

文章编号: 1002-2082(2006)01-0005-04

# 大气闪烁对无线光CDMA 通信系统性能的影响

谭庆贵, 胡 渝, 周秀丽

(电子科技大学 物理电子学院, 四川 成都 610054)

**摘要:** 将光CDMA 技术应用到无线光通信中。提出了基于脉冲位置调制的二维大气无线光CDMA 通信系统,并分析了该通信系统的性能。考虑多用户干扰、APD 噪声以及热噪声等干扰因素的影响,采用数值分析的方法,详细分析了大气湍流引起的大气闪烁对二维无线光CDMA 通信系统误码率的影响。结果表明,大气闪烁是影响二维无线光CDMA 系统误码率性能的一个重要因素;当大气闪烁的对数方差较小(如 $\sigma_s^2=0.1$ )时,该系统可以实现高速率通信;当大气闪烁的对数方差较大( $\sigma_s^2 \geq 0.2$ )时,在有限的光功率条件下,该系统难以实现通信,需要采用信道编码技术来提高系统的误码率性能。

**关键词:** 无线光通信;光码分多址;大气闪烁;脉冲脉位调制

中图分类号: TN929

文献标识码: A

## Influence of atmospheric scintillation on performance of wireless optical CDMA system

TAN Qing-gui, HU Yu, ZHOU Xiu-li

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

**Abstract:** Two dimensional atmosphere wireless optical CDMA communication system with M-ary PPM(pulse position modulation)signal format is presented and studied. With the factors of multi-user interference, avalanche photodiode (APD) noise and thermal noise taken into account, the influence of atmospheric scintillation on the bit error rate(BER) of two dimensional wireless optical CDMA communication system was analyzed in detail. The results indicate that the atmospheric scintillation is an important factor for the bit error rate of two dimensional wireless optical CDMA systems. High speed communication can be realized in wireless optical CDMA systems if the logarithm variance of the scintillation is small enough (for example,  $\sigma_s^2 = 0.1$ ). Otherwise, if the logarithm variance is too big ( $\sigma_s^2 \geq 0.2$ ), it will be difficult to communicate with limited receiving power. In this case, some improving methods, such as channel coding technology, need to be used to improve the BER performance of 2D optical CDMA communication system.

**Key words:** wireless optical communication; optical CDMA; atmospheric scintillation; pulse position modulation

## 引言

无线光通信不受电磁波等干扰噪声的影响,可

以实现高速率通信,其通信系统体积小、易于组建和可移动性好,在组建无线光城域网和宽带无线接

收稿日期: 2005-01-25; 修回日期: 2005-08-26

基金项目: 国家自然科学基金资助(60272006)

作者简介: 谭庆贵(1975—),男,山东沂水人,电子科技大学博士研究生,主要从事无线光通信和光CDMA 技术的研究。

入网方面具有广阔应用前景。由于光CDMA 技术不仅可以充分利用无线光通信的带宽提高系统的容量,而且具有保密、软容量、适于突发通信和易于组建全光网络等特点,在城域无线光局域网和宽带无线光接入网中具有很好的应用价值,引起了人们的广泛关注,得到了快速发展<sup>[1-5]</sup>。在基于强度调制/直接探测(IM/DD)的大气无线光CDMA 通信系统中,由于存在大气闪烁,在接收端面上接收到的光信号起伏不定,从而影响系统的通信性能。本文基于二维光正交码,提出了基于PPM 信号格式的二维无线光CDMA 通信系统,并考虑了多用户干扰、APD 噪声和热噪声,详细分析了大气闪烁对二维无线光CDMA 通信系统的影响。

### 1 信道模型

在大气无线光CDMA 通信系统中,当通信距离在几千米以内时,大气信道是一种随机信道,大气闪烁可以看成是一个平稳随机过程,它的概率密度函数(probability density function,PDF)服从对数正态分布<sup>[4,5]</sup>。设  $X(t)$  为大气闪烁的随机变量,其概率密度函数  $p(X)$  表示为

$$p(X) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2 X}} \exp\left\{-\frac{(\ln X + \frac{\sigma_x^2}{2})^2}{2\sigma_x^2}\right\} \quad (1)$$

式中,  $X$  是归一化均值;  $\sigma_x^2$  是  $X$  的对数方差。对于平面波和球面波,  $\sigma_x^2$  分别表示为

$$\sigma_x^2 = 1.23\kappa^{7/6} C_n^2 Z^{11/6} \quad (\text{平面波})$$

$$\sigma_x^2 = 0.496\kappa^{7/6} C_n^2 Z^{11/6} \quad (\text{球面波})$$

当  $\sigma_x^2 \ll 1$  时,  $X$  的方差  $\sigma_x^2$  近似等于  $\sigma_x^2$ ,  $\sigma_x^2$  的值取决于大气的不同状态。

