

副载波调制无线光通信分集接收技术研究

陈丹, 柯熙政

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 基于湍流信道条件下光强闪烁的对数正态分布模型, 建立了副载波 BPSK 调制的无线光通信空间接收分集系统。在不同光强闪烁效应和接收天线数下, 分别对比分析了 3 种线性合并技术的差错性能及分集增益。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, 系统误码率性能改善最优的是 MRC, 其次是 EGC, 而 SelC 较差, 对短距离且弱光强闪烁下的 FSO 系统, 不建议空间分集采用选择合并方式。

关键词: 无线光通信; 副载波调制; 分集接收; 差错性能

中图分类号: TN929.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2012)08-0128-06

Research on diversity receive technology on wireless optical communication using subcarrier modulation

CHEN Dan, KE Xi-zheng

(School of Automation & Information, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Based on the log-normal model under the turbulence channel, the BPSK subcarrier modulated FSO system with spatial diversity was established. Under different scintillation distribution and different detectors, the error performance and diversity gain among three linear combining technologies were compared. The simulation results show that the performance improved of system by MRC is the best, followed by EGC, and SelC is poor. Spatial diversity is efficient to improve the performance and have strong ability on resistance to atmospheric channel decline. But on short link FSO system experiencing weak irradiance fluctuation, SelC spatial diversity would not be recommended.

Key words: wireless optical communication; subcarrier modulation; diversity receive; BER performance

1 引言

无线激光通信是以激光束作为信息载体在空间进行传播, 能够实现语音、数据和多媒体图像的高速全双工通信, 具有大带宽、体积小、成本低、

安装方便灵活及抗干扰能力强等优点, 成为世界各国通信领域认可的高速大容量通信最佳解决方案。

大气随机信道对激光传输的严重影响是无线激光通信所面临的关键问题之一。

分集技术可以通过对 2 个或多个不相关信号进

收稿日期: 2011-07-04; 修回日期: 2011-12-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977054); 陕西省自然科学基金资助项目(2012JQ8004); 陕西省教育厅科技专项基金资助项目(11JK1010); 西安市科技计划基金资助项目(CXY1120); 西安理工大学科技创新研究计划基金资助项目(105-211014, 105-211202)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (60977054); The Natural Science Foundation of Shanxi Province(2012JQ8004); Special Science and Technology Plan of Education Bureau of Shanxi Province (11JK1010); Xian City Science and Technology Plan Projects (CXY1120); Science and Technology Innovation Research Project of Xi'an University of Technology (105-211014, 105-211202)

行处理，以抑制无线激光通信信道中的信号衰落及大气湍流导致的接收光强起伏^[1]。目前用于对抗大气湍流造成的光信号衰落的分集技术主要有多光束传输、阵列接收等。2002 年 Andrews 等^[2]对阵列接收和大孔径接收的性能进行了对比，得出了阵列接收机孔径平滑效果优于单个大孔径接收器。2007 年 Zhu 等^[3]导出了使用最大似然检测器进行符号判决时的链路误码率计算公式，指出当小孔径接收器输出信号之间的相关性较强时，最大似然分集模式比等增益合成分集模式的性能好，而其中调制采用开关键控 (OOK) 方式。在无线激光通信系统中，BPSK 副载波强度调制是一种有效的战胜大气湍流的调制方法^[4-6]，其性能优于与开关键控调制。因此，本文研究了基于副载波 BPSK 调制的无线激光通信的空间接收分集技术，给出了 3 种线性分集合并技术的误码率计算模型，在不同光强起伏方差和接收天线数下对比分析了各自的误码率性能和分集增益。

2 MIMO 系统模型

空间分集是一种有效的通信接收方式，它能以较低的成本改善无线通信系统的性能。不同路径信号的相关性是接收端信号分离的难点所在，分集技术就是研究如何使接收到不同路径的信号变为互不相干的信号，从而达到改善系统性能的目的^[7]。在无线激光通信系统中，湍流大气的相干长度在厘米量级，发射天线之间和接收天线之间的距离只需要在厘米量级即可使不同传输信道之间的衰落特性相互独立^[8]。在接收端，发射激光束在接收机平面形成的光斑覆盖了所有 N 个探测器口径，光电流 $\{i_i(t)\}_{i=1}^N$ 如图 1 所示，在进行 BPSK 相干解调前采用线性合并方法，包括等增益合并、选择性合并以及

