

# 无线相干光通信空间分集接收合并技术

冷蛟锋<sup>1,2</sup> 郝士琦<sup>1,2</sup> 瞿福琪<sup>1,2</sup> 李金明<sup>1,2</sup> 周建国<sup>1,2</sup> 王勇<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 脉冲功率激光技术国家重点实验室(电子工程学院), 安徽 合肥 230037)

<sup>2</sup> 安徽电子制约技术重点实验室, 安徽 合肥 230037

**摘要** 空间分集接收能补偿大气湍流造成的信道衰落。在给出相干检测分集接收的系统模型和晴朗大气信道模型的基础上, 考虑子孔径间信号相关性, 分析了等增益合并分集和最大比合并分集的误码率性能, 并就中断概率与选择分集进行了比较。分析结果表明, 空间分集接收能够明显改善相干光通信系统的性能, 并且接收信号间的空间相关性越小分集接收的性能越好, 其中最大比合并分集性能相对其他两种合并方式优势明显, 选择分集性能最差, 但它与等增益合并分集的差距不大, 同时选择分集实现相对容易, 在工程应用中要综合考虑实现的难易程度和性能。

**关键词** 无线光通信; 相干探测; 分集接收; 大气湍流

中图分类号 TN929

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP49.010602

## Combination of Spatial Diversity Coherent Receivers for Wireless Optical Communication

Leng Jiaofeng<sup>1,2</sup> Hao Shiqi<sup>1,2</sup> Qu Fuqi<sup>1,2</sup> Li Jinming<sup>1,2</sup>

Zhou Jianguo<sup>1,2</sup> Wang Yong<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Electronic Engineering Institute, Hefei, Anhui 230037, China)

<sup>2</sup> Anhui Provincial Key Laboratory of Electronic Restriction, Hefei, Anhui 230037, China)

**Abstract** Spatial diversity reception can be used over wireless optical links to mitigate atmospheric turbulence. Based on the clear atmospheric channel model and the model of diversity coherent receivers for laser communication, considering the spatial correlation of received signals, the error rates of both equal gain combining (EGC) and maximum ratio combining (MRC) are analyzed, and the outage probability of them are compared with that of selection combining (SC). The impact of spatial correlation of received signals on the diversity of coherent laser communication system is studied. The less spatial correlation of received signals is, the better the diversity reception for coherent free-space laser communication is. Simulations show that diversity can improve the performance of coherent laser communication. The performance of MRC is much better than those of EGC and SC, but SC is simpler and more convenient. Both performance and feasibility should be considered in applications.

**Key words** wireless optical communication; coherent detection; diversity; atmospheric turbulence

**OCIS codes** 060.1660; 060.4510

## 1 引言

无线光通信系统由于具有信息容量大、组网机动灵活、无需频率申请、抗电磁干扰和保密性好等一系列优点, 近年来已成为国内外的研究热点<sup>[1]</sup>。传统的强度调制/直接探测(IM/DD)体制下无线光通信系统的抗背景光干扰性能弱, 探测灵敏度不高, 而相干检测技术因其能够大大提高接收机的灵敏度、中继距离以及

收稿日期: 2011-09-01; 收到修改稿日期: 2011-10-09; 网络出版日期: 2011-11-28

基金项目: 国家自然科学基金(60902017)和安徽省自然科学基金(1004060Q60)资助课题。

作者简介: 冷蛟锋(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事大气光通信方面的研究。E-mail: lengjiaofeng@Yahoo.cn

导师简介: 郝士琦(1963—), 女, 硕士, 教授, 主要从事大气激光通信和卫星通信技术等方面的研究。

E-mail: liu\_hsq@126.com

抗背景噪声性能,特别适用于码率在吉比特每秒(Gb/s)量级的无线光通信系统而备受关注<sup>[2~8]</sup>。但是由于大气的影响,特别是会造成相位起伏、光强闪烁等的大气湍流效应,造成信道衰落,严重影响无线相干光通信的性能,因此,如何克服大气影响成为实现无线相干光通信的关键问题。

