

星地下行链路中多孔径相干光接收机性能分析

张晓玉¹, 崔晟^{2*}, 刘德明², 江阳^{1**}

¹ 贵州大学物理学院, 贵州 贵阳 550025;

² 华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 在考虑大气湍流效应、气象条件和孔径平均效应的条件下,对星地下行链路中基于等比合并算法的多孔径相干光接收机的性能进行研究,推导了其误码率(BER)分析模型,并基于该模型分析了各种湍流强度、气象条件和孔径大小对接收机灵敏度的影响。研究结果对于实际应用具有很好的指导意义。

关键词 大气光学; 大气湍流; 气象条件; 孔径平均; 等比合并; 误码率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.210101

Performance Analysis of Multi-Aperture Coherent Optical Receiver for Satellite-to-Ground Downlink

Zhang Xiaoyu¹, Cui Sheng^{2*}, Liu Deming², Jiang Yang^{1**}

¹ College of Physics, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

² School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract The performance of a multi-aperture coherent optical receiver based on the equal gain combining algorithm is analyzed for the satellite-to-ground downlink. Atmospheric turbulence, weather conditions, and aperture averaging effect are considered. The analytical model of bit error rate is deduced. Then the effects of the atmospheric turbulence, weather conditions, and aperture size on the sensitivity of the receiver are analyzed, which provides effective guidance for practical applications.

Key words atmospheric optics; atmospheric turbulence; weather conditions; aperture averaging; equal gain combining; bit error rate

OCIS codes 010.1330; 010.3920; 060.4510

1 引言

相比于卫星微波通信技术,卫星光通信技术具有传输容量大、传输速率高、传输距离远、保密性强和频谱资源丰富等优点,近年来在世界范围内掀起了一股研究热潮。目前,各国均推出了自己的研究计划,其中,具有代表性的包括欧洲的欧洲数据中继卫星系统(EDRS)计划、美国的激光通信中继演示(LCRD)计划、日本的激光数据中继卫星计划等^[1]。对于星地下行链路,光束在大气信道中传输时会受到湍流效应和气象条件的影响。大气湍流效应引起

的折射率随机起伏会导致信号光振幅和相位的随机波动,产生光强闪烁、光束扩展、光束漂移等现象。气象条件,如雾、云、雨雪等均会对光功率造成不同程度的衰减。对于星地下行长距离传输链路而言,光强闪烁和功率衰减会严重影响通信质量,对此必须进行深入的研究^[2-3]。

为了抑制大气湍流效应,在接收端可以采用自适应光学、孔径平均和空间分集技术^[4]。自适应光学技术较为复杂,不利于减小接收机尺寸、质量和功耗。孔径平均技术通过大孔径光学天线来提高接收光信号功率,减少大气湍流造成的信道衰落,其结构

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-04-25; 录用日期: 2019-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(61835003)、贵州省科技支撑计划(黔科合支撑[2016]2324)

* E-mail: cuisheng@hust.edu.cn; ** E-mail: jiangyang415@163.com

简单,但天线尺寸和质量均较大,制造难度高,焦平面器件散热困难,而且与光纤耦合容易受到大气湍流影响,需要配备复杂的自适应光学系统^[5]。空间分集技术可以很好地解决这些问题。在空间分集接收中,光信号通过独立衰落的信道到达接收机,因此各路信号同时处于深度衰落的概率很小,通过对各路光信号的合并可以有效抑制湍流效应并提高接收机的信噪比(SNR)^[6]。同时,空间分集接收还具有可靠性高、易于维护和升级的优点。在空间分集接收中,信号的组合方式包括最大比合并(MRC)、等比合并(EGC)和选择合并(SC)。EGC相比SC具有更好的性能,相比MRC更加简单,是一种更加实用的技术。采用相干光接收机的空间分集接收系统,通过对各路光信号相位的检测和对准,可实现对各路光信号的相干叠加。最近的研究表明,多孔径相干光接收机采用多个低成本的小孔径光学天线,可以达到与同等面积单个大孔径光接收机相同的接收SNR^[5]。

