

文章编号: 1001-3806(2014)05-0698-05

## 弱湍流信道无线光通信分集接收合并技术

刘洋, 章国安\*

(南通大学 电子信息学院, 南通 226019)

**摘要:** 为了克服大气湍流所造成的信道衰落效应, 分析了在弱湍流信道模型下基于强度检测脉冲位置调制方式的自由空间光通信(FSO)分集接收系统模型, 推导了无分集系统的误时隙率计算公式。然后以此作为参考, 在独立同分布的情况下, 采用数值仿真的方法, 分别对比分析了最大比合并(MRC)、等增益合并(EGC)和选择性合并(SC)的误时隙率性能。结果表明, 3种合并技术中, 误时隙率性能改善最优的是MRC, 其次是EGC, 而SC的改善性能最差, 但是SC实现相对容易。利用分集接收合并技术可以有效改善FSO系统的性能, 并且具有较好的抗大气信道衰落能力, 在无线光通信中将有一定的应用前景。

**关键词:** 光通信; 弱湍流信道; 脉冲位置调制; 分集接收; 误时隙率

中图分类号: TN929.12 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.05.026

## Combination of spatial diversity receiving technology of wireless optical communication in weak turbulence atmosphere channel

LIU Yang, ZHANG Guoan

(School of Electronics and Information, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** In order to overcome the channel fade effect caused by the atmospheric turbulence, the free space optical (FSO) system model with spatial diversity was analyzed based on intensity detection pulse position modulation (PPM) in weak turbulence atmosphere. The calculating formula of slot error rate (SER) of the system without diversity was derived under PPM firstly. Then as a benchmark, under the case of independent and identical distribution, the average slot error rates of three linear combining technologies, i. e., the maximal ratio combining (MRC), equal gain combining (EGC) and selection combining (SC) were compared by means of numerical simulation. The results show that the improvement of system by MRC is the best, followed by EGC and SC is poor. However, SC is simpler and more convenient. The technology of spatial diversity receiver combination is efficient to improve the performance of FSO and has strong ability of resistance to atmospheric channel fade, and is suited for optical wireless communications systems.

**Key words:** optical communication; weak turbulence atmosphere channel; pulse position modulation; diversity receive; slot error rate

### 引言

无线光通信作为一种新兴的通信方式, 具有组

网机动灵活、传输信息容量大、抗电磁干扰能力强以及保密性好等优点, 近年来受到了国内外学者的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。但是无线光信号在大气中传输时, 必然受到大气散射、吸收以及湍流效应的影响, 从而造成信道衰落, 甚至会严重影响到系统的通信能力, 因此, 如何克服大气随机信道对系统传输的影响是实现无线光通信的关键问题之一。

分集技术是目前抗衰落的最有效措施之一, 它可以通过处理多个不相关的信号, 从而达到改善系统传输性能、克服大气湍流引起的光强闪烁效应的作用<sup>[3]</sup>。目前用于对抗大气湍流效应的分集技术有阵列接收、多光束传输等。1996年, IBRAHIM<sup>[4]</sup>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61371113); 交通运输部应用基础研究资助项目(2013-319-825-110); 江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ13-0869); 南通大学研究生科技创新计划项目资助(YKC13001)

作者简介: 刘洋(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事无线光通信方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: gzhang@ntu.edu.cn

收稿日期: 2013-10-30; 收到修改稿日期: 2013-11-07

等人首先提出可以将分集技术应用于自由空间光通信系统来提高传输性能的思想。2002年, ANDREWS<sup>[5]</sup>等人进行了大孔径接收与阵列接收的对比实验,证实了阵列接收的效果要优于大孔径接收。2006年, FERNANDEZ<sup>[6]</sup>等人证实了相干检测-分集技术可以有效地补偿大气湍流的影响。2007年, ZHU<sup>[7]</sup>等人采用开关键控(on-off keying, OOK)调制方式,指出在小孔接收器输出信号相关性较强时,最大似然分集模式的性能要优于等增益模式。鉴于脉冲位置调制(pulse position modulation, PPM)相对于开关键控有更好的性能,本文中研究了基于PPM调制的3种空间分集接收合并技术,即最大比合并(maximal ratio combining, MRC)、等增益合并(equal gain combining, EGC)和选择性合并(selection combining, SC)。

本文中首先分析了弱湍流信道模型下的多输入多输出自由空间光(multiple input multiple output free space optical, MIMO-FSO)通信系统模型,推导了无分集系统的误时隙率(slot error rate, SER)计算公式,然后以此作为参考,在独立同分布的情况下,分别对比分析了3种合并技术的误时隙率性能。仿真结果表明,分集技术可以有效地改善无线光通信系统性能,具有较强的抗大气信道衰落能力。3种合并技术中,误时隙率性能改善最优的是MRC,其次是EGC,而SC的改善性能最差,但是SC实现相对容易,在实际应用中要综合考虑实现的难易程度和性能。

