

大气信道部分相干光通信链路性能分析与优化

陈纯毅, 杨华民, 姜会林, 冯欣, 王辉

(长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林长春 130022)

摘要: 针对使用开关键控的强度调制/直接检测部分相干光链路, 建立了信道容量、信道误码率以及链路中断概率的数学分析模型. 在此基础上, 分别对完全相干光和部分相干光链路的信道容量、信道误码率以及链路中断概率进行了计算和对比分析. 给出了发射功率受限时, 光束初始相干度的优化选取模型. 在大气湍流信道中, 部分相干光通信的性能优于完全相干光通信, 部分相干光传输是一种有效的大气湍流影响抑制技术.

关键词: 信道容量; 误码率; 中断概率; 无线光通信; 部分相干光

中图分类号: TN929.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2009) 08-1869-04

Performance Analysis and Optimization of Partially Coherent Optical Communication Links Through Atmospheric Channel

CHEN Chun-yi, YANG Hua-min, JIANG Hui-lin, FENG Xin, WANG Hui

(Key Laboratory of Ministry of Education for Photoelectric Measuring & Control and Optical Information Transfer Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)

Abstract: Focusing on intensity-modulation/ direct-detection (IM/DD) partially coherent optical links using the on-off-keying scheme, the analytic models of channel capacity, channel bit-error-rate and link outage probability were established. On the basis of these models, the calculations of channel capacity, channel bit-error-rate and link outage probability for both fully and partially coherent optical links were performed, and then the comparative analysis for the two types of links was presented. The optimization model for the initial coherent degree of a laser was proposed with the situation when the transmitted power was limited. The performance of optical links through atmospheric turbulence using partially coherent beams is better than fully coherent beams, and propagation using a partially coherent beam is an effective technique for mitigating the turbulence-induced impact.

Key words: channel capacity; bit error rate; outage probability; optical wireless communication; partially coherent beam

1 引言

当激光信号在大气中传输时, 大气湍流导致接收机收到的信号光强忽高忽低、上下起伏, 即所谓的光闪烁现象, 这会明显地降低无线光通信链路的性能. 在大气湍流中传输时, 部分相干光的光强起伏比完全相干光小. 因此, 近年来部分相干光在无线光通信应用中受到广泛的关注. 本文将首先对大气信道中的部分相干光通信链路进行建模, 分析信道容量、误码率及中断概率等链路性能, 然后给出部分相干光初始相干度的优化选取模型, 为通信光源的设计提供支持.

2 部分相干光在大气湍流中的传播

大气湍流引起激光振幅和波前发生随机起伏, 造成接收机收到的光信号出现随机衰落. 闪烁指数(即光强

起伏方差)定义为 $\sigma_I^2 = \langle (I - \langle I \rangle)^2 \rangle / \langle I \rangle^2$, 其中 I 为光强, $\langle \cdot \rangle$ 表示系综平均. Korotkova 等^[1]使用随机相位屏方法来建模部分相干高斯光束, 给出的在弱湍流区中接收面上的轴上闪烁指数为

$$\sigma_{I,w}^2 = 3.86 \sigma_I^2 \operatorname{Re} \left[i^{5/6} {}_2F_1 \left(-\frac{5}{6}, \frac{11}{6}; \frac{17}{6}; 1 - \Theta_e + i\Lambda_e \right) - \frac{11}{16} \Lambda_e^{5/6} \right] \quad (1)$$

式中 $\sigma_I^2 = 1.23 C_n^2 k^7 L^{11/6}$ 为 Rytov 方差, C_n^2 为大气折射率结构常数, L 为光束传播距离, $k = 2\pi/\lambda$ 为光波波数, λ 为波长, $i = \sqrt{-1}$, ${}_2F_1(\cdot)$ 为超几何函数, Re 表示取复数的实部, $\Theta_e = \Theta_1/(1 + 4q_c\Lambda_1)$ 和 $\Lambda_e = \Lambda_1 N_s/(1 + 4q_c\Lambda_1)$ 为部分相干高斯光束接收平面上的有效光束参数, N_s 为发射光束横截面内的散斑个数, $q_c = L/(kl_c^2)$, l_c 为相位屏的横向相关长度(其决定了光束的初始相干度), Θ_1 和 Λ_1 为完全相干高斯光束的接收面光束参

收稿日期: 2008-08-22; 修回日期: 2009-05-11

基金项目: 国家自然科学基金(No. 60677009); 吉林省自然科学基金(No. 20070527); 吉林省教育厅“十一五”项目(No. 2007294)

数^[2].