目前已有许多关于多孔径光接收机的研究,但是部分研究只考虑直接探测光接收机^[7-8]。一些研究虽然研究相干光接收机,但没有考虑气象条件的影响,而且仅对MRC和SC的合并方式进行了分析^[9-10]。此外,现有研究大都采用简单的点接收机模型,并未考虑光学天线实际孔径大小对系统性能的影响^[11-12]。针对这些问题,本文在考虑大气湍流效应、气象条件和光学天线实际尺寸的条件下,对星地下行链路中基于EGC算法的多孔径相干光接收机的性能进行了深入系统的研究,推导了其误码率(BER)分析模型,对比分析了各种湍流强度、气象条件和孔径大小对接收机灵敏度的影响,较以往的研究具有更好的实际指导意义。

2 系统与信道模型

对于星地下行链路,在卫星发射端可采用单孔径发射机以减少尺寸、质量和功耗,而在地面接收端则可以采用多孔径光接收机以增加接收面积并有效抑制湍流效应,其系统结构图如图1所示。为了研究BER性能,首先建立基于EGC算法的多孔径相干光接收机模型和大气信道模型。

2.1 接收机模型

在建立模型时,不考虑天线视场大小和天线相对位置。假设接收端各个孔径的光学天线间隔足够远,远大于大气相干长度(厘米量级),则各个支路的光信号在统计上服从独立同分布的大气衰落过程。

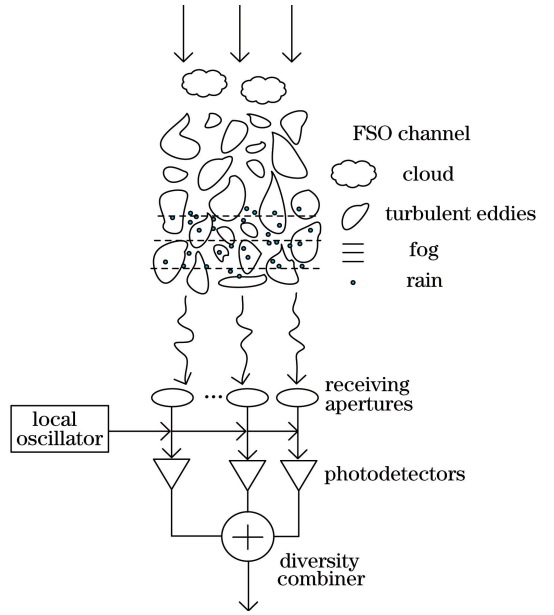


图1 下行链路自由空间光(FSO)通信多孔径相干光接收机结构图

Fig. 1 Structure diagram of multi-aperture coherent optical receiver for downlink free space optical (FSO) communication

对于单孔径相干光接收机,其输出信号SNR为^[9]

$$\gamma = \frac{RP_s}{q\Delta f} = \frac{RAI}{q\Delta f}, \quad (1)$$

式中: R 为光电探测器的响应度; q 为电子电荷; Δf 为光电探测器的等效带宽; P_s 为接收信号功率,是系单个孔径面积 A 与辐照度 I 的乘积。假设入射光均匀分布,对辐照度 I 归一化,用均值表示,即 $E[I]=1$,则平均SNR可以表示为

$$\bar{\gamma} = \frac{RA}{q\Delta f}. \quad (2)$$

对于采用EGC算法的多孔径相干光接收机,其SNR表达式为^[11]

$$\gamma_{EGC} = \bar{\gamma} \frac{\left(\sum_{l=1}^L \sqrt{I_l}\right)^2}{L}. \quad (3)$$

可以看出,SNR表达式与各路信号辐照度开方之和的平方成正比。由于接收端各个孔径光学天线的间隔远大于大气相干长度,假设不同路径光信号辐照度 $I_l(l=1, \dots, L)$ 是独立同分布的, l 为光学天线数量,则 $\bar{\gamma}$ 与平均接收功率 \bar{P}_s 的关系为^[13]

$$\bar{\gamma} = E[\gamma] = \frac{R}{q\Delta f} \bar{P}_s, \quad (4)$$

式中: $\bar{P}_s = E[P_s] = AE[I]$ 。

2.2 大气信道模型

光束在经过大气信道时,受大气湍流和气象条

件的共同影响,导致信号辐照度波动。当只考虑大气湍流时,若要分析其引起的光强闪烁,由于 Gamma-Gamma 分布适用于从弱到强的各种湍流条件^[14],因此采用 Gamma-Gamma 分布模型描述辐照度 I 的概率密度分布。此时,信号辐照度的概率密度函数(PDF)可表示为^[15]

$$f_t(I) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (I)^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1} K_{\alpha-\beta}(2\sqrt{\alpha\beta}I), I \geq 0, \quad (5)$$