大孔径接收、多孔径阵列接收和自适应光学等技术都被用于抑制或补偿大气湍流对激光传输的影响。其中阵列接收是一种空间接收分集技术,其小孔径接收器输出信号之和表现出与单个大孔径接收器类似的闪烁平滑效果,可以抑制大气湍流的影响<sup>[4]</sup>。多孔径接收器因为安装和调试更加方便灵活,在 IM/DD 体制下已经被应用于深空光通信中<sup>[9]</sup>。Fernández 等<sup>[5,6]</sup>进行了一系列脉冲位置调制(PPM)的相干光通信实验,证实相干检测-分集接收可有效补偿大气湍流。文献[7]比较了分集相干接收与分集非相干光通信系统的性能,证明了分集相干接收具有更优异的性能。文献[8]研究了多进制相移键控(MPSK)调制最大比合并方式的相干检测分集接收的光通信系统性能。但 MPSK 调制的光通信系统需要光学锁相环,在大气湍流影响下实现起来比较复杂。差分相移键控(DPSK)调制利用前后相邻码元的载波相对相位变化传递数字信息,在一定程度上可以缓解大气信道衰落<sup>[10]</sup>。文献[11]研究了 DPSK 调制的无线光通信系统的性能,证明了 DPSK 调制相对于开关键控(OOK)有更好的性能。而目前关于子孔径间信号相关性对无线相干光通信空间分集接收性能影响的研究还未见报道,本文在弱湍流条件下,考虑子孔径间信号相关性,研究分集接收中不同合并方式的性能。

## 2 信道及系统模型

### 2.1 信道模型

激光在大气中传输受到大气分子、气溶胶粒子和各种固态或液态微粒的吸收、散射作用;大气气压、温度、湿度等的变化导致光学折射率的变化,引起激光信号在传输过程中光强闪烁、相位起伏等大气湍流效应。在恶劣的气候环境条件下(如雨、雪、雾和大风等),粒子散射、吸收和强大气湍流会引起严重的功率衰减、码间串扰和探测信号的随机起伏,从而导致无线光通信系统不能稳定工作。

这里设信道是晴朗大气信道<sup>[5]</sup>,不考虑有雨、雪和雾的情况,大气湍流为弱湍流。小孔径接收机的天线尺寸  $D$  远小于 Fried 参数,因而接收机接收到的波前相位可认为是相同的。通常情况下,接收机口径  $D$  小于菲涅耳尺寸  $\sqrt{\lambda L}$ <sup>[12]</sup>,可以看成是点接收,所以单个接收机接收到的光强满足对数正态分布。另外,接收端光场还是时间的随机变量,但由于通信的码速率至少在兆赫兹以上,远高于大气湍流相关频率<sup>[13]</sup>,因此可以认为激光传输每 1 bit 信号时,大气是“冻结”的。

此外,在晴朗大气信道条件下,接收机还受到较强的背景噪声干扰。这些噪声来自太阳、月球和天空反射等,都可以认为是加性高斯白噪声。

### 2.2 系统模型

研究的相干检测分集接收系统采用 DPSK 调制外差探测差分相干解调方案,其系统模型如图 1 所示。探测器面积为  $A$ ,每一支路的本振(LO)信号都相等,均为  $E_L \sin(\omega_0 t + \phi_0)$ 。设第  $k$  支路的信号光电场强度为  $E_k \sin(\omega_s t + \phi_s)$ ,背景光信号为  $n(t)$ 。由于探测器只响应接收信号直流功率分量以及本振光的差频信号,而对于倍频或两者频率之和的部分都不予响应,背景噪声与本振信号不相干,从而也会被抑制,则采用平方律探测器混频后第  $k$  支路输出的光电流为<sup>[14]</sup>

$$i_k(t) = \frac{e\eta A}{2h\nu} [E_L^2 + E_k^2 + \langle n^2 \rangle + 2E_L E_k \cos(\omega_{IF} t + \phi_0 - \phi_s)], \quad (1)$$

