

文章编号: 0258-7025(2006)06-0783-05

二维大气无线光码分多址通信系统

谭庆贵, 胡渝

(电子科技大学物理电子学院, 四川 成都 610054)

摘要 在无线光通信系统中采用光码分多址(OCDMA)技术,可以充分利用其丰富带宽,提高系统性能。考虑背景光噪声、探测器噪声、多用户干扰和大气闪烁等影响因素,给出了二维无线光码分多址(2D-WOCDMA)系统模型,在该模型中采用了脉冲位置调制(PPM)和光纤布拉格光栅(FBG)编解码器。通过数值分析,详细讨论了该无线光通信系统的性能。结果表明,大气闪烁是影响二维无线光码分多址通信系统性能的重要因素,当其对数方差较大时,系统难以实现通信,需要采用诸如多用户检测、信道编码及阵列接收等技术提高系统的性能;二维无线光码分多址通信系统适合采用1550 nm波段;该通信系统还受背景光、雪崩光电二极管(APD)增益和调制消光比等因素的影响。

关键词 光通信;光码分多址;大气闪烁;脉冲位置调制

中图分类号 TN 929.12 **文献标识码** A

Atmospheric 2D-Wireless Optical Code Division Multiple Access Communication System

TAN Qing-gui, HU Yu

(Institute of Physical Electronics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu, Sichuan 610054, China)

Abstract Code division multiple access (CDMA) can be adopted to make full use of the broad bandwidth and effectively improve the system performance of wireless optical communication system. Considering the effects of background optical noise, multi-user interference, avalanche photodiode detector (APD) noise, and atmospheric scintillation, the system model of atmospheric two-dimensional wireless optical code division multiple access (2D-WOCDMA) communication system with pulse position modulation (PPM) and fiber Bragg grating (FBG) encoder/decoder is presented. And the bit error rate (BER) of this optical CDMA communication system is analyzed in detail. The results show that atmospheric scintillation is one of the important factors which affect the BER performance of this communication system, and the 1550 nm wave band is more suitable for this 2D-WOCDMA communication system. When the atmospheric turbulence is strong ($\sigma_s^2 \geq 0.2$), some new technologies, such as multi-user detection, channel coding and array reception, can be used to improve the system performance. The results also show that the performance of this communication system can be affected by background optical, APD gain and modulation extinction ratio.

Key words optical communication; optical code division multiple access; atmospheric scintillation; pulse position modulation

1 引言

随着无线光宽带接入技术的发展,无线光码分多址(WOCDMA)技术由于具有网络协议简单、可以随机接入、适于突发通信等特点,得到了快速发展^[1~3]。在这些无线光码分多址通信系统中,地址

码主要采用一维光正交码,光源为800 nm波段的半导体激光器。光正交码虽然具有良好的自相关和互相关特性,但只能提供较少的码容量。在诸多不同类型的地址码中^[4~6],由一维光正交码扩展得到的二维光正交码可在频域和时域实现二维编码,具有较好的性能^[5],而且易于由光纤布拉格光栅(FBG)

收稿日期:2005-07-11;收到修改稿日期:2006-01-11

基金项目:国家自然科学基金(60272006)资助项目。

作者简介:谭庆贵(1975—),男,山东人,电子科技大学博士研究生,主要从事无线光通信与光码分多址技术的研究。

E-mail: uestctqg@163.com

编解码器实现^[7,8]。本文将无线光码分多址通信系统从一维扩展到二维,给出二维无线光码分多址(2D-WOCDMA)系统模型,并详细分析该通信系统的性能。

2 系统方案

二维无线光码分多址通信系统容易受到较强的背景光和大气湍流的影响,是一种功率受限系统,适合采用不需要阈值判决和功率利用率高的脉冲位置调制(PPM)方式。该系统主要由宽谱光源、光纤布拉格光栅编解码器、脉冲位置调制解调器、铌酸锂(LiNbO₃)调制器、收发天线、雪崩光电二极管(APD)探测器和判决模块组成。光纤布拉格光栅编解码器是一种相位元件,可以由紫外光在特制的光纤上刻蚀出的光栅阵列组成。每个光栅反射特定频率的波长,起到选频作用,光栅之间的不同排列顺序确定二维地址码的频域信息,光栅之间的不同距离确定二维地址码的时域信息。