## 1 系统模型

### 1.1 弱湍流信道模型

无线光通信一般采用强度调制/直接检测(intensity modulation/direct detection, IM/DD)系统,光经过强度调制后,在大气信道中传输时主要受大气湍流和大气衰减效应两方面的影响<sup>[8]</sup>。大气湍流是一种具有强烈涡旋性的不规则运动,在边界层大气中,几乎总存在湍流运动,大气湍流会引起信号光强的随机起伏。大气衰减主要是由于光信号在大气信道中传输时受到大气分子和气溶胶粒子的吸收以及散射所造成的光强的减弱。相对于大气衰减,湍流对信号的影响更具随机性。根据湍流程度以及运动状态的不同,大气信道可分为弱湍流和强湍流信道。

对于室外的可见光通信系统,考虑孔径平均效

应,可认为大气湍流为弱湍流。在弱湍流信道条件下,大气闪烁造成光信号的光强服从对数正态分布,其概率密度函数为<sup>[8-9]</sup>:

$$f(I) = \frac{1}{2\sqrt{2\pi}I\sigma_1} \exp\left[-\frac{\left(\ln \frac{I}{I_0} + 2\sigma_1^2\right)^2}{8\sigma_1^2}\right] \quad (1)$$

式中, $I$ 为接收光强,单位面积上等价为光功率, $I_0$ 为 $I$ 的均值, $\sigma_1$ 为大气闪烁指数,在弱湍流条件下一般取 $\sigma_1 < 1$ 。

### 1.2 MIMO-FSO 信号检测

典型的MIMO-FSO系统结构如图1所示,发射端为发光二极管(light emitting diode, LED),接收端为光电探测器(photo detector, PD),发射端 $M$ 个发射光源发出的信号经过大气信道传输到接收端的 $N$ 个光电探测器。假设各条信道是时间离散、各态历经的,并且引入的噪声为加性高斯白噪声,则接收信号 $R_n$ 可表示为<sup>[10]</sup>:

$$R_n = T\eta \sum_{m=1}^M x_{nm} + \rho_n, (n = 1, \dots, N) \quad (2)$$

式中, $T$ 为二进制信息比特,则 $T \in (0, 1)$ ;  $\eta$ 为光电转换系数; $x_{nm}$ 为第 $m$ 个光源发出的光信号在第 $n$ 个光电探测器上的光强大小; $\rho_n$ 为第 $n$ 个光电探测器引入噪声的大小。光电检测器上的接收光电流为:

$$I = G \frac{He}{hf} P = \eta P \quad (3)$$

式中, $e$ 和 $h$ 分别为电子电荷与普朗克常数; $G$ 为光电探测器增益系数; $H$ 和 $f$ 分别为光波频率和量子效率; $P$ 为接收端的平均光功率大小, $P = x_{nm} \times A$ ,  $A$ 为接收端光电探测器的有效面积。

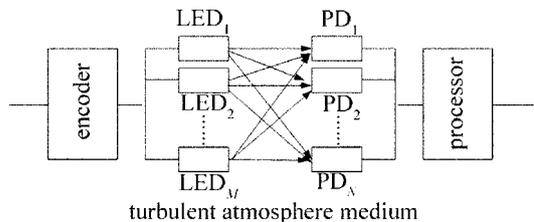


Fig. 1 MIMO-FSO link system model

## 2 接收分集误时隙率分析

### 2.1 无分集 FSO 系统误时隙率分析

在加性高斯白噪声(additive Gaussian white noise, AWGN)背景下,噪声 $n(t)$ 的均值为0,噪声方差为 $\sigma^2$ ,采用PPM调制方式的IM/DD的FSO系统,调制阶数为 $m$ ,接收到的光强度 $x$ 的条件下系统

SER 概率为<sup>[10-12]</sup>:

$$P_e(x) = \frac{1 + \operatorname{erf}[(b - \sqrt{P_r})/\sqrt{2\sigma^2}] + (2^m - 1)[1 - \operatorname{erf}(b/\sqrt{2\sigma^2})]}{2^{m+1}} \quad (4)$$