### 2 性能分析

与一维地址码(optical orthogonal code, OOC)相比,二维地址码不仅能提供更多的用户数,而且其编解码器更具有实用性。因此,本文提出二维大气无线光CDMA 通信系统。由于无线光通信系统是一种功率受限系统,更适合采用脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)方式。这种信号格式不仅可以避免采用开关键控调制(on-off key, OOK)时判决门限对无线光CDMA 系统性能的影响,而且可以提高光信号的功率利用率。

在 M-ary PPM 无线光CDMA 通信系统中,对于二维光正交码,如果用  $m$  表示地址码中的波长数,  $n$  表示码长,  $K$  为码重,其码字可以由一个  $m \times n$  的矩阵表示,具体可表示为  $(m \times n, K, \lambda_u, \lambda_c)$ 。其中  $\lambda_u$  和  $\lambda_c$  分别是码字的自相关限和互相关限<sup>[8]</sup>。本文研究的二维大气无线光CDMA 通信系统采用由一维光正交码  $(F, K, 1, 1)$  衍生的二维光正交码 OOCs  $(F \times F, K, 1, 1)$  的自相关限和互相关限均为 1。对于采用开关键控调制的光CDMA 系统,2 个码字之间的平均碰撞概率  $\bar{q}$  为  $\bar{q} \approx K^2/2F^2$ <sup>[8]</sup>。对于采用 PPM 调制的光CDMA 系统,设系统的用户数为  $N$ ,第 1 个用户是期望用户,  $a_j^1$  为期望用户的二维地址码序列,  $a_j^2$  为干扰的用户二维地址码序列,那么这 2 个地址码之间的平均碰撞概率可以表示为

$$P_1 = \frac{1}{M} E\left\{\sum_{j=1}^F a_j^1 a_{j \oplus v}^2\right\} = \frac{1}{M} \times \frac{K^2}{F^2} = \frac{K^2}{MF^2} \quad (2)$$

式中符号  $E\{\}$  表示计算均值;  $\oplus$  表示摩尔  $F$  加;  $v$  表示一个移位变量。

定义对第  $i$  个 PPM 时隙的干扰向量为  $\vec{\kappa}_i$ , 表示为

$$\vec{\kappa}_i = (L_i(1), L_i(2), \Lambda, \Lambda, L_i(N-1)) \quad (3)$$

其中,

$$L_i(n) = \begin{cases} 1 & \text{用户 } n \text{ 对期望用户的第 } i \text{ 个时隙的干扰} \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

定义第  $i$  个 PPM 时隙的相关解输出为  $Y_i$ , 那么二维无线光CDMA 通信系统的误字率  $P_e$  可以表示成:

$$P_e = \sum_{i=0}^{M-1} P[e|i]P\{i\} \quad (4)$$

其中  $P\{i\}$  是第  $i$  个码字出现的概率,在先验概率相等的条件下,  $P\{i\} = 1/M$ 。  $P[e|i]$  为在第  $i$  时隙上相关解输出后的误判概率,可以表示为

$$P[e|i] = \Pr\{Y_j \geq Y_i, j \neq i|i\} \leq \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pr\{Y_j \geq Y_i|i\} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式可得

$$P_e \leq \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0, j \neq i}^{M-1} \Pr\{Y_j \geq Y_i|i\}P\{i\} = \frac{2}{M} \sum_{d=1}^{M-1} (M-d) \Pr\{Y_j \geq Y_i|i, |i-j|=d\} =$$

$$\frac{2}{M} \sum_{d=1}^{M-1} (M-d) \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\} \quad (6)$$

其中,  $\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\}$  可以表示为

$$\begin{aligned} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\} &= \sum_{\vec{\kappa}_0} \sum_{\vec{\kappa}_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \vec{\kappa}_0, \vec{\kappa}_d\} \times \\ &\Pr\{\vec{\kappa}_0, \vec{\kappa}_d | 0\} = \\ &\sum_{\vec{\kappa}_0} \sum_{\vec{\kappa}_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \vec{\kappa}_0, \vec{\kappa}_d\} \times \\ &\Pr\{\vec{\kappa}_0, \vec{\kappa}_d\} \quad (7) \end{aligned}$$

对(7)式进行进一步处理,可以得到:

$$\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0\} \leq \sum_{\vec{\kappa}_d} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \vec{\kappa}_0 = 0, \vec{\kappa}_d\} \Pr\{\vec{\kappa}_d\} \quad (8)$$