图1给出二维无线光码分多址通信系统的原理框图。在发射端(图1(a)),每个发射用户的数字信号首先经脉冲位置调制器调制后送入铌酸锂调制器,将脉冲位置调制格式的电信号调制为光脉冲信号,然后将这些光脉冲信号送入光纤布拉格光栅编解码器进行编码,得到携带地址码信息的扩展光脉冲序列。最后将N路扩展的光脉冲序列合为一路,由发射天线送入大气信道。在接收端(图1(b)),首先将接收天线接收到的光脉冲信号耦合到单模光纤,然后均分为N路。对于每一路信号,经光解码器解码后恢复出编码前的光脉冲信号,最后经雪崩光电

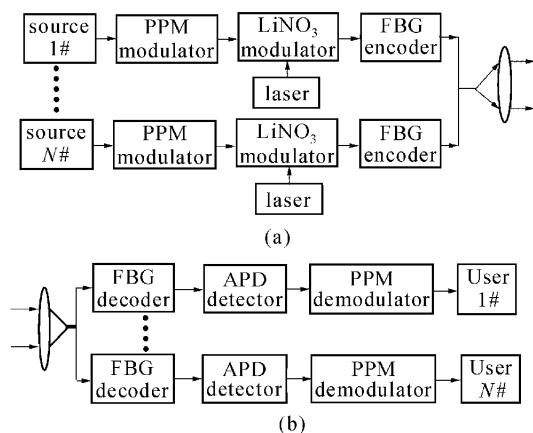


图1 二维无线光码分多址系统原理框图

(a) 发射系统; (b) 接收系统

Fig. 1 Block diagram of 2D-WOCDMA system

(a) transmitting system; (b) receiving system

二极管探测器探测和脉冲位置解调器解调,恢复出有用信号。

3 系统模型

3.1 大气信道模型

大气信道是一种随机信道,二维无线光码分多址通信系统容易受到较强的背景光影响;大气信道中还存在大气闪烁效应,会引起接收端面上的光强闪烁,从而影响该通信系统的通信性能。

在弱湍流条件下,大气闪烁是一个平稳随机过程,满足对数正态分布。设 $X(t)$ 为大气闪烁引起的光强闪烁,其概率密度函数 $p(X)$ 表示为^[2]

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_s^2}X} \exp\left\{-\frac{[\ln X + (\sigma_s^2/2)]^2}{2\sigma_s^2}\right\}, \quad (1)$$

其中 X 为归一化均值, σ_s^2 为 X 的对数方差。

3.2 二维码的碰撞概率

对于码长为 F ,码重为 K 的二维多波长光正交码(自相关和互相关值为1),两个码字之间的平均碰撞概率 \bar{q} 为^[5]: $\bar{q} \approx K^2/2F^2$ 。对于采用脉冲位置调制的光码分多址(OCDMA)系统,假设用户数为 N ,第1个用户是期望用户, a_j^1 和 a_j^u 为期望用户和干扰用户的码序列,那么这两个地址码之间的平均碰撞概率可以表示为

$$P_I = \frac{1}{M} E\left\{\sum_{j=1}^F \sum_{n=2}^N a_j^1 a_{j \oplus U}^n\right\} = \frac{K^2}{MF^2}, \quad (2)$$

这里符号 $E\{\}$ 表示求均值, \oplus 表示模 F 加, U 表示一个移位变量, M 为脉冲位置调制帧中时隙的个数。

3.3 光通信系统模型

对于采用脉冲位置调制信号格式的数字光通信系统,误码率 P_B 和误字率 P_e 之间的关系为^[2]

$$P_B \leq \frac{M}{2(M-1)} P_e. \quad (3)$$

定义第 i 个脉冲位置调制时隙的解相关输出为 Y_i , $P\{i\}$ 为第 i 个码字出现的概率, $P[e|i]$ 为在第 i 个时隙上相关解扩输出后的误判概率,那么 P_e 的一致限表示为^[2]

$$P_e = \sum_{i=0}^{M-1} P[e|i]P\{i\} \leq \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pr\{Y_j \geq Y_i | i\}P\{i\} \leq$$

$$(M-1) \sum_{\kappa_d} \binom{N-1}{|\kappa_d|} (P_I)^{|\kappa_d|} (1-P_I)^{N-1-|\kappa_d|} \times$$

$$\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \kappa_0 = \vec{0}, \kappa_d\}, \quad (4)$$