最大比合并。

光强闪烁是随着时间变化的随机过程，因此，接收光强也是时变的，如果光强衰减的相关时间为 τ_0 ，其数量级一般为毫秒。这就意味着在时间间隔 $t < \tau_0$ 时，所接收到的信号是常量而不是时变的。当信息码元周期 $T \ll \tau_0$ 时，虽然信道是时变的，但接收到的光强 $\{I_i\}_{i=1}^N$ 在每个码元周期内是不随时间变化的。假设 N 个探测器中每一个探测器孔径面积为 A_D / N ， N 个接收天线总的接收孔径面积为 A_D ，与无分集时的探测器接收孔径面积相等，这样即可在同等条件下比较分集与不分集的 FSO 链路性能。

3 BPSK 副载波强度调制

对于光强度调制/直接检测 (IM/DD) 通信系统，接收机接收到的光强 $P(t)$ 可以表示为

$$P(t) = I(t)P_s(t) + n(t) \quad (1)$$

其中， $P_s(t)$ 为无湍流下的接收光功率， $n(t)$ 为高斯白噪声， $I(t)$ 为等可能概率过程引起的光强闪烁，其概率密度函数^[9]为

$$p(I) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_I I}} \exp\left\{-\frac{[\ln(I/I_0) + \sigma_I^2/2]^2}{2\sigma_I^2}\right\}, I \geq 0 \quad (2)$$

其中， $I = 0.5I_{\max}$ 为接收到的平均光强， I_{\max} 为接收的峰值光强， I_0 为无湍流时的接收的平均光强， σ_I^2 为光强起伏方差。

当接收机采用直接检测时，光强度信号经光电转换为电流信号 $i(t)$ ：

$$i(t) = RI(t)[1 + \xi m(t)] + n(t) \quad (3)$$

其中， R 为光电转换常数， ξ 为光调制指数。

对于副载波 BPSK 调制，图 1 中每一探测器在符号时间内输出光电流为

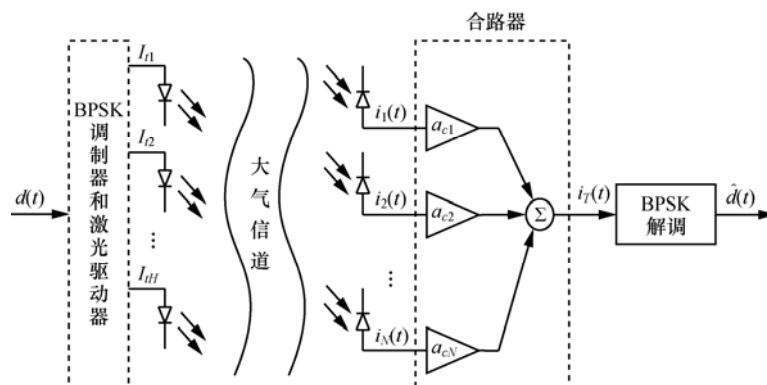


图 1 具有 N 个探测器的空间接收分集

$$i_i(t) = \frac{RI_i}{N} \left[1 + \xi A \sum_{j=1}^M g(t-kT) d_k \cos(\omega_j t + \varphi_j) \right] + n(t),$$

$$i = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

其中, 对应符号“0”和“1”, $d_k \in \{-1, 1\}$, $g(t-kT)$ 为矩形脉冲成型函数, T 为码元间隔, N 为探测器个数, 假设每路 BPSK 副载波调制信号幅度峰值均为 A , M 为副载波个数。式 (4) 中的慢变化分量 RI_i/N 通过接收机带通滤波器被滤除后, 通过相干解调中低通滤波器, 可得到每个支路解调后的电流信号为