式中  $e$  为单位电荷电量,  $\eta$  为探测器量子效率,  $h\nu$  为单个

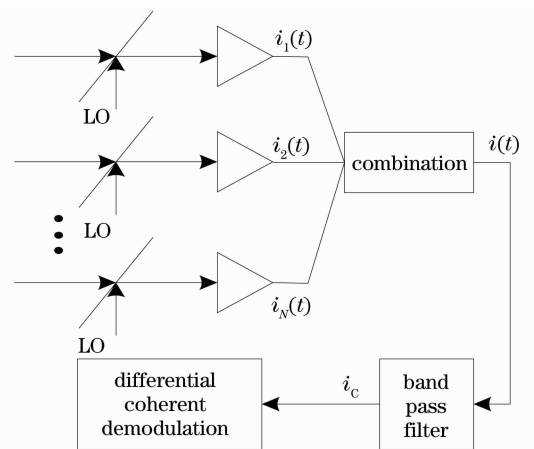


图 1 相干检测分集接收系统模型图

Fig. 1 Model of diversity coherent receivers

光子能量,  $\omega_{\text{IF}} = \omega_0 - \omega_s$ ,  $\phi_s \in \{0, \pi\}$  是相位信息,  $\langle \cdot \rangle$  表示系综平均。然后经合并输出电流  $i(t)$ , 再进行中频滤波。由于  $E_c^2$  远大于  $E_s^2$  及  $\langle n^2 \rangle$ , 所以与本振信号的强直流响应引起的散粒噪声相比, 相干探测时探测器的其他噪声可以忽略。设合并以后的交流信号的振幅是  $i_c$ , 本振信号产生的直流电流是  $I_{\text{DC}}$ , 中频带宽为  $B$ 。中频滤波后可得瞬时信噪比(SNR)为

$$\gamma = \frac{i_c^2}{2eBI_{\text{DC}}}. \quad (2)$$

采用差分相干解调方式, DPSK 解调的瞬时误码率(BER)为<sup>[15]</sup>

$$P_e = \frac{1}{2} \exp(-\gamma) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{i_c^2}{2eBI_{\text{DC}}}\right). \quad (3)$$

但是由于大气湍流的影响, 接收到的信号忽高忽低, 系统的平均误码率和中断概率更能反映通信系统的性能。

### 3 差错性能

#### 3.1 误码率

等增益合并分集(EGC)和最大比合并分集(MRC)都在接收端有  $N$  个接收机, 对这  $N$  个支路信号相加, 使接收机能够利用在各个支路同时接收到的信号, 从而保持从一组不可接收的输入信号中产生一个可接收的输出信号的可能性。它们的区别在于 EGC 的加权系数是常量, MRC 的加权系数与包络成正比例关系。

在弱湍流信道条件下, 接收功率  $P_k = P_{k0} \exp[2(X_k - \langle X_k \rangle)]$ <sup>[16]</sup>,  $P_{k0}$  是无大气湍流影响时接收端接收到的光功率,  $X_k$  是对数振幅起伏, 服从正态分布。EGC 的瞬时信噪比  $\gamma_0$  为

$$\gamma_0 = \frac{R \left( \sum_{k=1}^N \sqrt{P_k} \right)^2}{eBN}, \quad (4)$$

式中  $R = e\eta/(h\nu)$ 。注意(4)式是与 IM/DD 光通信系统有根本区别的。把(4)式代入(3)式, 可得 EGC 的平均误码率为

$$R_{\text{BE}} = \int_{\mathbf{X}} P_e(\mathbf{X}) P_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) d\mathbf{X}, \quad (5)$$

式中  $\mathbf{X}$  是关于  $X_k$  的  $N$  维向量,  $X_k$  是第  $k$  个子口径处的光波对数振幅。由 Rytov 湍流理论可知,  $X_1, X_2, \dots, X_N$  服从联合正态分布, 其联合概率密度为

$$P_{\mathbf{X}}(\mathbf{X}) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} |\mathbf{C}_X|^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \mathbf{Q} \cdot \mathbf{C}_X^{-1} \cdot \mathbf{Q}^T\right), \quad (6)$$

式中  $\mathbf{Q} = [(X_1 - \langle X_1 \rangle), (X_2 - \langle X_2 \rangle), \dots, (X_N - \langle X_N \rangle)]$ ,  $\mathbf{C}_X$  为同一时刻  $N$  个子口径间的对数振幅协方差矩阵, 具体形式为

$$\mathbf{C}_X = \sigma_X^2 \begin{bmatrix} 1 & b_X(d_{12}) & \cdots & b_X(d_{1n}) \\ b_X(d_{21}) & 1 & \cdots & b_X(d_{2n}) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ b_X(d_{n1}) & b_X(d_{n2}) & \cdots & 1 \end{bmatrix}_{n \times n}, \quad (7)$$