式中: α, β 分别表示大尺度和小尺度湍流涡旋的有效个数; $\Gamma(\cdot)$ 为 Gamma 函数; $K_{\alpha-\beta}(\cdot)$ 是阶数为 $\alpha-\beta$ 的第二类修正贝塞尔函数。 α 和 β 分别表示为^[16]

$$\alpha = \left\{ \exp \left[\frac{0.49\sigma_R^2}{(1 + 1.11\sigma_R^{12/5})^{7/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (6)$$

$$\beta = \left\{ \exp \left[\frac{0.51\sigma_R^2}{(1 + 0.69\sigma_R^{12/5})^{5/6}} \right] - 1 \right\}^{-1}, \quad (7)$$

式中: σ_R^2 为 Rytov 方差,用于描述大气湍流的扰动强度。对于点接收机模型,Rytov 方差 $\sigma_R^2(0)$ 定义为^[17]

$$\sigma_R^2(0) = 2.25k^{7/6} \sec^{11/6}(\zeta) \int_{h_0}^H C_n^2(h) \cdot (h - h_0)^{5/6} dh, \quad (8)$$

式中: $k = 2\pi/\lambda$ 为波数, λ 为波长(nm); ζ 为天顶角; h 为高度的积分项; h_0 为接收端距地面的高度; H 为卫星高度。如果考虑实际尺寸光学天线产生的孔径平均效应,可以有效改善系统性能^[18]。 $\sigma_R^2(D)$ 的计算式为^[17]

$$\sigma_R^2(D) = 8.70k^{7/6} (H - h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \times \operatorname{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \cdot \left[\left(\frac{kD^2}{16H'} + i \frac{h - h_0}{H - h_0} \right)^{5/6} - \left(\frac{kD^2}{16H'} \right)^{5/6} \right] dh, \quad (9)$$

式中: D 为接收天线直径; $H' = (H - h_0) \sec \zeta$ 为链路长度。与高度有关的折射率结构参数 $C_n^2(h)$ 对应多种计算模型,本研究采用最为经典的 Hufnagel-Valley (H-V) 模型^[19],即

$$C_n^2(h) = 0.00594 \left(\frac{\omega}{27} \right)^2 (10^{-5}h)^{10} \exp\left(-\frac{h}{1000}\right) + 2.7 \times 10^{-16} \exp\left(-\frac{h}{1500}\right) + A_0 \exp\left(-\frac{h}{100}\right). \quad (10)$$

式中: ω 为风速; A_0 即 $C_n^2(0)$,为折射率参数。取 $\omega = 21$ m/s, $A_0 = 1.7 \times 10^{-14}$ m^{-2/3},对应 H-V_{5/7} 模型。

考虑到气象条件的空间作用范围远大于信号光束半径,因此假设接收端各个孔径光学天线接收光信号衰减相同。在此条件下,各种气象条件造成的传输损耗可由比尔-朗伯定律得到,传输透过率为^[20]

$$h_z = \exp(-\sigma z), \quad (11)$$

式中: z 为传输距离; σ 为衰减系数,与大气能见度 (V) 有关。这里,将 V 定义为一个物体的对比度下降到原来 2% 的大气传输距离,单位为 km。在给定工作波长条件下,采用最常用的 Kim 模型得到的衰减系数为^[21]

$$\sigma = \frac{3.91}{V} \left(\frac{\lambda}{550} \right)^{-\delta}, \quad (12)$$

式中: δ 为修正因子,是随 V 变化的系数,定义为

$$\delta = \begin{cases} 1.6, & \text{for } V \geq 50 \\ 1.3, & \text{for } 6 \leq V < 50 \\ 0.16V + 0.34, & \text{for } 1 \leq V < 6. \\ V - 0.5, & \text{for } 0.5 \leq V < 1 \\ 0, & \text{for } V < 0.5 \end{cases} \quad (13)$$

综合考虑大气湍流和气象条件的影响,信号辐照度 $I' = h_l I$ 。已知确定的大气传输损耗 h_l 和 I 的 PDF,由概率论推导接收端信号辐照度 I' 的 PDF 为^[3]

$$f_{t\&w}(I') = \frac{1}{h_l} f_t \left(\frac{I'}{h_l} \right). \quad (14)$$

将(5)式代入(14)式,最终得到的 $f_{t\&w}(I')$ 为

$$f_{t\&w}(I') = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{\alpha+\beta}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \frac{I'^{\frac{\alpha+\beta}{2}-1}}{h_l^{\frac{\alpha+\beta}{2}}} K_{\alpha-\beta} \left(2\sqrt{\alpha\beta} \frac{I'}{h_l} \right). \quad (15)$$