其中 κ_d 表示对第 d 个脉冲位置调制时隙的干扰向

量, $|\mathbf{k}_d|$ 为向量 \mathbf{k}_d 中“1”的个数。

对于雪崩光电二极管探测器, 其输出可以作高斯近似^[2], 从而有

$$\begin{aligned} \Pr\{Y_d \geq Y_0 \mid 0, \mathbf{k}_0 = \vec{0}, \mathbf{k}_d\} = & \int_0^\infty p(X_0) \cdots \int_0^\infty p(X_{N-1}) \times \\ & \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d^2(\mathbf{X})}} e^{-[x-\mu_d(\mathbf{X})]^2/2\sigma_d^2(\mathbf{X})} \times \\ & \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2(\mathbf{X})}} e^{-[y-\mu_0(\mathbf{X})]^2/2\sigma_0^2(\mathbf{X})} \times \\ & dy dx dX_0 dX_1 \cdots dX_{N-1}, \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $\mathbf{X} = (X_0, X_1, \dots, X_{N-1})$, X_i 代表第 i 个用户的强度闪烁。 μ_d, μ_0, σ_d^2 和 σ_0^2 分别为 Y_d 和 Y_0 的均值和方差, 具体计算表示为

$$\begin{aligned} \mu_d(\mathbf{X}) = GT_c \{ & \sum_{i=1}^{N-1} L_d(i) X_i \lambda_{s,i} + KX_0 \lambda_{s,0} / M_e + \\ & \sum_{i=1}^{N-1} [K - L_d(i)] X_i \lambda_{s,i} / M_e + \\ & K\lambda_b + I_b/e \} + T_c I_s / e, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \mu_0(\mathbf{X}) = GT_c \{ & KX_0 \lambda_{s,0} + \\ & \sum_{i=1}^{N-1} [K - L_d(i)] X_i \lambda_{s,i} / M_e + \\ & K\lambda_b + I_b/e \} + T_c I_s / e, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \sigma_d^2(\mathbf{X}) = G^2 F_e T_c \{ & \sum_{i=1}^{N-1} L_d(i) X_i \lambda_{s,i} + KX_0 \lambda_{s,0} / M_e + \\ & \sum_{i=1}^{N-1} [K - L_d(i)] X_i \lambda_{s,i} / M_e + \\ & K\lambda_d + I_b/e \} + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \sigma_0^2(\mathbf{X}) = G^2 F_e T_c \{ & KX_0 \lambda_{s,0} + \\ & \sum_{i=1}^{N-1} [K - L_d(i)] X_i \lambda_{s,i} / M_e + \\ & K\lambda_b + I_b/e \} + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2, \end{aligned} \quad (9)$$

(6) ~ (9) 式中 T_c 为码片周期; $L_d(i)$ 为用户 d 对期望用户的第 i 时隙产生的干扰, 其取值为“1”或“0”; M_e 为消光因子; λ_b 为背景光吸收率; G 为雪崩光电二极管增益; I_s 为雪崩光电二极管的面漏电流; I_b 为雪崩光电二极管的体漏电流; F_e 为附加噪声因子; $\lambda_{s,i}$ 为第 i 个用户的光子吸收率; σ_{th} 为接收机的热噪声方差。

4 数值分析

根据得到的系统模型, 设系统采用码长为 57, 码重为 8 的二维光正交码, 与雪崩光电二极管接收机有关的参数由文献^[2]给出。

假定码速率 R_b 为 155 Mbit/s, 背景光 P_b 为

-45 dBm, 采用 1550 nm 波段的宽谱光源。图 2 给出了 σ_s^2 取不同值时, 4-ary 脉冲位置调制系统中误码率 (BER) 随接收光功率 P_s 的变化关系。从图中可以看出, 当 σ_s^2 较小时 ($\sigma_s^2 \leq 0.15$), 系统可以实现通信; 当 σ_s^2 较大时 ($\sigma_s^2 \geq 0.2$), 系统误码率随接收光功率的增大而降低, 但当接收光功率达到一定值后系统误码率变化很小, 难以满足二维无线光码分多址通信系统对误码率性能的要求。这说明, 当大气闪烁较强时, 只通过增大有限的接收光功率难以实现通信, 可以采用信道编码、多用户检测技术或阵列接收技术来提高系统性能^[9~11]。

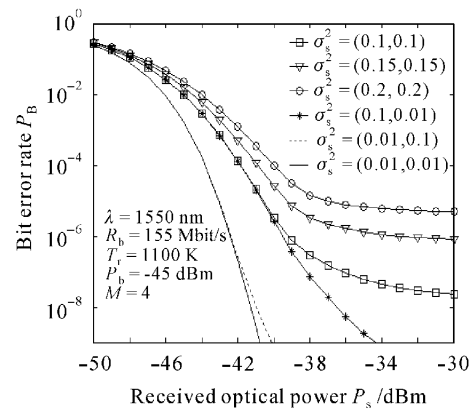


图 2 σ_s^2 为不同值时系统误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 2 BER versus received optical power with different σ_s^2