式中  $\sigma_X^2$  是对数振幅方差。正规化对数振幅协方差函数  $b_X(d_{ij}) = B_X(X_i, X_j)/B_X(X_i, X_i)$ 。

MRC 的瞬时信噪比  $\gamma_1$  为

$$\gamma_1 = \sum_{k=1}^N \gamma_k, \quad (8)$$

式中  $\gamma_k$  表示第  $k$  个接收机的瞬时信噪比。同理可以求出 MRC 的平均误码率。

#### 3.2 中断概率

对于高码率大气光通信系统, 大气信道是有记忆的, 衰落引起的误码率也不是独立的。中断概率<sup>[12]</sup>也是衡量光通信系统的重要指标。中断概率定义为短时间(小于强度起伏相关时间)内误码率  $P_e$  大于接收机误码率门限  $P_{\text{th}}$  的概率。EGC 和 MRC 的中断概率都可表示为

$$P_{\gamma_0}(o) = \int_{P_e > P_{th}} P(\mathbf{X}) d\mathbf{X}. \quad (9)$$

选择分集(SC)是对  $N$  条支路信号进行分析,然后通过逻辑选择信噪比最大的一条支路作为接收信号的输出,其中断概率为

$$P_{\gamma_S}(o) = \int_{p_1 > P_{th}} \cdots \int_{p_N > P_{th}} P(\mathbf{X}) d\mathbf{X}, \quad (10)$$

其中  $p_k (1 \leq k \leq N)$  是第  $k$  支路信噪比条件下所对应的误码率。

### 3.3 数值计算

孔径数  $N$  和子孔径接收信号间的空间相关都是影响分集接收性能的重要因素,下面利用蒙特卡罗积分方法分析不同接收孔径数情况下 EGC、MRC 的平均误码率和 EGC、MRC、SC 的中断概率以及不同的空间相关条件下 EGC、MRC、SC 的误码率性能。设每支路的平均信噪比  $\bar{\gamma} = RP_{k0}/(eB)$ 。图 2 给出了 EGC 和 MRC 相干检测分集接收光通信系统误码率与平均信噪比的关系曲线,仿真参数为:正规化对数振幅协方差函数  $b_X(d_{ij}) = 0.4, \sigma_X^2 = 0.16$ 。从图中可以看出,与单个孔径接收相比,分集接收方式可以使系统的误码率性能得到明显改善,当  $N$  分别等于 1, 2, 3, 平均信噪比为 30 dB 时,EGC 对应的误码率分别约为  $3.6 \times 10^{-4}$ ,  $8.2 \times 10^{-6}$ ,  $4.9 \times 10^{-7}$ ;另外, MRC 系统性能随着孔径数的增多比 EGC 改善得更快,  $N=2$  的 MRC 与  $N=3$  的 EGC 性能相当。

图 3 给出了多孔径相干接收光通信系统的中断概率,其中误码率门限为  $10^{-6}$ ,其余参数与图 2 的参数一致。由图 3 可知,在同等条件下,SC 的中断概率最高,EGC 次之, MRC 最低。但是 MRC 需要探测信道衰落的相位和幅度信息,系统复杂,不容易实现;EGC 也需要探测信道衰落的相位信息,实现起来也比较复杂;而 SC 实现较简单,其中断概率与同等条件下的 EGC 相差不大。另外可以通过增加孔径数量提高相干光通信系统性能,  $N=3$  的 SC 性能优于  $N=2$  的 EGC 的性能。