对于从弱至强的整个湍流区,部分相干高斯光束的轴上闪烁指数为^[1]

$$\sigma_I^2 = \exp(\sigma_{\ln x}^2 + \sigma_{\ln y}^2) - 1 \quad (2)$$

式中 $\sigma_{\ln x}^2$ 和 $\sigma_{\ln y}^2$ 分别为大尺度湍流起伏方差和小尺度湍流起伏方差. 基于大尺度湍流调制小尺度湍流的假设, Andrews 等^[2]提出使用 Gamma-Gamma 分布来建模从弱至强湍流区的光强起伏概率密度

$$p_I(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I), I > 0 \quad (3)$$

式中 $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 为第二类 $(\alpha - \beta)$ 阶 Bessel 函数, Gamma-Gamma 函数的参数 $\alpha = 1/[\exp(\sigma_{\ln x}^2) - 1]$ 和 $\beta = 1/[\exp(\sigma_{\ln y}^2) - 1]$.

3 链路性能分析

3.1 信道容量

为了评价部分相干光传输信道的利用率,得出每个信道符号能无错误传送的最大信息量,需要计算信道容量. 相对于通信速率,大气湍流引起的光信号衰落是一个缓变过程,可以把大气光传输信道建模为无记忆静态各态历经时变信道^[3]. 对于强度调制/直接检测 (IM/DD) 大气光通信链路,信道的探测模型为

$$Y = S \cdot X + N \quad (4)$$

式中 Y 为探测器输出电流, $S = \eta \cdot I$ 为瞬时信号强度增益 (即信道状态), η 为探测器光电转换系数, I 为湍流导致的归一化起伏光强 ($I \geq 0$), X 为发送的二进制数据 ($X \in \{0, 1\}$), N 是均值为零、方差为 σ_n^2 的加性高斯白噪声. 二进制输入连续输出信道的容量可定义为: 对于所有的输入分布, X 与 Y 的最大互信息量. 在本文中,输入分布为二项式分布,信道的互信息量可写为^[4]

$$I(Y; X) = \int_{-\infty}^{\infty} \sum_{x=0}^1 \left[f_Y(y|x) p_X(x) \log_2 \frac{f_Y(y|x)}{\sum_{z=0}^1 f_Y(y|z) p_X(z)} \right] dy \quad (5)$$

式中 $f_Y(y|x)$ 为在给定输入 X 后输出 Y 的条件概率密度函数, $p_X(x)$ 为 $X = x$ 的概率. 条件概率密度函数 $f_Y(y|x=0)$ 为

$$f_Y(y|x=0) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_n^2}\right] \quad (6)$$

条件概率密度函数 $f_Y(y|x=1)$ 为 Gamma-Gamma 分布与高斯分布的卷积

$$f_Y(y|x=1) = \int_0^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_n^2}} \exp\left[-\frac{(y-\eta I)^2}{2\sigma_n^2}\right] p_I(I) dI \quad (7)$$

信道容量 C 可写为

$$C = \max_{p_X(X)} I(Y; X) \quad (8)$$

注意,由于光强起伏服从 Gamma-Gamma 分布,所以计算信道容量时的最优输入分布将随湍流强度的改变而变化. 定义接收机平均输出信噪比 $\langle SNR \rangle = \eta \langle I \rangle / \sigma_n$, 其中 $\langle I \rangle$ 为平均接收光强. 部分相干高斯光束在大气湍流中传播距离 L 之后,接收面上与光束中心相距 r 处的平均光强可写为

$$\langle I(r) \rangle = \frac{I_0 W_0^2}{W_e^2} \exp\left[-\frac{2r^2}{W_e^2}\right] \quad (9)$$

式中 I_0 为初始发射光强, W_0 为发射光束的束腰半径, W_e 为接收平面上的有效光束半径 (强湍流条件下见文献[1]中式(36), 弱湍流条件下见文献[5]中式(46)).

接收口径的孔径平均效应能在一定程度上减小大气湍流引起的激光光强闪烁. 本文重点分析部分相干光对改善光通信链路性能的作用,为了在分析中排除孔径平均因素的影响,在数值计算中将只考虑点接收的情形.