2.3 BER 性能分析

对于单孔径接收机,考虑大气湍流和气象条件,其 BER 计算式为

$$P_e = \int_0^\infty P_e(I') f_{t\&w}(I') dI', \quad (16)$$

式中: $f_{t\&w}(I')$ 为信号辐照度 I' 的 PDF; $P_e(I')$ 为条件误码率。对于 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 相干光接收机, $P_e(I')$ 表达式为

$$P_e(I') = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\gamma}{2}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{RAI'}{2q\Delta f}} \right) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left(\sqrt{\frac{\tilde{\gamma}I'}{2}} \right), \quad (17)$$

式中: $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 为误差补余函数。当采用 EGC 时,根据(3)式,辐照度 I' 可以表示为 $\sum_{l=1}^L \sqrt{I'_l} =$

$\sum_{l=1}^L \sqrt{h_l I_l} = \sqrt{h_l} z_s$, 此时, BER 可以表示为

$$P_{e,EGC} = \int_0^\infty P_e(z_s) f(z_s) dz_s. \quad (18)$$

(18)式中 $f(z_s)$ 可以表示为^[22]

$$f(z_s) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \Phi_z(\omega) \exp(-j\omega z_s) d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty [\Phi_z(\omega)]^L \exp(-j\omega z_s) d\omega, \quad (19)$$

式中: $\Phi_z(\omega) = [\Phi_z(\omega)]^L$ 为 z_s 的特征函数; $\Phi_z(\omega)$ 为随机变量 $z = \sqrt{I_l}$ 的特征函数, 可以表示为^[22]

$$\Phi_z(\omega) = \text{Re}[\Phi_z(\omega)] + j\text{Im}[\Phi_z(\omega)], \quad (20)$$

(20)式中实部和虚部分别为

$$\text{Re}[\Phi_z(\omega)] = {}_2F_1\left(\beta, \alpha, \frac{1}{2}; -\frac{\omega^2}{4\alpha\beta}\right), \quad (21)$$

$$\text{Im}[\Phi_z(\omega)] = \frac{\Gamma\left(\alpha + \frac{1}{2}\right)\Gamma\left(\beta + \frac{1}{2}\right)\omega}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} (\alpha\beta)^{-\frac{1}{2}} \cdot {}_2F_1\left(\beta + \frac{1}{2}, \alpha + \frac{1}{2}, \frac{3}{2}; -\frac{\omega^2}{4\alpha\beta}\right), \quad (22)$$

式中: ${}_2F_1(\cdot, \cdot, \cdot; \cdot)$ 为高斯超几何函数。将 (19)~(22)式代入(18)式, 同时利用频率 ω 与角度 θ 的关系式 $\omega = \tan \theta$, 最终得到采用 EGC 算法的多孔径相干光接收机的 BER 表达式为

$$P_{e,EGC} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^\infty \text{Re}\left\{\left[\Phi_z^*\left(\frac{g\omega}{\sqrt{2}}\right)\right]^L \frac{F(\omega)}{2}\right\} d\omega = \frac{1}{2\pi} \int_{-\frac{\pi}{2}}^{\frac{\pi}{2}} \text{Re}\left\{\sec^2\theta \left[\Phi_z^*\left(\frac{\sqrt{\gamma}h_l \tan\theta}{\sqrt{2L}}\right)\right]^L \frac{F(\tan\theta)}{2}\right\} d\theta, \quad (23)$$

式中: $F(\omega)$ 为误差补余函数的傅里叶变换形式, 记为

$$F(\omega) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} {}_1F_1\left(1, \frac{3}{2}; -\frac{\omega^2}{4}\right) + \frac{j}{\omega} \left[1 - \exp\left(-\frac{\omega^2}{4}\right)\right], \quad (24)$$

其中 ${}_1F_1(\cdot, \cdot; \cdot)$ 为合流超几何函数。

3 仿真分析

针对星地下行链路, 在考虑大气湍流、气象条件和光学天线实际孔径大小的条件下, 具体分析不同湍流强度、气象条件和天线孔径大小下基于 EGC 算法的多孔径相干光接收机的性能。对于气象条件, 只考虑轻雾、中雾、大雾和浓雾的影响。表 1 给出了 1550 nm 波长下的气象条件参数^[19]。云在链路中