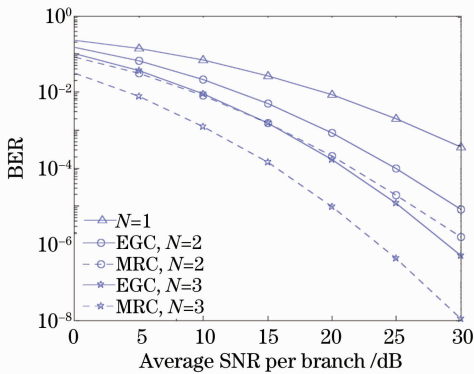


图 2 EGC 和 MRC 相干检测分集接收误码率比较

Fig. 2 Comparison of BERs between coherent EGC and MRC diversity reception

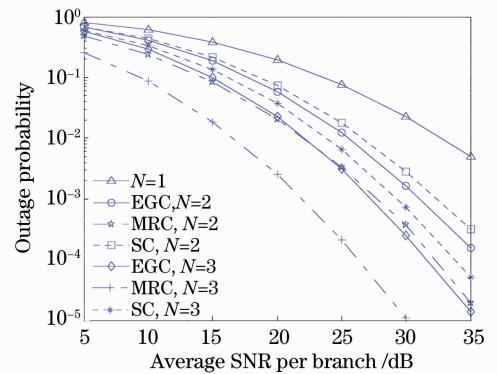


图 3 不同分集方式中断概率比较

Fig. 3 Comparison of outage probability among coherent MRC, EGC and SC diversity reception

图 4 给出了不同协方差系数下,  $N=3$  的 EGC、MRC 和 SC 相干光通信系统的中断概率曲线。通过比较可以看出,子孔径信号间的空间相关性对相干检测分集接收光通信系统影响很大,信号间的相关性越小,对大气湍流效应的抑制效果越好;随着信号相关性的减小, MRC 获得的增益最高, SC 最少,但是与 EGC 的差距并不大。当  $\sigma_X^2 = 0.16$ , 平均信噪比为 20 dB 时, EGC、MRC 和 SC 在对数振幅协方差  $b_X = 0$  的中断概率性能相对于  $b_X = 0.8$  的增益分别为 14.46, 25.72, 12.4 dB。

图 5 给出了不同湍流强度下不同合并方式的中断概率,其中  $N=3, b_X = 0.4$ 。由图可知,在不同湍流强度下, MRC 相对于 EGC 和 SC 的性能优势明显,但是随着湍流强度的增加,不同合并方式的系统性能损失基本相当,在中断概率为  $10^{-4}$  时,  $\sigma_X^2 = 0.3$  情况下的 MRC 相对于  $\sigma_X^2 = 0.16$  和  $\sigma_X^2 = 0.04$  分别有 1.4, 1.1 dB 的性能损失;类似地, EGC 有 1.3, 1.1 dB 的损失; SC 有 1.4, 1.3 dB 的性能损失。

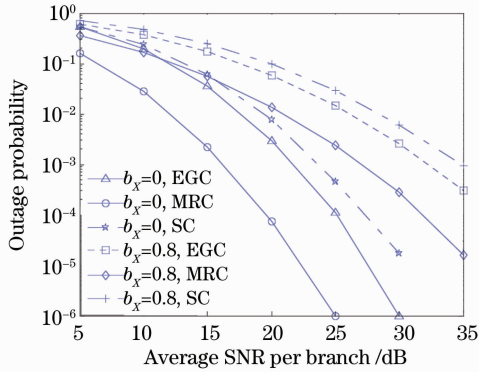


图4 不同协方差系数下各种合并方式的中断概率

Fig. 4 Comparison of outage probability among coherent MRC, EGC and SC diversity reception with different correlation coefficients

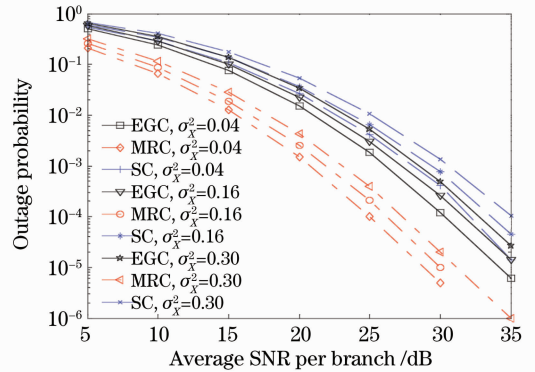


图5 不同湍流强度下各种合并方式的中断概率

Fig. 5 Comparison of outage probability among coherent MRC, EGC and SC diversity reception with different turbulent conditions