式中,  $\Pr\{\vec{\kappa}_d\}$  为码片碰撞概率,可以表示为

$$\begin{aligned} \Pr\{\vec{\kappa}_d\} &= \binom{N-1}{|\vec{\kappa}_d|} P_1^{|\vec{\kappa}_d|} (1-P_1)^{N-1-|\vec{\kappa}_d|} = \\ &\binom{N-1}{|\vec{\kappa}_d|} \left(\frac{K^2}{MF^2}\right)^{|\vec{\kappa}_d|} \times \\ &\left(1 - \frac{K^2}{MF^2}\right)^{N-1-|\vec{\kappa}_d|} \quad (9) \end{aligned}$$

其中  $|\vec{\kappa}_d|$  为向量  $\vec{\kappa}_d$  的模,即向量  $\vec{\kappa}_d$  中的“1”的个数。结合(6)、(8)和(9)式,可以得到无线CDMA系统的误字率上限,即

$$\begin{aligned} P_e &\leq (M-1) \sum_{\vec{\kappa}_d} \binom{N-1}{|\vec{\kappa}_d|} \times \\ &\left(\frac{K^2}{MF^2}\right)^{|\vec{\kappa}_d|} \left(1 - \frac{K^2}{MF^2}\right)^{N-1-|\vec{\kappa}_d|} \times \\ &\Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \vec{\kappa}_0 = \vec{0}, \vec{\kappa}_d\} \quad (10) \end{aligned}$$

对于APD探测器,其输出可以作高斯近似,从而得到:

$$\begin{aligned} \Pr\{Y_d \geq Y_0 | 0, \vec{\kappa}_d = \vec{0}, \vec{\kappa}_d\} &= \\ &\int_0^\infty p(X_0) \Lambda \int_0^\infty p(X_{N-1}) \cdot \\ &\int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_d^2(\vec{X})}} e^{-\frac{(x-\mu_d(\vec{X}))^2}{2\sigma_d^2(\vec{X})}} \cdot \\ &\int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_0^2(\vec{X})}} e^{-\frac{(y-\mu_0(\vec{X}))^2}{2\sigma_0^2(\vec{X})}} \cdot \\ &dy dx dX_0 dX_1 \Lambda dX_{N-1} \quad (11) \end{aligned}$$

式中,  $\vec{X} = (X_0, X_1, \Lambda, X_{N-1})$ ;  $X_i$  代表第  $i$  个用户的闪烁分布;  $\mu_d, \mu_0, \sigma_d^2, \sigma_0^2$  分别为  $Y_d$  和  $Y_0$  的均值和方差。均值和方差的计算式为

$$\mu_d(\vec{X}) = GT_c \left[ \sum_{i=1}^{N-1} l_d(i) X_i \lambda_{s,i} + \right.$$

$$\begin{aligned} &KX_0 \lambda_{s,0} / M_c + \\ &\sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) X_i \lambda_{s,i} / M_c + \\ &K\lambda_b + I_b/e \Big] + T_c I_s / e \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_0(\vec{X}) &= GT_c [KX_0 \lambda_{s,0} + \\ &\sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) X_i \lambda_{s,i} / M_c + \\ &K\lambda_b + I_b/e \Big] + T_c I_s / e \quad (13) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_d^2(\vec{X}) &= G^2 F_e T_c \left[ \sum_{i=1}^{N-1} l_d(i) X_i \lambda_{s,i} + \right. \\ &KX_0 \lambda_{s,0} / M_c + \\ &\sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) X_i \lambda_{s,i} / M_c + \\ &K\lambda_d + I_b/e \Big] + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (14) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_0^2(\vec{X}) &= G^2 F_e T_c [KX_0 \lambda_{s,0} + \\ &\sum_{i=1}^{N-1} (K - l_d(i)) X_i \lambda_{s,i} / M_c + \\ &K\lambda_b + I_b/e \Big] + T_c I_s / e + \sigma_{th}^2 \quad (15) \end{aligned}$$

在(12)~(15)式中,  $\lambda_{s,i}$  是第  $i$  个用户的光子吸收率;  $\lambda_b$  是背景光吸收率;  $G$  是APD的平均增益;  $I_s$  是APD的面漏电流;  $I_b$  是APD的体漏电流;  $F_e$  为附加噪声因子<sup>[4]</sup>。