的衰减系数达到 10^5 的数量级, 一般会导致通信链路中断, 这里不予考虑。此外, 与雾天情况影响相比, 雨雪造成的衰减较小, 且分析过程与雾天相同^[7,19]。仅考虑典型的地球静止轨道星地下行链路, 链路仿真参数在表 2 中给出^[9]。为了更好地对比, 首先给出晴空(即不考虑气象条件影响)条件下采用点接收机模型得到的分析结果。

表 1 1550 nm 波长下的气象条件参数

Table 1 Weather condition parameters for 1550-nm wavelength signal

Type of fog	Visibility /m	Transmittance h_l
Light fog	1000	0.94
Moderate fog	500	0.85
Thick fog	250	0.67
Dense fog	70	0.36

表 2 星地下行链路仿真参数

Table 2 Simulation parameters of satellite-to-ground downlink

Parameter	Value
Height from receiver to ground h_0 /m	0
Satellite altitude H /km	38000
Wavelength λ /nm	1550
Wind velocity ω /(m · s ⁻¹)	21
Refractive index parameter A_0 /(10 ⁻¹⁴ m ^{-2/3})	1.7
Zenith angle ζ	$0 - \pi/2$

图 2 和图 3 分别为弱湍流和强湍流晴空条件下, 相同总孔径面积(即相同的总平均入射功率)的 EGC 相干点接收机模型下平均接收功率与 BER 的关系。图 2 中天顶角 $\zeta = 45^\circ$ 对应弱湍流, 图 3 中 $\zeta = 80^\circ$ 对应强湍流。可以看到, 接收机性能随着分集路数的增加不断改善, 相比弱湍流, 强湍流下空间分集

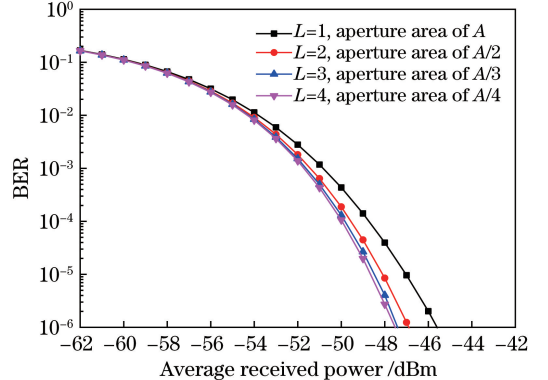


图 2 弱湍流晴空条件下, EGC 相干点接收机模型下平均接收功率与 BER 的关系

Fig. 2 Relationship between average received power and BER for EGC coherent point receiver model under clean air condition in weak turbulence

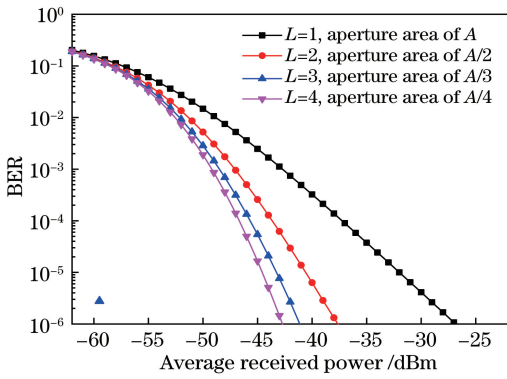


图3 强湍流晴空条件下,EGC 相干点接收机模型下平均接收功率与 BER 的关系

Fig. 3 Relationship between average received power and BER for EGC coherent point receiver model under clean air condition in strong turbulence

技术对接收机性能的改善效果更为显著。表3给出

表3 在弱湍流和强湍流晴空条件下,采用相干点接收机模型计算得到的灵敏度(BER为 10^{-6})

Table 3 Sensitivity for coherent point receiver model under clean air condition in weak turbulence and strong turbulence (BER is 10^{-6})

Turbulence condition	Average received power /dBm			
	L=1, Aperture area of A	L=2, Aperture area of A/2	L=3, Aperture area of A/3	L=4, Aperture area of A/4
Weak turbulence	-45.60	-46.89 (1.29)	-47.41 (1.81)	-47.52 (1.92)
Strong turbulence	-26.85	-37.64 (10.79)	-41.13 (14.28)	-42.72 (15.87)