式中,判决门限  $b = \frac{2\sigma^2 \ln(2^m - 1) + P}{2\sqrt{P}}$ ,  $P$  为接收信

号的平均光功率,根据光电检测相关知识可以推出  $P = Ax$ ,其中  $x$  为接收端光信号的强度;又因为光电检测电流  $i = \eta P = \eta Ax$ ,则电信号平均功率为  $P = i^2 R = \eta^2 A^2 R x^2$ ,  $R$  为电阻。令  $\mu$  为电信号信噪比,则  $\mu = \frac{P}{2\sigma^2} = \frac{\eta^2 A^2 R x^2}{2\sigma^2} = \eta^2 A^2 R \frac{x^2}{2\sigma^2}$ ,若归一化后接收面积  $A = 1, \eta^2 A^2 R = 1$ ,则电信号平均信噪比可以表示为  $\mu = \frac{x^2}{2\sigma^2}$ ,且  $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \operatorname{erf}(x)$ ,则(3)式可以简化为关于信噪比  $\mu$  的表达式:

$$P_e(x) = \frac{2 - \operatorname{erfc}(c) + (2^m - 1)\operatorname{erfc}(d)}{2^{m+1}} \quad (5)$$

那么,在弱湍流信道条件下,采用 PPM 调制的 FSO 系统的平均 SER 表达式为<sup>[13]</sup>:

$$P_e = \int_0^\infty f(x) \times P_e(x) dx = \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{2\pi x}\sigma_1} \times \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{x}{x_0} + 2\sigma_1^2\right)^2}{8\sigma_1^2}\right\} \times \frac{2 - \operatorname{erfc}(c) + (2^m - 1)\operatorname{erfc}(d)}{2^{m+1}} dx \quad (6)$$

式中,

$$\begin{cases} c = \sqrt{\frac{x}{4\mu}} \ln(2^m - 1) - \sqrt{\frac{\mu}{4x}} \\ d = \sqrt{\frac{x}{4\mu}} \ln(2^m - 1) + \sqrt{\frac{\mu}{4x}} \end{cases} \quad (7)$$

## 2.2 接收分集 FSO 系统误时隙率分析

考虑一个具有  $N$  个光电探测器的接收分集系统,假设只有一个发射光源,即  $M = 1$ 。对于单发多收的无线光通信系统,可以利用多种技术方式来合并不同接收端天线上的信号,包括最大比、等增益和选择性合并。

**2.2.1 MRC 合并接收分集** MRC 合并技术是一种最优合并方式,它是将多路不同的接收信号进行同相加权,权重由各支路信号的平均功率与噪声功率之比所决定,MRC 合并的平均信噪比等于各支路信噪比之和。所以,即使当任一支路信号都很差时,

使得没有任何单独信号可被解调出来时,MRC 合并仍有可能合并出一个达到系统信道传输要求的解调信号。

采用最大比合并方式时,各支路信号的加权因子正比于接收到的光强大小。为了与无分集接收系统进行分析比较,假定系统平均发射功率相同,且  $N$  个接收端光电探测器的有效面积与无分集系统相同,那么平均到每个光电探测器的面积为  $A/N$ ,则每个探测器的平均接收光功率为  $P_N = Ax/N$ 。假设发射端和接收端的信道是独立且同分布的,则  $I_N = \eta P_N = \eta Ax/N$ ,合并后解调器输入端电信噪比为<sup>[14]</sup>:

$$\mu_{\text{MRC}} = \sum_{n=1}^N \mu_n = \frac{1}{2N^2\sigma^2} \sum_{n=1}^N x_n^2 \quad (8)$$

式中, $\mu_n$  为每一条支路的平均电信噪比,可以得出采用最大比值合并方式时系统的平均误时隙率为:

$$P_{e,\text{MRC}} = \left[ \int_0^\infty f(x_n) \times P_{e,\text{MRC}}(x_n) dx_n \right]^N = \left[ \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{2\pi x_n}\sigma_1} \exp\left\{-\frac{\left(\ln \frac{x_n}{x_0} + 2\sigma_1^2\right)^2}{8\sigma_1^2}\right\} \times \frac{2 - \operatorname{erfc}(c_1) + (2^m - 1)\operatorname{erfc}(d_1)}{2^{m+1}} dx_n \right]^N \quad (9)$$

式中,

$$\begin{cases} c_1 = \sqrt{\frac{x_n}{4\mu_{\text{MRC}}}} \ln(2^m - 1) - \sqrt{\frac{\mu_{\text{MRC}}}{4x_n}} \\ d_1 = \sqrt{\frac{x_n}{4\mu_{\text{MRC}}}} \ln(2^m - 1) + \sqrt{\frac{\mu_{\text{MRC}}}{4x_n}} \end{cases} \quad (10)$$