$$I_D(t) = \frac{d_k I_i R \xi A g(t-kT)}{2N} + n_D(t) \quad (5)$$

其中, $n_D(t)$ 为解调后信号所附加的高斯白噪声, $n_D(t) \sim N(0, \sigma_g^2/2)$ 。相干解调器输入端电信噪比可表示为

$$\gamma(I) = \frac{(I \xi RA)^2}{2\sigma_g^2} \quad (6)$$

每个探测器输出信号合并通过加权因子 $\{a_i\}_{i=1}^N$ 。探测器阵列之间间距一般为几个厘米, 而通信距离一般为几千米, 因此, 信号到达探测器阵列每一探测器的时间延时可以忽略, 合并后的输出信号为

$$i_T(t) = \sum_{i=1}^N a_i i_i(t) \quad (7)$$

选择不同的加权系数, 就可以构成不同的合并方式。

4 接收分集误码率分析

4.1 无分集的 BPSK 误码性能

在副载波相干解调器输入端, 输入电信噪比 $\gamma(I) = \frac{(I \xi RA)^2}{2\sigma_g^2}$, 于是可得相干接收时的误码率:

$$P_{ec} = Q(\sqrt{\gamma(I)}) \quad (8)$$

基于对数正态分布的光信道下, 系统误码率可由式 (8) 得到^[10]

$$P_e = \int_0^\infty P_{ec} p(I) dI \quad (9)$$

$$P_e = \int_0^\infty Q(\sqrt{\gamma(I)}) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_I} e^{-\frac{(\ln I + \sigma_I^2/2)^2}{2\sigma_I^2}} dI \quad (10)$$

对式 (10) 采用高斯-埃尔米特多项式对高斯 Q 函数进行数值积分, 有

$$Q(y) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sin^2 \theta}\right) d\theta \quad (11)$$

$$\int_{-\infty}^\infty f(x) \exp(-x^2) dx \approx \sum_{i=1}^m w_i f(x_i) \quad (12)$$

其中, $\{x_i\}_{i=1}^m$ 和 $\{w_i\}_{i=1}^m$ 为 m 阶高斯-埃尔米特多项式系数和节点, 将式(11)、式(12)代入式(10)可以得到

$$P_e \approx \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^m w_i \exp\left[-\frac{K^2 \exp(2(\sqrt{2}\sigma_I x_i - \sigma_I^2/2))}{2\sin^2 \theta}\right] d\theta$$

$$\approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^m w_i Q(Ke^{(x_i \sqrt{2}\sigma_I - \sigma_I^2/2)}) \quad (13)$$

其中, $K = \frac{R \xi I_0 A}{\sqrt{2}\sigma_g}$, $\{x_i\}_{i=1}^m$ 和 $\{w_i\}_{i=1}^m$ 为 m 阶高斯埃尔米特多项式的零点和节点。

4.2 接收分集的 BPSK 误码性能

如图 1 所示的无线激光通信发射接收空间分集结构, 发射天线数目为 H 个, 接收天线的数目为 N 个。考虑调制方式 BPSK 的无线激光通信系统, 为了简化接收, 本文假设: 接收天线之间的距离大于大气相干长度, 各接收天线接收的信号衰减特性是相互独立的; 到达接收器端面的光束宽度覆盖了 N 个光电探测器, 光电流信号在进行相干解调前进行线性合并。

相干解调输入端信噪比可表示为^[11]

$$\gamma = \frac{(\xi RA/2N)^2 (\sum_{i=1}^N a_i I_i)^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2 \sigma_i^2 / 2N} \leq \frac{(\xi RA/2N)^2 \sum_{i=1}^N a_i^2 \sum_{i=1}^N I_i^2}{\sum_{i=1}^N a_i^2 \sigma_i^2 / 2N} \quad (14)$$

1) MRC (最大比) 合并接收分集

最大比值合并是一种最佳合并方式, 它对多路信号进行同相加权合并, 权重是由各支路信号所对应的信号功率与噪声功率的比值所决定的, 最大比合并的输出 SNR 等于各路 SNR 之和。所以, 即使各路信号都很差使得没有一路信号可以被单独解调出时, 最大比算合并仍有可能合成出一个达到 SNR 要求的可被解调的信号。

