, 归一化方差 $\sigma_{\text{MAI-0}}^2$ 越小, 对于码长 127 的 Gold 码, $\sigma_{\text{MAI-0}}^2 \approx 6.5 \times 10^{-5}$, 对于码长 511 的 Gold 码, $\sigma_{\text{MAI-0}}^2 \approx 3.88 \times 10^{-6}$ 。

在相干扩时 OCDMA 系统中, 主要的噪声是差拍噪声和多址干扰。为了分析方便, 忽略其他噪声的影响, 则发送比特“0”和“1”的噪声方差分别为

$$\sigma_0^2 = \sigma_{b0}^2 + \sigma_{\text{MAI}}^2, \quad \sigma_1^2 = \sigma_{b1}^2 + \sigma_{\text{MAI}}^2. \quad (16)$$

在异步 OCDMA 系统中, 有必要估计 OCDMA 系统的最差性能, 考虑两个码字在不同延时的非周期互相关强度均值, 并取其中的最大值(对应噪声最大值)

$$\lambda_{k0} = \max_{l_k=0,1,\dots,N-1} [\psi_{k,0}(l_k)], \quad (17)$$

对长度 $N=511$ 的 Gold 码数值仿真计算, 不同码字之间的 λ_{k0} 不完全相等, 取 $\lambda_{k0} \approx 5/(2N)$ (码长不同的 Gold 码, λ_{k0} 取值与此式不同), 则

$$\begin{aligned} Z_1 &= \mathcal{R}T_c P \left(1 + \frac{5m}{2N}\right), \\ \sigma_{b1}^2 &= \frac{5m\mathcal{R}^2 P^2 T_c^2}{N}, \\ Z_0 &= \frac{5m\mathcal{R}T_c P}{2N}, \\ \sigma_{b0}^2 &= \frac{25 \times m(m-1)\mathcal{R}^2 P^2 T_c^2}{4N^2}. \end{aligned} \quad (18)$$

假设采用时间门控的切普接收机, 并等概率发送数据“0”和“1”, 则 OCDMA 系统的误码率为

$$\text{BER}(m) = \frac{1}{2} [p(1/0) + p(0/1)], \quad (19)$$

式中 $p(0/1)$ 为发送“1”时的误判概率, $p(1/0)$ 为发送“0”的误判概率, 分别为

$$\begin{aligned} p(1/0) &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Th - Z_0}{\sqrt{2}\sigma_0}\right), \\ p(0/1) &= \frac{1}{2} \text{erfc}\left(\frac{Z_1 - Th}{\sqrt{2}\sigma_1}\right), \end{aligned} \quad (20)$$

式中 Th 为接收机的判决门限, 取 $Th = \frac{\sigma_1 Z_0 + \sigma_0 Z_1}{\sigma_0 + \sigma_1}$, $\text{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt$ 为互补误差函数。根据(18)~(20)式, 可得到采用 $N=511$ 的 Gold 码时, 扩时相干 OCDMA 系统的误码率上界。

假设用户之间的相对时延 l_1, l_2, \dots, l_m 为相互独立的随机变量, 则接收机输出信号的均值和方差

也是随机变量。为了分析系统的平均误码率性能, 考虑不同延时的非周期互相关强度均值, 取其平均值(对应平均噪声值)

$$\xi_{k0} = \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} [\psi_{k,0}(l)], \quad (21)$$

经数值仿真计算, 对长度 $N=511$ 的 Gold 序列, $\xi_{k0} \approx 1/(2N)$, 因此

$$\begin{aligned} Z_1 &= \mathcal{R}T_c P \left(1 + \frac{m}{2N}\right), \\ \sigma_{b1}^2 &= \frac{m\mathcal{R}^2 P^2 T_c^2}{N}, \\ Z_0 &= \frac{m\mathcal{R}T_c P}{2N}, \\ \sigma_{b0}^2 &= \frac{m(m-1)\mathcal{R}^2 P^2 T_c^2}{4N^2}. \end{aligned} \quad (22)$$

根据(22)式, 可得到采用 $N=511$ 的 Gold 码时, 相干扩时 OCDMA 系统的平均误码率。可以看出, OCDMA 系统的平均误码率和误码率上界, 都取决于码长和干扰用户数。随着码长增加, 多址干扰和差拍噪声就越小, 误码率就越低。

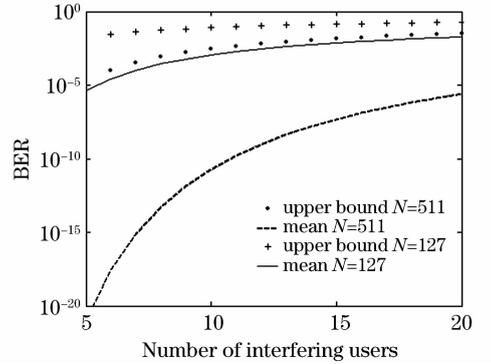


图2 相干扩时 OCDMA 系统的误码率与干扰用户数的关系

Fig. 2 BER of coherent time-spreading OCDMA system versus the number of interfering users