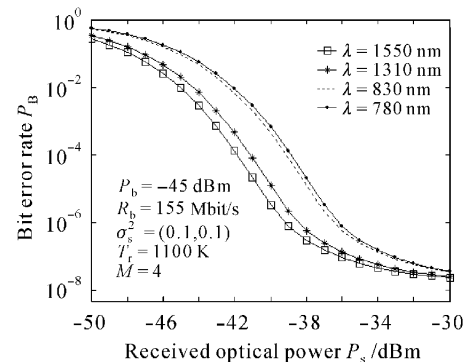


图 3 波长不同时系统误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 3 BER versus received optical power with different wavelength

对于采用不同波长的二维无线光码分多址通信系统, 由于受光子吸收率的影响, 系统误码率性能存在一定的差异。图 3 给出了 σ_s^2 为 0.1 的条件下, 采用不同波长的二维无线光码分多址系统的误码率和接收光功率之间的关系曲线。从图中可以看出, 在

相同的系统条件下,与800 nm波段相比,1550 nm波段具有一定的优势。随着波分复用技术和光放大技术的发展,1550 nm波段在二维无线光码分多址通信系统中具有广阔的应用前景。

对于不同码速率的二维无线光码分多址通信系统,图4给出了 $\sigma_s^2 = 0.1$ 时系统中误码率随接收光功率的变化关系。从图中可以看出,如果使系统误码率大于 10^{-6} ,码速率为155 Mbit/s的通信系统需要的最小接收光功率为-39.5 dBm,而对于码速率1.28 Gbit/s的通信系统,需要的最小接收光功率却增大到-32.5 dBm。所以在设计二维无线光码分多址通信系统时,要尽量保持较大的接收光功率,当接收光功率较小时,可适当降低码速率。

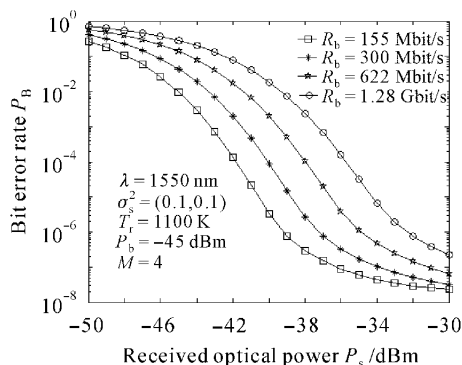


图4 不同码速率下系统误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 4 BER versus received optical power with different bit rates

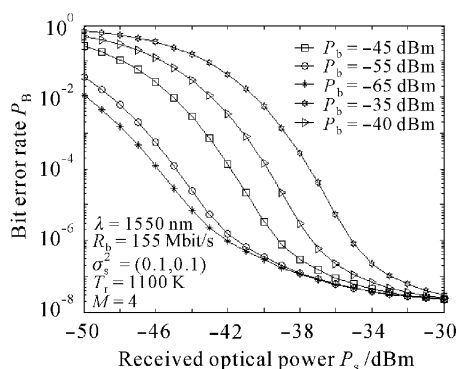


图5 背景光为不同值时误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 5 BER versus received optical power with different background optical power

在二维无线光码分多址通信系统中,背景光也是影响系统误码率性能的一个重要因素,从图5可以看出,背景光较强时系统性能明显恶化,背景光为-65 dBm时接收光功率只需要-42 dBm,而当背

景光增大到-35 dBm时,最小接收光功率变为-35 dBm。由仿真结果还可以看出,当背景光减小到一定值时(-65 dBm),它不再是影响系统性能的主要因素。

图6和图7分别给出了雪崩光电二极管增益 G 和调制消光比 M 。对二维无线光码分多址系统性能的影响。从图6可以看出,考虑雪崩光电二极管附加噪声因子、大气湍流和雪崩光电二极管输出近似模型等因素的影响,当雪崩光电二极管增益大于50时,通过增大雪崩光电二极管增益难以有效提高系统误码率性能,但当雪崩光电二极管增益小于20时,雪崩光电二极管的变化是影响系统误码率性能的一个重要因素。从图7可以看出,当调制消光比大于15时,其变化对系统误码率性能的影响不再起主要作用,某些情况下可以不予考虑。但当调制消光比小于15时,其变化对系统误码率性能具有很明显的影响。因此在选择探测器时,尽量选择增益适