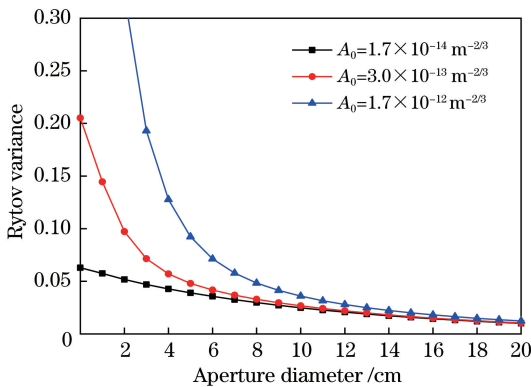


图4 接收天线直径 D 与 Rytov 方差 σ_R^2 的关系

Fig. 4 Relationship between receiving antenna diameter D and Rytov variance σ_R^2

图5和图6分别为在弱湍流和强湍流下,不同气象条件时,单个直径为D的L路EGC相干光接收机平均接收功率与BER的关系。相比晴空情况,雾天会对通信系统性能造成额外的影响,轻雾、中雾引起的劣化较小,而大雾和浓雾引起的劣化较明显。例如,采用两路分集接收,若要满足

了在弱湍流和强湍流晴空条件下,采用相干点接收机模型在BER为 10^{-6} 时接收机所需的最小平均光功率,即灵敏度的计算结果,括号中的数值为分集增益(单位为dB)。

图4给出了不同湍流条件下接收天线直径D与Rytov方差 σ_R^2 的关系,由图4可知,随着接收天线直径的增加, σ_R^2 的数值不断减小,即抑制大气湍流影响的效果逐渐明显,并且湍流强度越强,其抑制效果越明显。但是,当直径大于12cm时,抑制效果不再明显。综上,在分析时选取接收天线直径为12cm。在考虑孔径实际大小后,假设L个小孔径天线的接收面积与单个大孔径天线的接收面积相等,即:假设当L=1时,D=12cm;当L=2时,D=6 $\sqrt{2}$ cm;当L=3时,D=4 $\sqrt{3}$ cm;当L=4时,D=6cm。

BER为 10^{-6} ,在弱湍流下,在晴空、轻雾、中雾、大雾和浓雾条件时,灵敏度数值分别为-50.60 dBm、-50.35 dBm、-49.89 dBm、-48.88 dBm和-46.21 dBm;在强湍流下,在晴空、轻雾、中雾、大雾和浓雾条件时,灵敏度数值分别为-42.52 dBm、-42.24 dBm、-41.79 dBm、-40.76 dBm和-38.08 dBm。

多孔径相干光接收机的灵敏度具体数值在表4中给出,括号中的数值为分集增益(单位为dB)。对比表3和表4可知,相比多孔径点接收机模型,在考虑气象条件和天线实际孔径大小后,所计算的接收机灵敏度有很大差异。例如,在弱湍流晴空条件下,由点接收机模型计算可知,在BER为 10^{-6} 时,L=4的灵敏度为-47.52 dBm,但在考虑天线实际孔径大小后,多孔径相干光接收机的灵敏度为-53.87 dBm,两者相差6.35 dB。若考虑中雾气象条件,则灵敏度变为-53.19 dBm,两者相差5.67 dB。因此,在实际应用中必须考虑真实孔径大小和气象条件的变化。