**2.2.2 EGC 合并接收分集** 最大比合并需要知道每个支路的信噪比,这种方法使系统复杂性增加,一个简单的方法是把每个支路的幅值相加,即等增益合并。等增益合并方式实现起来比较简单,其性能接近于最大比值合并。采用等增益合并方式,加权因子常数,此时,合并后解调器的输入端平均电信噪比为<sup>[14]</sup>:

$$\mu_{\text{EGC}} = \frac{1}{2N^2\sigma^2} \left( \sum_{n=1}^N x_n \right)^2 \quad (11)$$

因此,可得采用 EGC 合并分集技术的系统误时隙率为:

$$P_{e,EGC} = \left[ \int_0^\infty f(x_n) \times P_{e,EGC}(x_n) dx_n \right]^N = \left\{ \int_0^\infty \frac{1}{2\sqrt{2\pi x_n \sigma_1}} \exp \left\{ -\frac{\left( \ln \frac{x_n}{x_0} + 2\sigma_1^2 \right)^2}{8\sigma_1^2} \right\} \times \frac{2 - \operatorname{erfc}(c_2) + (2^m - 1) \operatorname{erfc}(d_2)}{2^{m+1}} dx_n \right\}^N \quad (12)$$

式中,

$$\begin{cases} c_2 = \sqrt{\frac{x_n}{4\mu_{EGC}}} \ln(2^m - 1) - \sqrt{\frac{\mu_{EGC}}{4x_n}} \\ d_2 = \sqrt{\frac{x_n}{4\mu_{EGC}}} \ln(2^m - 1) + \sqrt{\frac{\mu_{EGC}}{4x_n}} \end{cases} \quad (13)$$

2.2.3 SC 合并接收分集 选择式合并方式,实现比较容易,方法较前两种合并方式更为简单,即接收端从  $N$  个分集支路中选择输出信噪比最高的那条支路信号,假设支路引入噪声相等,则等效于选择输出平均功率最大的支路信号。在选择式合并方式中,由于系统只选择了一路有用信号而丢弃了未被选择的支路信号,因此系统的抗衰落性能较差。在 SC 中,从  $N$  个支路中选择信噪比最大的接收信号进行解码。则 SC 的平均电信噪比为:

$$\mu_{SC} = \max \{ \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_N \} \quad (14)$$

根据上述所推导出的 SIMO-FSO 系统的平均误时隙率公式,当调制阶数  $m = 4$ , 闪烁指数  $\sigma_1 = 0.3$  时,接收天线分别令  $N = 2, N = 3$  时,采用 3 种分集接收合并技术(MRC, EGC, SC)以及无分集系统误时隙率性能与平均电信噪比 SNR 的变化曲线如图 2 和图 3 所示。

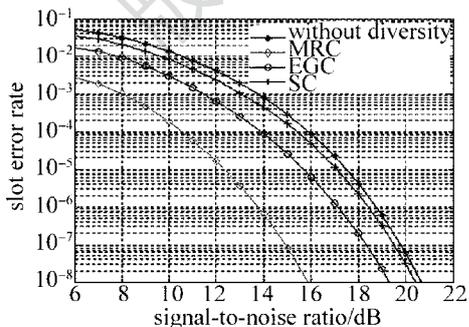


Fig. 2 Slot error rate of three different diversity receive technologies ( $N = 2$ )

由图可知,3 种分集接收合并技术均可以有效地改善系统性能,提高系统的抗衰落能力。在接收端光电探测器数量和闪烁指数不变的条件下,3 种

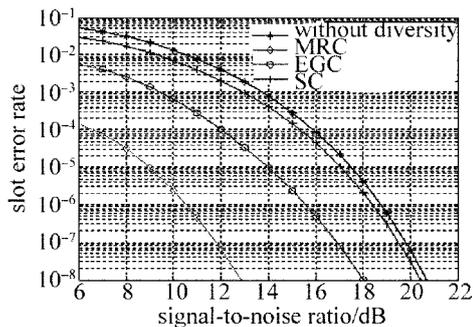


Fig. 3 Slot error rate of three different diversity receiving technologies ( $N = 3$ )

合并方式中,误时隙率性能改善最优的是 MRC,其次是 EGC,而 SC 的改善性能最差。当 SER 为  $10^{-4}$  时,在  $N = 2$  的 SIMO-FSO 系统中,采用 EGC 分集合并方式能比对应的无分集系统节省信噪比 2dB 左右,而采用 MRC 分集合并方式则能节省信噪比 5dB 左右。