当采用 MRC 合并, 加权因子与接收光强成比例, $\{a_i\}_{i=1}^N = \{I_i\}_{i=1}^N$, 合并后 BPSK 解调器输入端电信噪比为

$$\gamma_{\text{MRC}}(I) = \left(\frac{RA\xi}{\sqrt{2N}} \right)^2 \sum_{i=1}^N \frac{I_i^2}{\sigma_i^2} = \sum_{i=1}^N \gamma_i \quad (15)$$

其中, $\gamma_i = \left(\frac{RA\xi I_i}{\sqrt{2N\sigma_g^2}} \right)^2$ 为每一支路电信噪比, 可得到采用 MRC 合并分集技术的系统误码率为^[10]

$$P_{e(\text{MRC})} = \int_0^\infty Q\left(\sqrt{\gamma_{\text{MRC}}(I)}\right) p(I) dI \quad (16)$$

同无分集一样, 采用高斯-埃尔米特多项式进行数值积分, 化简式(16)为

$$P_{e(\text{MRC})} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} [s(\theta)]^N d\theta \quad (17)$$

其中,

$$s(\theta) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{j=1}^m w_j \exp\left(-\frac{K_0^2}{2\sin^2\theta} \exp\left[2(x_j\sqrt{2}\sigma_i - \sigma_i^2/2)\right]\right),$$

$$K_0 = \frac{R\xi I_0 A}{\sqrt{2N\sigma_g}}.$$

2) EGC (等增益) 合并接收分集

等增益合并无须对信号加权, 各支路的信号是等增益相加的。等增益合并方式实现比较简单, 其性能接近于最大比值合并。采用 EGC 合并方式, 加权因子 $\{a_i\}_{i=1}^N$ 均为一个常数^[12], 此时, 解调器输入端电信噪比为

$$\gamma_{\text{EGC}}(I) = \left(\frac{RA\xi}{\sqrt{2N\sigma_g}} \right)^2 \left(\sum_{i=1}^N I_i \right)^2 < \left(\frac{RA\xi}{\sqrt{2N}} \right)^2 \sum_{i=1}^N \frac{I_i^2}{\sigma_g^2} \quad (18)$$

因此, $\gamma_{\text{EGC}}(I) < \gamma_{\text{MRC}}(I)$, 采用 EGC 合并分集技术的系统误码率为

$$P_{e(\text{EGC})} = \int_0^\infty \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi/2} \exp\left(-\frac{K_1^2}{2\sin^2\theta} Z^2\right) P_Z(Z) d\theta dZ$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^m w_i Q(K_1 e^{(x_i\sqrt{2}\sigma_u + \mu_u)}) \quad (19)$$

其中, $K_1 = \frac{R\xi I_0 A}{\sqrt{2}\sigma_g N}$, $P_Z(Z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \frac{1}{Z} \exp\{-\ln Z - \mu_u\} / 2\sigma_u^2$, 且 $\mu_u = \ln(N) - \frac{1}{2} \ln\left(1 + \frac{e^{\sigma_i^2} - 1}{N}\right)$, $\sigma_u^2 = \ln\left(1 + \frac{e^{\sigma_i^2} - 1}{N}\right)$ 。

3) SelC (选择式) 合并接收分集

选择式合并是指检测所有分集支路的信号, 以选择其中信噪比最高的那一个支路的信号作为合并器的输出。在选择式合并器中, 加权系数只有一项为 1, 其余均为 0。选择式合并方法简单, 实现容易。但是, 由于未被选择的支路信号丢弃, 因此抗衰落效果差。

采用选择式合并分集技术的系统误码率为^[10]

$$P_{e(\text{SelC})} = \frac{2^{1-N} N}{\sqrt{\pi}} \sum_{i=1}^m w_i [1 + \text{erf}(x_i)]^{N-1} Q(K_0 e^{(x_i\sqrt{2}\sigma_i - \sigma_i^2/2)}) \quad (20)$$