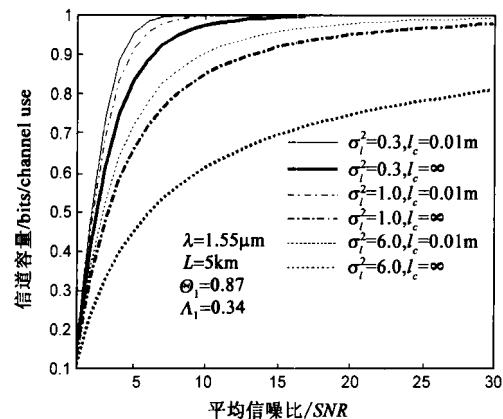


图1 平均信噪比与信道容量之间的关系

在此使用 Monte Carlo 积分法来求解式(5). 当 Rytov 方差 σ_r^2 分别为 0.3、1.0 和 6.0 时,使用部分相干光 ($l_c = 0.01\text{m}$) 和完全相干光 ($l_c = \infty$) 传输,信道容量与平均信噪比之间的关系如图 1 所示. 由图 1 可知: (1) 信道容量随平均信噪比的增加而增加; (2) 在相同的平均信噪比下,随着湍流强度的增强 (Rytov 方差增大),信道容量很快降低; (3) 在相同平均信噪比下,部分相干光的信道容量比完全相干光的信道容量大,而且湍流越强,这种信道容量的提升越明显.

3.2 信道误码率

假设接收机已知湍流导致的信号衰落的概率分布,但未知信号的瞬时衰落值. 当发送码元“1”时,探测器输出电流 Y 的概率密度函数为 $f_Y(y|x=1)$; 当发送码元“0”时,探测器输出电流 Y 的概率密度函数为 $f_Y(y|x=0)$. 根据最大后验概率准则,发送码元 x 的最佳判决为

$$\hat{x} = \arg \max_x f_Y(y|x) p_X(x) \quad (10)$$

如果发送码元“1”和“0”的概率是相等的,则

$$\hat{x} = \arg \max_x f_Y(y|x) \quad (11)$$

接收机的似然比函数可以写为

$$\Lambda(y) = \frac{f_Y(y|x=1)}{f_Y(y|x=0)} = \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(\gamma-\eta I)^2 - \gamma^2}{2\sigma_n^2}\right] \frac{2(\alpha\beta)^{(\alpha+\beta)/2}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot I^{(\alpha+\beta)/2-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I) dI \quad (12)$$

对于开关键控(OOK)调制方式,假设发送码元“1”和“0”的概率相等,则信道的误码率为

$$p_e = \frac{1}{2} [p_{e0} + p_{e1}] \quad (13)$$

式中 p_{e0} 为发送码元“0”时接收误码的概率, p_{e1} 为发送码元“1”时接收误码的概率. 忽略码间串扰,可得

$$p_{e0} = \int_{\Delta > 1} f_Y(y|x=0) dy \quad (14)$$

$$p_{e1} = \int_{\Delta < 1} f_Y(y|x=1) dy \quad (15)$$

取激光波长 λ 为 $1.55\mu\text{m}$, 传输距离 L 为 5km . 当 Rytov 方差 σ_I^2 分别为 0.3 、 1.0 和 6.0 时,使用部分相干光和完全相干光传输,信道误码率与平均信噪比之间的关系如图 2 所示. 由图 2 可知:(1)误码率随平均信噪比的增加而减小;(2)使用完全相干光传输,即使在弱湍流区($\sigma_I^2=0.3$)、 $\langle SNR \rangle = 30$ 时,系统误码率也高于 10^{-5} ;(3)使用部分相干光传输,在弱湍流区、 $\langle SNR \rangle = 16$ 时,系统误码率已低于 10^{-7} ;(4)在中等强度湍流和强湍流区,部分相干光相对于完全相干光的信道误码率性能也有明显的改善.