图2是异步相干扩时 OCDMA 系统的误码率与干扰用户数的关系, 分别采用码长 127 和 511 的 Gold 码。由图2可见, 在平均误码率性能的情况下, 511 Gold 码的 OCDMA 系统可以同时容纳 12 个干扰用户 ($\text{BER} < 10^{-9}$)。在某个特定的传输时延下, 用户的差拍噪声和多址干扰达到最大值, 即达到误码率上界, 此时系统能容纳的干扰用户不超过 4 个。当采用码长 127 的 Gold 码时, 无论是平均误码率还是误码率上界, 都将明显增大。因此, 如果需要提高 OCDMA 系统容量, 增加码长是一种有效的方法。另一种提高用户数的方案是采用同步 OCDMA 系统(可采用完全正交的 Wash 码), 但需要实现切

普同步(皮秒级),不易实现。对于异步相干扩时 OCDMA 系统,要在码长相同的情况下提高用户数,必须降低码字的非周期互相关强度均值,一方面,可以对传统的双极性码进行优化,另一方面,根据码字的非周期互相关强度均值条件,进行计算机搜索。需要说明的是,如果再考虑散粒噪声、热噪声和暗电流等其他噪声,异步相干扩时 OCDMA 系统的误码率性能将进一步恶化,支持的并发用户数将进一步降低。

4 结 论

给出了异步相干扩时 OCDMA 系统的互相关强度均值,得出差拍噪声和多址干扰与非周期互相关强度均值的关系。干扰用户不同的传输时延,非周期互相关强度均值随之变化,差拍噪声和多址干扰也随之变化。针对用户之间不同的传输时延,得到了相干扩时 OCDMA 系统的误码率上界及平均误码率性能。以码长 511 的 Gold 码为例,在平均误码率性能的情况下,系统可以同时容纳 12 个干扰用户($BER < 10^{-9}$);在达到误码率上界的最差性能时,系统能容纳的干扰用户不超过 4 个。如果需要进一步提高系统容量,则需要增加码长。

参 考 文 献

- 1 Wang Xu, Wang Xuhua, Sun Yanbin *et al.*. Recent progress of OCDMA networks and related devices [J]. *Semiconductor Optoelectronics*, 2007, **28**(2):451~457
王 旭,王旭华,孙燕斌等. OCDMA 系统和相关器件进展[J]. *半导体光电*, 2007, **28**(2):451~457
- 2 J. A. Salehi. Code division multiple-access techniques in optical fiber networks I. Fundamental principles [J]. *IEEE Transactions on Communications*, 1989, **37**(8):824~833
- 3 Ji Jianhua, Xu Ming, Yang Shuwen *et al.*. Experiment on 2.5

- Gbit/s symbol overlapping optical fast frequency-hopping code division multiple access system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(6):779~782
吉建华,徐 铭,杨淑雯等. 2.5 Gbit/s 码位重叠快跳频光码分多址实验系统[J]. *中国激光*, 2006, **33**(6):779~782
- 4 Shengpeng Wan, Yu Hu. Two-dimensional optical CDMA differential system with prime/OOC codes [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2001, **13**(12):1373~1375
- 5 Thomas H. Shake. Confidentiality performance of spectral-phase encoded optical CDMA [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4):1652~1663
- 6 Ken-ichi Kitayama, Xu Wang, Naoya Wada. OCDMA over WDM PON-solution path to gigabit-symmetric FTTH [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(4):1654~1662
- 7 Xu Wang, Naoya Wada, Tetsuya Miyazaki *et al.*. Coherent OCDMA system using DPSK data format with balanced detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2006, **18**(7):826~828
- 8 Xu Wang. 10-user, truly-asynchronous OCDMA experiment with 511-chip SSFBG en/decoder and SC-based optical threshold [C]. *OFC2005, PDP33*
- 9 Pu Tao, Wang Rong, Li Yuquan. Non-Gaussian approximation method for phase encoding optical code division multi-access system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(1):10~14
蒲 涛,王 荣,李玉权. 相位编码光码分多址系统中的非高斯分析方法[J]. *光学学报*, 2007, **27**(1):10~14
- 10 Yan Meng, Yao Minyu, Zhang Hongming *et al.*. OCDMA encoding/ decoding experiments based on superstructured fiber Bragg grating with equivalent phase shift [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):221~224
燕 萌,姚敏玉,张洪明等. 基于等效相移光栅的光码分多址编/解码实验[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):221~224
- 11 Yitang Dai, Xiangfei Chen, Yu Yao *et al.*. 511-chip,500Gchip/s OCDMA en/decoders based on equivalent phase-shift method [C]. *OFC2006, OFF2*
- 12 Xu Wang, Ken-ichi Kitayama. Analysis of beat noise in coherent and incoherent time-spreading OCDMA [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2004, **22**(10):2226~2234
- 13 Tao Pu, Hanyi Zhang, Yili Guo *et al.*. Evaluation of beat noise in OCDMA system with non-Gaussian approximated method [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2006, **24**(10):3574~3581
- 14 Michael B. Pursley. Performance evaluation for phase-coded spread-spectrum multiple-access communication-Part1: system analysis [J]. *IEEE Transaction on Communication*, 1977, **25**(8):795~799