图 4 中给出了采用 EGC 分集合并方式并在接收天线数  $N$  分别为 2, 3, 4 和 5 情况下 FSO 系统的误时隙率曲线图。由此可以看出,系统误时隙率随着接收天线数  $N$  的增大而逐步减小。当  $N$  从 2 增加到 5 时,系统误时隙率性能较无分集时有了明显的改善,例如当 SER 为  $10^{-4}$  时,采用 EGC 分集合并方式,当接收天线数  $N$  分别为 2, 3, 4 和 5 时,能比对应的无分集系统分别节省信噪比 2dB, 4dB, 5.5dB 和 6.5dB 左右。

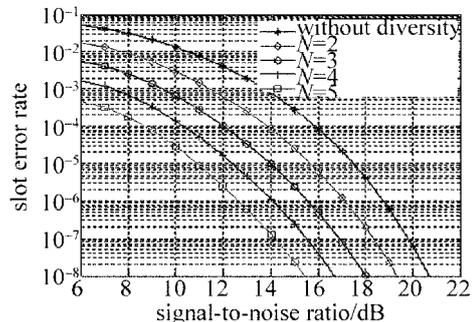


Fig. 4 Slot error rate of EGC with different number of the receiving antenna

### 3 结论

研究了空间分集接收的 3 种线性合并技术即最大比合并、等增益合并以及选择性合并方式。首先分析了弱湍流信道条件下,基于强度检测的 PPM 调制无线光通信空间接收分集系统模型,推导出了 3 种合并方式下的系统误时隙率计算公式。仿真结果表明,采用空间分集技术可以有效改善 FSO 系统性

能,具有较好的抗大气信道衰落能力,且随着接收天线数目的增大,系统性能逐步提高。在接收天线数和闪烁指数相同的条件下,系统误时隙率性能改善最优的是 MRC 合并,其次是 EGC 合并,而 SC 合并方式的改善性能最差,但是 SC 合并方式实现相对容易,在实际应用中要综合考虑实现的难易程度和性能。

#### 参 考 文 献

- [1] KARIMI M, NASIRI-KENARI M. Outage analysis of relay-assisted free-space optical communications [J]. IET Communication, 2010, 4(12):1423-1432.
- [2] SAFARI M, UYSAL M. Cooperative diversity over lognormal fading channels performance analysis and optimization [J]. IEEE Transaction on Wireless Communications, 2008, 7(5):1963-1972.
- [3] LENG J F, HAO Sh Q, QU F Q, *et al.* Combination of spatial diversity coherent receivers for wireless optical communication [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012(2):21-26 (in Chinese).
- [4] IBRAHIM M M, IBRAHIM A M. Performance analysis of optical receivers with space diversity reception [J]. Proceedings of the IEEE Communications, 1996, 143(6):369-372.
- [5] ANDREWS C C, PHILLIPS R L. Phillips impact of scintillation on laser communication systems: recent advantages in modeling [J]. Proceedings of the SPIE, 2002, 4489:23-24.
- [6] FERNANDEZ M M, VILNROTTER V A, MUKAI R, *et al.* Coherent optical array receiver experiment: design, implementation and BER performance of a multichannel coherent optical receiver for PPM signals under atmospheric turbulence [J]. Proceedings of the SPIE, 2006, 6105:61050R.
- [7] ZHU X M, KAHN J M. Communication techniques and coding for atmospheric turbulence channels [J]. Optical Fiber Technology, 2007, 23(4):363-405.
- [8] LENG J F, HAO Sh Q, LÜ X G, *et al.* Performance study of optical wireless communication system based on LDPC code and BPPM [J]. Laser Technology, 2012, 36(3):334-389 (in Chinese).
- [9] LIU Y, ZHANG G A. A new modulation scheme of visible light communication [J]. Optoelectronics Letters, 2014, 10(4):273-276.
- [10] WANG H X, XU J W, SUN X M, *et al.* Performance analysis of MIMO-FSO systems based on PPM modulation and gamma-gamma distribution model [J]. System Engineering and Electronics, 2012, 34(2):385-390 (in Chinese).
- [11] LIU Y, ZHANG G A. Performance analysis of MIMO-FSO system based on weak turbulence atmosphere channel [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2014, 35(2):300-304 (in Chinese).
- [12] CHEN D, KE X Zh. Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation [J]. Journal on Communications, 2012, 33(8):128-133 (in Chinese).
- [13] WANG H X, HU H, ZHANG T Y, *et al.* Modeling and simulating of error performance for free space optical communication system through weak turbulence atmosphere [J]. Journal of System Simulation, 2011, 23(4):788-792 (in Chinese).
- [14] NAVIDPOUR S M, UYSAL M, KAVEHRAD M. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2007, 6(8):2813-2819.