5 合并分集系统误码率分析

图 2 与图 3 给出了基于 BPSK 调制的无线激光 SIMO 系统在对数正态分布信道下, 光强起伏方差 $\sigma_i^2 = 0.3$, 接收天线分别取 $N=2$ 和 $N=4$ 情况下, 采用 3 种分集合并方式 EGC、SelC、MRC 以及无分

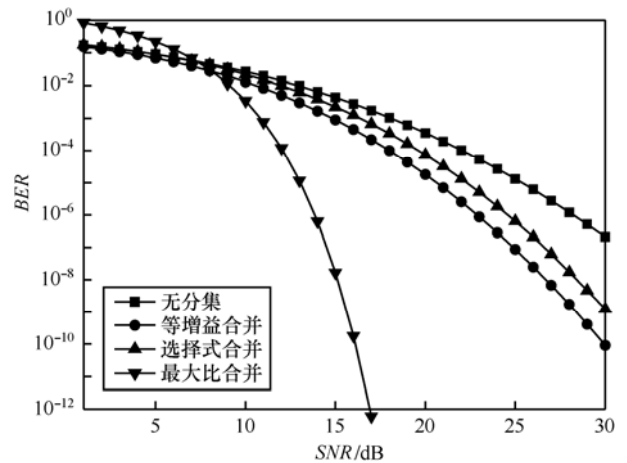


图 2 3 种分集合并技术与无分集的误码率 ($N=2$)

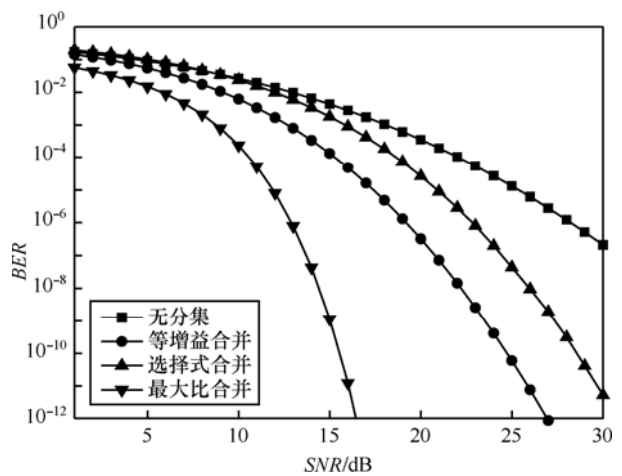


图 3 3 种分集合并技术与无分集的误码率 ($N=4$)

集时误码率随电信噪比 SNR 的变化曲线。由图 2 和图 3 可以看出, 3 种分集合并技术都可以有效地改善系统误码性能, 具有较强的抗衰落能力。在相同接收天线数和光强闪烁方差下, 3 种合并技术中, 误码率性能改善最优的是 MRC, 其次是 EGC, 而选 SelC 较差。

图 4 和图 5 分别给出了采用 SelC 和 EGC 合并在接收天线数 $N=2, 4, 6, 8$ 情况下, $\sigma_i^2 = 0.3$ 的系统误码率曲线。可以看出, 这 2 种方式下的误码率都随着系统接收天线数 N 的增大逐步减小, 改善了系统误码性能, 能有效地克服大气湍流引起的光强闪烁效应。当 N 从 2 增加到 6 时, 误码率特性较无分集时有明显改善, 但随着 N 的不断增大, 即从 6 增加到 8 时, 改善的趋势有所减弱。由 2 个图还可以看出, 在 $N=4, SNR=15\text{dB}$ 时, 系统采用 EGC 时的误码率为 1.3×10^{-4} , 而采用 SelC 时的误码率为 1.8×10^{-3} , 说明 EGC 性能优于 SelC。