## 4 结 论

相干检测能提高接收机灵敏度和抗背景光干扰能力,适用于码率在吉比特每秒量级的无线光通信系统,但必须抑制大气湍流引起的信道衰落。接收分集是解决信道衰落的有效方法之一。在建立相干检测分集接收系统模型的基础上,考虑晴朗大气信道模型,分析了 EGC 和 MRC 的差错性能,并就中断概率与 SC 进行了比较。仿真结果表明,分集接收能够明显改善相干光通信系统的性能,并且接收信号间的空间相关性越小分集接收的性能越好,其中 MRC 性能最好,SC 性能最差,但它与 EGC 的差距不大,并且实现相对容易。在实际工程应用中要综合考虑实现的难易程度和性能。

## 参 考 文 献

- 1 Valdimir V. Nkiulin, Rahul Khandekar. Performance of laser communication uplinks and downlinks in the presence of pointing errors and atmospheric distortions [C]. *SPIE*, 2005, **5712**: 37~43
- 2 Aniceto Belmonte, Joseph M. Kahn. Effects of atmospheric compensation techniques on the performance of synchronous receivers[C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 74640R
- 3 Aniceto Belmonte, Alejandro Rodriguez, Federico Dios *et al.*. Phase compensation considerations on coherent free space laser communications system[C]. *SPIE*, 2007, **6736**: 67361A
- 4 Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Impact of scintillation laser communication systems; recent advances in modeling [C]. *SPIE*, 2002, **4489**: 23~34
- 5 M. M. Fernández, V. A. Vilnrotter. Coherent optical receiver for PPM signals received through atmospheric turbulence; performance analysis and preliminary experimental results[C]. *SPIE*, 2004, **5338**: 151~162
- 6 M. M. Fernández, V. A. Vilnrotter, R. Mukai *et al.*. Coherent optical array receiver experiment; design, implementation and BER performance of a multichannel coherent optical receiver for PPM signals under atmospheric turbulence[C]. *SPIE*, 2006, **6105**: 61050R
- 7 ETTY J. Lee, Vincent W. S. Chan. Diversity coherent receivers for optical communication over the clear turbulent atmosphere[C]. 2007 IEEE International Conference on Communications, 2007, 2485~2492
- 8 Ming Bo, Julian Cheng, Jonathan F. Holzman. Diversity reception for coherent free-space optical communications over K-distributed atmospheric turbulence channels[C]. 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2010
- 9 Hamid Hemmati. Deep Space Optical Communications[M]. Wang Ping, Sun Wei Transl.. Beijing: Tsinghua University Press, 2009. 45~46
- 10 Hamid Hemmati. 深空光通信[M]. 王平,孙威译.北京:清华大学出版社,2009. 45~46
- 11 Z. Wang, W.-D. Zhong, S. Fu *et al.*. Performance comparison of different modulation formats over free-space optical (FSO) turbulence links with space diversity reception technique[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, **1**(6): 276~285
- 12 Song Gao, Anhong Dang, Hong Guo. Performance of wireless optical communication systems using DPSK modulation[C]. 11th International Conference on Advanced Communication Technology, 2009, 1793~1796

- 12 E. J. Lee, V. W. S. Chan. Optical communication over the clear turbulent atmospheric channel using diversity [J]. *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, 2004, **22**(9): 1896~1906
- 13 Zoran Sodnik, Josep Perdigues Armengola, Reinhard H. Czichyb *et al.*. Adaptive optics and ESA's optical ground station [C]. *SPIE*, 2009, **7464**: 746406
- 14 An Yuying, Zen Xiaodong. Theory of Photoelectricity Detection[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2004. 157  
安毓英, 曾晓东. 光电探测原理[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2004. 157
- 15 Fan Changxin, Cao Lina. Communication Theory (6th ed.) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2006. 205~211  
樊昌信, 曹丽娜. 通信原理(第6版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2006. 205~211
- 16 Chen Chunyi. Study on Mechanism and Mitigation Technology of Atmospheric Effects in Optical Wireless Communications [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2009. 51~52  
陈纯毅. 无线光通信中的大气影响机理及抑制技术研究[D]. 长春:长春理工大学, 2009. 51~52