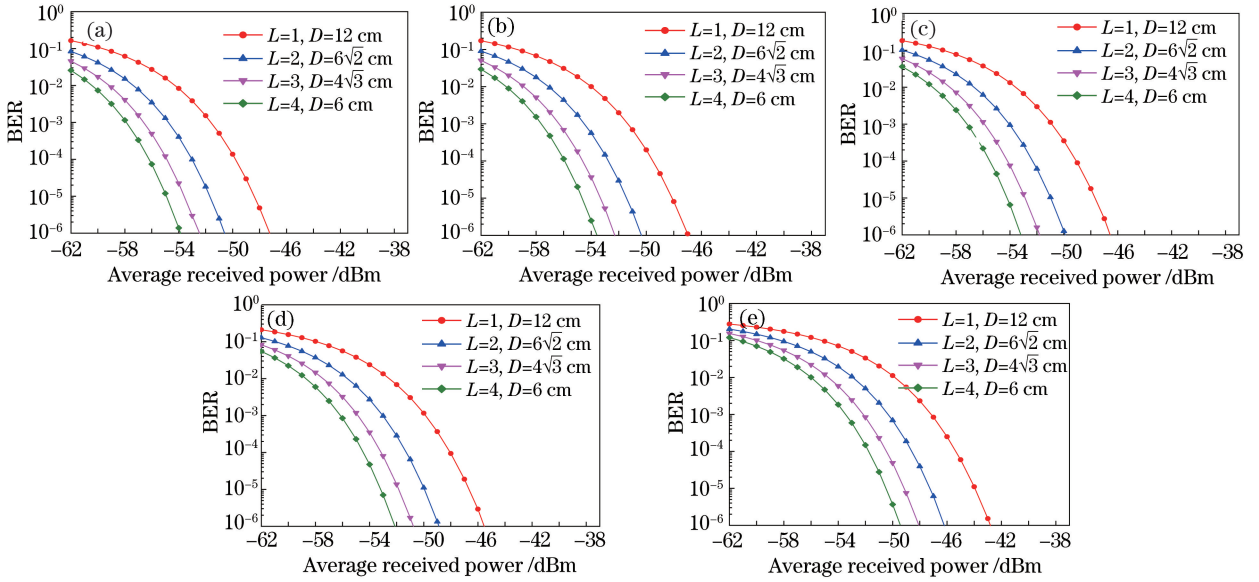


图 5 弱湍流下, 单个直径为 D 的 L 路 EGC 相干光接收机模型下平均接收功率与 BER 的关系。

(a)晴空;(b)轻雾;(c)中雾;(d)大雾;(e)浓雾

Fig. 5 Relationship between average received power and BER for L -channel EGC coherent optical receiver model with diameter of D under different fog conditions in weak turbulence. (a) Clean air; (b) light fog; (c) moderate fog; (d) thick fog; (e) dense fog