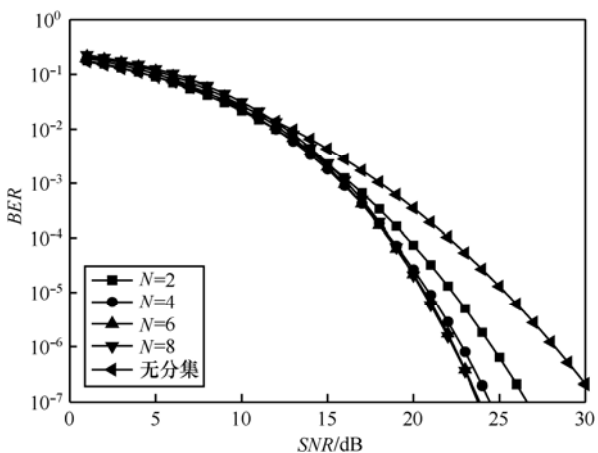


图 4 不同接收天线数 N 下选择合并误码率

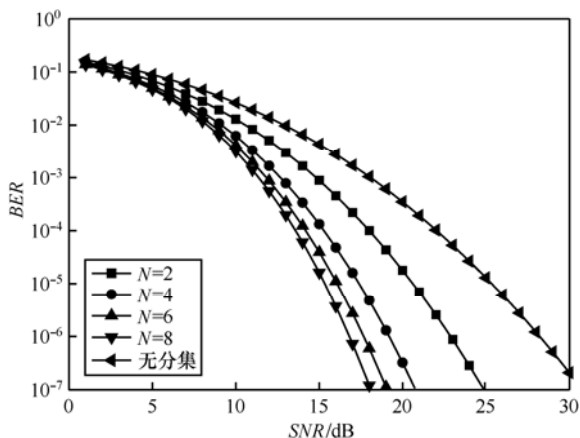


图 5 不同接收天线数 N 下等增益合并误码率

图 6 对 3 种接收分集技术的分集增益进行了比较, 本文采用 20 阶埃尔米特多项式进行计算, 对数光强方差 $\sigma_i^2 = 0.1$ 和 0.3 。这里, 定义在某一定光强闪烁方差 σ_i^2 和接收天线数 N 情况下, 误码率达到 10^{-6} 时, 3 种合并系统与无分集系统相比信噪比 γ 的改善程度, 即分集增益。由图 6 可以看出, 随着接收天线数目 N 的增大, 3 种合并技术的分集增益均增大, 其中, 在 $\sigma_i^2 = 0.3$ 时, MRC 分集增益最大, 其次是 EGC, 而选择合并最低。且随着光强闪烁方差的增大, 分集增益也增大, $\sigma_i^2 = 0.3, N=5$ 时 EGC 分集增益为 9.3, 而 $\sigma_i^2 = 0.1$ 时却只达到 4.7。另一方面, 当 $\sigma_i^2 = 0.1$ 取值较小时, 接收天线个数 $2 \leq N \leq 10$ 时, Selc 分集增益为负数约为 $-1 \sim -7\text{dB}$, 这是因为弱湍流情况下, N 因子引入导致接收光强的减小相对于湍流导致光强闪烁更严重。因此, 对短距离 FSO 链路且弱光强闪烁下, 不建议系统空间分集接收采用选择合并方式。