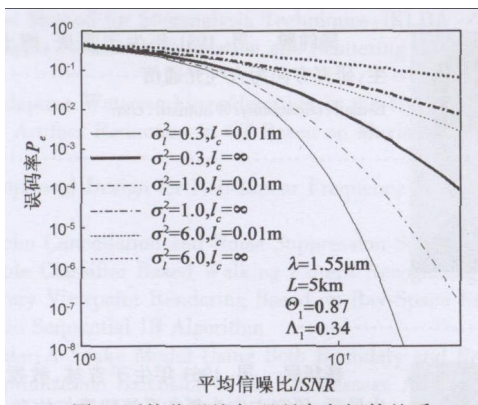


图2 平均信噪比与误码率之间的关系

3.3 链路中断概率

大气信道光通信链路的中断概率是设计数字通信网络层和传输层协议时必须考虑的性能指标. 通常定义中断概率为接收机输出的瞬时信噪比 SNR 低于某一信噪比阈值 μ_{th} 的概率(即瞬时信噪比 SNR 不满足性能要求的概率). 定义瞬时信噪比 $SNR = \eta I / \sigma_n$, 所以中断概率可写为

$$p_{out} = \Pr\{\eta I / \sigma_n < \mu_{th}\} = \Pr\{I < \sigma_n \mu_{th} / \eta\}$$

$$= \int_0^{\sigma_n \mu_{th} / \eta} p_I(x) dx \quad (16)$$

定义归一化信噪比阈值 $\mu'_{th} = \mu_{th} / \langle SNR \rangle$. 取激光波长 λ 为 $1.55\mu\text{m}$, 传输距离 L 为 5km . 当 Rytov 方差 σ_I^2 分别为 0.3 、 1.0 和 6.0 时,使用部分相干光和完全相干光传输,链路中断概率与归一化信噪比阈值 μ'_{th} 之间的关系如图 3 所示. 由图 3 可知,链路的中断概率随湍流强度的增加而增加,但相同湍流强度下,部分相干光链路的中断概率比完全相干光链路小. 值得注意的是,不同湍流强度下,中断概率随 μ'_{th} 的增加而增大的速度不一样,可以发现对于较小的 μ'_{th} ,强湍流下部分相干光传输带来的中断概率性能改善比弱湍流明显.

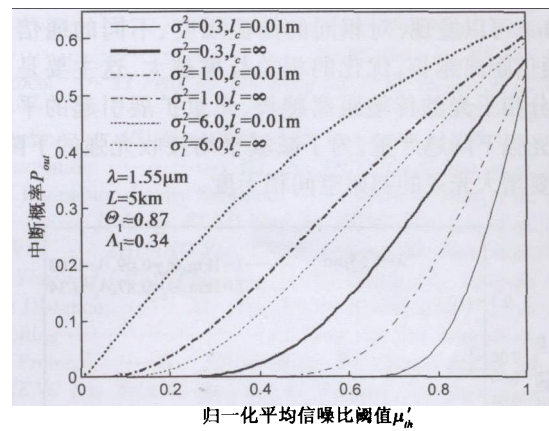


图3 部分相干光通信链路的中断概率

4 光束初始相干度的优化选取

光束初始相干度的降低,一方面可以减小闪烁指数 σ_I^2 ,但另一方面会使得光束发散更快,降低平均接收光强 $\langle I \rangle$. 所以在设计光束初始相干度时,需要在减小闪烁指数和提高平均接收光强二者之间进行折衷,以便获得最好的链路性能. 大气湍流导致的接收光信号衰落程度可用 $\delta = \langle I \rangle - \sigma_{I,s}$ 来表征,其中 $\sigma_{I,s}$ 表示接收光强的标准差, δ 越小表明接收光信号衰落越严重. 闪烁指数与接收光强的标准差之间的关系为 $\sigma_I^2 = \sigma_{I,s}^2 / \langle I \rangle^2$, 所以有 $\delta = \langle I \rangle (1 - \sigma_I)$. 可以看出 δ 同时依赖于闪烁指数和平均接收光强. 从减小接收光强衰落程度的角度出发, δ 可以作为一种光束初始相干度的寻优准则,即优化的光束初始相干度对应了最大的 δ 值^[6]. 在接收面上光束中心位置处,根据式(9), δ 可写为