对于采用M-ary PPM调制的光通信系统,误码率  $P_b$  和误字率  $P_e$  之间满足关系式<sup>[4]</sup>

$$P_b \leq \frac{M}{2(M-1)} P_e \quad (16)$$

根据(16)式就可以求得二维大气无线光CDMA通信系统的误码率一致限。

### 3 仿真结果及分析

根据前面得到的误码率一致限,下面分析大气闪烁对二维无线光CDMA通信系统误码率性能的影响。在数值分析时,设二维大气无线光CDMA通信系统采用码长为57、码重为8的二维光正交码(57×57,8,1,1)。对于无线光通信系统,如果系统的误码率满足  $BER \leq 10^{-6}$ , 那么就可以实现通信。

在数值计算时,假定光源的中心波长  $\lambda = 1550$  nm,码速率为155 Mbps,背景光功率为-45 dBm,其它参数的取值由文献<sup>[5]</sup>给出。图1给出了大气闪烁的对数方差  $\sigma_e^2$  取不同值时,4-ary PPM二维大气无线光CDMA通信系统中误码率随接收光功率的变化曲线。为了便于分析,在数值计算时,设二维

大气无线光CDMA 通信系统中在线用户数为2。从图1可以看出,当大气闪烁的对数方差较小(如 $\sigma_s^2 = 0.1$ )时,二维大气无线光CDMA 通信系统可以实现通信;相反,当大气闪烁的对数方差较大(如 $\sigma_s^2 = 0.3$ )时,大气闪烁的对数方差对系统的误码率性能影响很大,二维大气无线光CDMA 通信系统难以实现通信。分析2用户 $\sigma_s^2$ 为不同值时的关系曲线(0.1,0.01)与(0.01,0.1)可以看出,用户 $\sigma_s^2$ 较小时系统具有较好的性能。

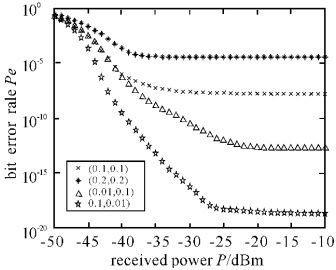


图1  $\sigma_s^2$ 取不同值时二维大气无线光CDMA 通信系统的误码率随接收功率的变化关系

Fig. 1 Variation of BER with the received laser power when  $\sigma_s^2$  is at different values

从误码率和接收光功率的关系曲线还可以看出,当接收光功率较小时,系统误码率随接收光功率增大明显降低。但是,当接收光功率增大到一定值时,如果再增大,系统误码率变化不大。这说明在用户数和大气闪烁一定的条件下,当接收光功率达到一定值之后,如果只增大有限的接收光功率,就难以降低系统的误码率,这时需要在无线光CDMA 通信系统中采用信道编码技术来提高系统的误码率性能。

### 4 结论

本文提出了基于PPM 信号格式的二维大气无线光CDMA 通信系统,分析了该系统中二维光正交码之间的平均碰撞概率,考虑了多用户干扰、APD噪声以及热噪声,并详细分析了大气闪烁对

二维无线光CDMA 通信系统误码率性能的影响。分析结果表明,在二维大气无线光CDMA 通信系统中,当大气闪烁的对数方差较小时可以实现通信,反之,当大气闪烁的对数方差较大时难以实现通信,需要采用信道编码技术来提高系统的性能。

### 参考文献:

[1] Gagliardi R M. Pulse-coded multiple access in space optical communications[J]. IEEE Selected Areas in Communications, 1995, 13(3): 603-608.

[2] Sayano K, Nguyen I, Chan J K. Demonstration of multi-channel optical CDMA for free space communications[J]. SPIE, 2001, 4272: 39-49.

[3] Jeromin L L, Kanfmann J E, Bucher E A. Freespace optical code division multiple access system design [J]. SPIE, 1993, 1866: 167-179.

[4] Ohtsuki T. Performance analysis of atmospheric optical PPM CDMA systems [J]. Lightwave Technology, 2003, 21(2): 406-411.

[5] Wakafuji K, Ohtsuki T. Performance analysis of atmospheric optical subcarrier multiplexing systems and atmospheric optical code division multiplexing systems [J]. IEEE Communications, 2004, 6 (20/24): 3336-3340.

[6] Yim, R M H. A new family of 2-D wavelength time codes for optical CDMA with differential detection [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15 (1): 165-167.

[7] Wan S P, Hu Yu. Two dimension optical CDMA differential system with Prime/OOC codes [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2001, 13 (12): 1373-1375.

[8] Yang Guu-Chang, Kwong W C. Performance comparison of multiwavelength CDMA and WDMA + CDMA for fiber-optic networks [J]. IEEE Communications, 1997, 45(11): 1426-1434.

[9] Jin Young Kim, Poor H V. Turbo-coded optical direct-detection CDMA system with PPM modulation [J]. Lightwave Technology, 2001, 19(3): 312-323.