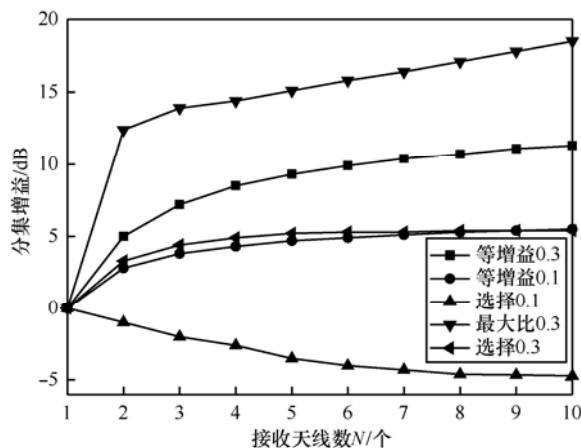


图 6 3 种合并方式的分集增益比较

6 结束语

本文研究了空间接收分集的 3 种线性合并技术即等增益、最大比和选择性合并。给出了基于 BPSK 调制的无线光通信系统对这 3 种空间分集接收合并的误码率模型, 并进行了仿真分析。在相同接收天线数和光强闪烁方差下, 3 种合并技术中, 误码率性能改善最优的是 MRC, 其次是 EGC, 而 SelC 较差。随着接收天线数目 N 的增大, 3 种合并技术的分集增益均增大, 其中, 在 $\sigma_i^2 = 0.3$ 时, MRC 分集增益最大, 其次是 EGC, 而选择合并最低。在弱光强闪烁下, 不建议空间分集选用选择合并方式。结果表

明,3种分集合并技术都可以有效地改善无线光通信系统误码性能,具有较强的抗大气信道衰落能力。

参考文献:

- [1] 陈纯毅,杨华民,姜会林等. 大气光通信中大气湍流影响抑制技术研究进展[J]. 兵工学报,2009,30(6):779-791.
CHEN C Y, YANG H M, JIANG H L, *et al.* Research progress of mitigation technologies of turbulence effects in atmospheric optical communication[J]. *Introducing Journal of China Ordnance*, 2009, 30(6): 779-791.
- [2] ANDREWS C, RONALD L. Phillips impact of scintillation on laser communication systems: recent advances in modeling[A]. SPIE[C]. 2002. 23-34.
- [3] ZHU X M, Kahn Joseph M. Communication techniques and coding for atmospheric turbulence channels[J]. *J Opt Fiber Commun Rep*, 2007, (4):363-405.
- [4] 马晓珊,朱文越,饶瑞中. 湍流大气中光波闪烁的圆环孔径平均因子[J]. 光学学报,2007,27(9):1543-1547.
MA X SH, ZHU W Y, RAO R Z. Annular-aperture averaging factor of optical scintillations in turbulent atmosphere[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(9):1543-1547.
- [5] 王勇,于蕾,曹家年. 基于副载波相移键控强度调制和低密度奇偶校验码的光无线通信系统性能[J]. 光学学报,2009,29(12):3295-3298.
WANG Y, YU L, CAO J N. Performance of optical wireless communication system basing on the sub-carrier PSK intensity modulation and LDPC Code[J]. *Acta Optica Sinica*,2009,29(12):3295-3298.
- [6] LU Q, LIU Q, MITCHELL G S. Performance analysis for optical wireless communication systems using sub-carrier PSK intensity modulation through turbulent atmospheric channel[A]. *Proc IEEE Global Telecomm Conf*[C]. 2004.1872-1875.
- [7] 张贤达,保铮. 通信信号处理[M]. 北京:国防工业出版社,2000. 134-145.
ZHANG X D, BAO Z. *Communication Signal Processing*[M]. Beijing: Defense Industry Press, 2000.134-145.
- [8] MOHAMMAD N S. BER performance of free-space optical transmission with spatial diversity[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2007,6 (8): 2813-2819.
- [9] TOMAKI OHTSUKI. Turbo-coded atmospheric optical communication system[A]. *IEEE International Conference on Communications*[C]. 2002. 2938-2942.
- [10] POPOOLA W O, GHASSEMLOOY Z, ALLEN J I H, *et al.* Free-space optical communication employing subcarrier modulation and spatial diversity in atmospheric turbulence channel[J]. *IET Optoelectronic*, 2008,2:16-23.
- [11] GRADSHTEYN I S, RYZHIK I M. *Table of Integrals, Series, and Products*[M]. 5th ed, London: Academic Press, Inc, 1994.
- [12] SIMON M K, ALOUINI M S. *Digital Communication over Fading Channels*[M]. 2nd ed, New York: John Wiley & Sons Inc, 2004.

作者简介:



陈丹(1975-),女,陕西汉中人,博士,西安理工大学讲师,主要研究方向为大气激光通信、现代信号与信息处理。

柯熙政(1962-),男,陕西铜川人,西安理工大学教授、博士生导师,主要研究方向为大气激光通信、信号处理及现代导航技术。