$$\delta = \frac{I_0 W_0^2 (1 - \sigma_I)}{W_c^2} \quad (17)$$

注意, δ 实际上是相位屏相关长度 l_c 的函数. 光束初始相干度由相位屏相关长度决定,优化的相位屏相关长度 l_{opt} 可写为

$$l_{opt} = \max_l \delta \quad (18)$$

针对通信距离分别为 1km 和 5km 的部分相干光链路,图 4 给出了当激光发射功率受限时,优化的相关长度 l_{opt} 随湍流强度 (Rytov 方差) 的变化关系.由图 4 可知, l_{opt} 随湍流强度增强而减小,这表明在强湍流区需要更小的光束初始相干度来抑制湍流导致的光强闪烁.注意,对于相同的传输距离,不同大气折射率结构常数 C_n^2 值导致了不同的 Rytov 方差.通过计算可知:(1)通信距离为 1km,接收面光束参数 $\Theta_1 = 0.99$ 、 $\Delta_1 = 0.08$,当 Rytov 方差为 6.0 时,优化的相关长度 l_{opt} 为 0.0085m;(2)通信距离为 5km,接收面光束参数 $\Theta_1 = 0.87$ 、 $\Delta_1 = 0.34$,当 Rytov 方差为 6.0 时,优化的相关长度 l_{opt} 为 0.024m.可以发现,对相同的湍流强度、不同的通信距离,通信距离越长,优化的相关长度越大.这主要是因为部分相干光的传输距离越长,光束扩展引起的平均接收光强下降越严重,为了减缓平均接收光强的下降,就需要增大光束的初始空间相干度.

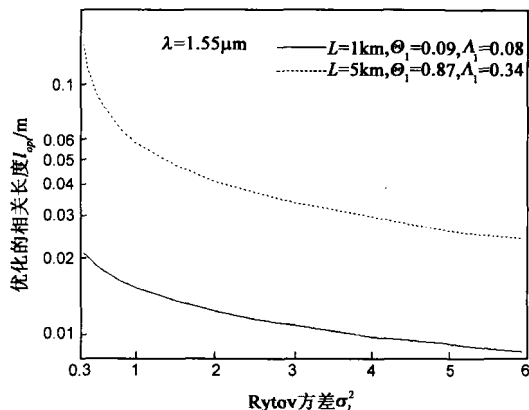


图4 优化的相关长度随湍流强度的变化关系

5 结论

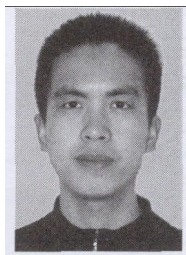
本文针对大气信道中的部分相干光通信链路,建立了信道容量、信道误码率和链路中断概率的数学分析模型,并对链路性能进行了计算.通过分析可知:部分相干光传输能有效地提高信道容量,降低信道误码率和链路中断概率,能有效地抑制大气湍流造成的链路性能下降.此外,本文研究了光束初始相干度的优化选取方法,其能最小化大气湍流导致的光信号衰落程度.通过计算发现:(1)优化的光束初始相干度随湍流强度的增加而减小;(2)对于相同的 Rytov 方差,通信距离越长,优化的光束初始相干度越大.部分相干光传输是一种有效的大气湍流影响抑制技术,具有较好的应

用前景.本文给出的链路性能分析模型和光束初始相干度优化选取方法可以为部分相干光通信链路的设计提供参考.

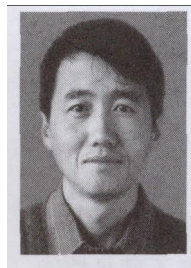
参考文献:

- [1] Olga Korotkova, Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Model for a partially coherent Gaussian beam in atmospheric turbulence with application in Lasercom [J]. Opt. Eng., 2004, 43 (2): 330 - 341.
- [2] Larry C Andrews, Ronald L Phillips. Impact of scintillation on laser communication systems: recent advances in modeling [A]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2002. 23 - 34.
- [3] H G Sandalidis, T A Tsiftsis. Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence [J]. Electron Lett, 2008, 44(1): 46 - 47.
- [4] Jaime A Anguita, Ivan B. Djordjevic, Mark A Neifeld, et al. Shannon capacities and error-correction codes for optical atmospheric turbulent channels [J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(9): 586 - 601.
- [5] Olga Korotkova, Larry C. Andrews, Ronald L. Phillips. Speckle propagation through atmospheric turbulence: effects of a random phase screen at the source [A]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2002. 98 - 109.
- [6] Xifeng Xiao, David Voelz. Toward optimizing partial spatially coherent beams for free space laser communications [A]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2007. 6709P - 1 - 6709P - 8.

作者简介:



陈纯毅 男, 1981 年生于重庆, 博士研究生, 研究方向为大气光通信
E-mail: chenchunyi@hotmail.com



杨华民 男, 1963 年生于吉林, 教授, 博士生导师, 研究方向为复杂系统建模与仿真.