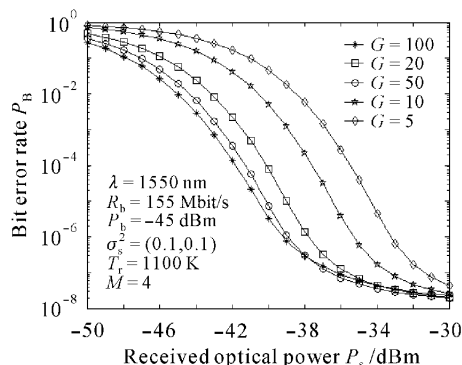


图6 雪崩光电二极管增益为不同值时系统误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 6 BER versus received optical power with different values of APD gain G

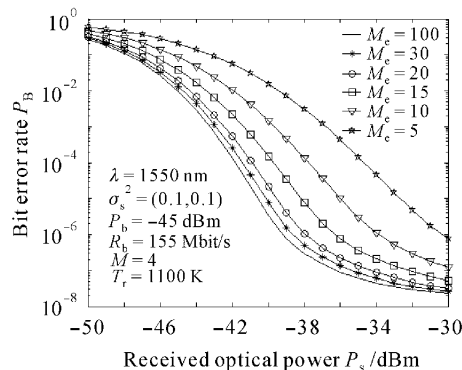


图7 调制消光比为不同值时系统误码率随接收光功率的变化关系

Fig. 7 BER versus received optical power with different modulation extinction ratio

中、工程上可以实现的雪崩光电二极管探测器。在设计系统的消光比时,将消光比设为 20 倍就可以满足系统要求,而不需要选择很大的调制消光比,增加工程实现难度。

5 结 论

提出了二维无线光码分多址系统方案,结果表明,1550 nm 波段在二维无线光码分多址通信系统中具有一定的优势。大气闪烁是影响二维无线光码分多址通信系统误码率性能的一个重要因素,当背景光较强时,系统性能明显下降。在设计二维无线光码分多址通信系统时,要充分考虑大气闪烁、背景光、码速率、通信波长等对系统性能的影响,在选择探测器和设计系统的调制消光比时,还要结合系统需求和工程可实现情况,选择合适的参数。

参 考 文 献

- 1 R. M. Gagliardi. Pulse-coded multiple access in space optical communications [J]. *J. Sel. Areas in Commun.*, *IEEE*, 1995, **13**(3):603~608
- 2 T. Ohtsuki. Performance analysis of atmospheric optical PPM CDMA systems [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(2):406~411
- 3 K. Sayano, I. N. guyen, J. K. Chan. Demonstration of multi-channel optical CDMA for free space communications [C]. *SPIE*, 2001, **4272**:38~49
- 4 Wan Shengpeng, He Sailing, Hu Yu. Address code and interference estimate receiver of 2D-OCDMA [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7):942~947
- 5 万生鹏,何赛灵,胡 渝. 二维光码分多址的地址码及干扰估计接收机[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7):942~947
- 6 Guu-Chang Yang, W. C. Kwong. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks [J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 1997, **45**(11):1426~1434
- 7 Chengbin Shen, Chen Wu, Jinhua Yu *et al.*. A novel symbol overlapping FFH-OCDMA system [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2004, **2**(2):78~81
- 8 L. R. Chen. Technologies for hybrid wavelength/time optical CDMA transmission [C]. *Electrical and Computer Engineering*, May 2001, Canadian Conference, 1 (13~16):0435~0440
- 9 Fu Xiaomei, Yu Jinlong, Li Enbang *et al.*. The study of time/frequency encoding optical code division multi-access communication with Bragg grating arrays [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(7):961~964
- 10 付晓梅,于晋龙,李恩邦等. 利用布拉格光栅阵列实现二维光码分多址的研究[J]. *光学学报*, 2004, **24**(7):961~964
- 11 A. S. Motahari, M. Nasiri-Kenari. Multiuser detections for optical CDMA networks based on expectation maximization algorithm [J]. *IEEE Transactions on Commun.*, 2004, **52**(4):652~660
- 12 Jin Young Kim, H. V. Poor. Turbo-coded optical direct detection CDMA system with PPM modulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2001, **19**(3):312~323
- 13 V. Vilnrotter, C.-W. Lau, M. Srinivasan *et al.*. Optical array receiver for communication through atmospheric turbulence [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(4):1664~1675