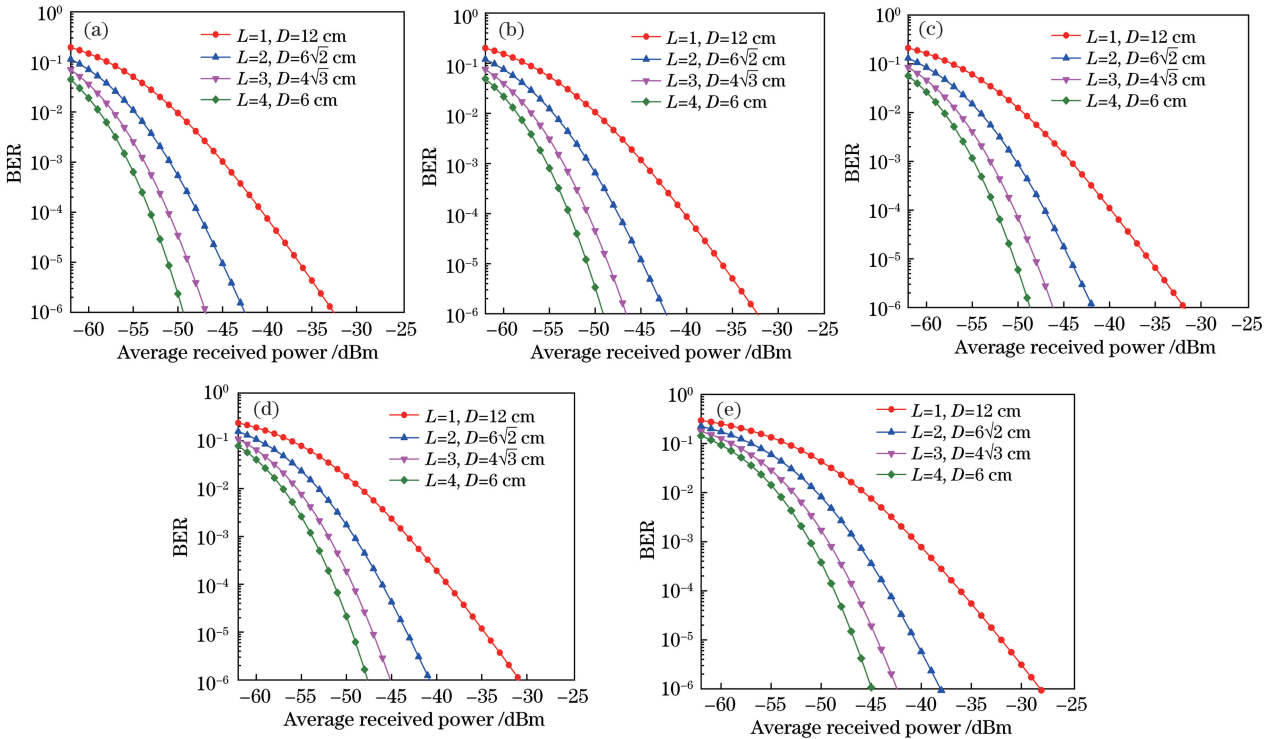


图 6 强湍流下, 单个直径为 D 的 L 路 EGC 相干光接收机模型下平均接收功率与 BER 的关系。

(a)晴空;(b)轻雾;(c)中雾;(d)大雾;(e)浓雾

Fig. 6 Relationship between average received power and BER for L -channel with EGC coherent optical receiver model with diameter of D under different fog conditions in strong turbulence. (a) Clean air; (b) light fog; (c) moderate fog; (d) thick fog; (e) dense fog

表4 在弱湍流和强湍流不同气象条件下,单个直径为 D 的 L 路相干光接收机模型计算得到的灵敏度(BER 为 10^{-6})Table 4 Sensitivity for L -channel coherent optical receiver model with diameter of D under different fog conditions in weak turbulence and strong turbulence (BER is 10^{-6})

Turbulence condition	Weather condition	Sensitivity /dBm			
		$L=1, D=12$ cm	$L=2, D=6\sqrt{2}$ cm	$L=3, D=4\sqrt{3}$ cm	$L=4, D=6$ cm
Weak turbulence	Clear air	-47.25	-50.60 (3.35)	-52.45 (5.20)	-53.87 (6.62)
	Light fog	-46.96	-50.35 (3.39)	-52.29 (5.33)	-53.58 (6.62)
	Moderate fog	-46.57	-49.89 (3.32)	-51.80 (5.23)	-53.19 (6.62)
	Thick fog	-45.54	-48.88 (3.34)	-50.77 (5.23)	-52.13 (6.59)
	Dense fog	-42.82	-46.21 (3.39)	-48.07 (5.25)	-49.43 (6.61)
Strong turbulence	Clear air	-32.54	-42.52 (9.98)	-46.86 (14.32)	-49.39 (16.85)
	Light fog	-32.27	-42.24 (9.97)	-46.61 (14.34)	-49.12 (16.85)
	Moderate fog	-31.83	-41.79 (9.96)	-46.17 (14.34)	-48.69 (16.86)
	Thick fog	-30.80	-40.76 (9.96)	-45.13 (14.33)	-47.65 (16.85)
	Dense fog	-28.10	-38.08 (9.98)	-42.43 (14.33)	-44.95 (16.85)

此外,由表4可知,分集增益大小与气象条件无关,但与湍流强度有关。由表3和表4可知,在总接收面积不变的条件下,增加孔径数量可以有效提高接收机的灵敏度。在晴空天气,采用点接收机模型, $L=4$ 时多孔径相干光接收机相比等面积单孔径接收机的灵敏度在弱湍流条件下提高了1.92 dB,在强湍流条件下提高了15.87 dB。考虑孔径实际大小后, $L=4$ 时多孔径相干光接收机相比等面积单孔径接收机的灵敏度在弱湍流条件下提高了6.62 dB,在强湍流条件下提高了16.85 dB。

4 结 论

针对星地下行光通信链路建立了多孔径相干光接收机误码率分析模型,该模型同时考虑了大气湍流、气象条件和孔径平均效应的影响。研究表明,接收孔径实际大小对多孔径相干光接收机的灵敏度和分集增益都有明显影响,而气象条件仅对接收机灵敏度有较大的影响。在弱湍流晴空条件下,当BER为 10^{-6} 时,采用点接收机模型计算得到的4孔径相干光接收机灵敏度与考虑天线实际孔径大小后计算得到的灵敏度相差6.35 dB。若再考虑中雾气象条件,两者相差5.67 dB,这说明实际应用中考虑真实

孔径大小和气象条件的必要性。研究结果对基于多孔径相干光接收机的星地下行链路通信系统设计和自适应优化具有一定的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Xu X F, Lu Z. Research status of mitigation techniques to assure the reliability of satellite-to-ground laser communications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2018, 13(6): 650-657.
徐晓帆, 陆洲. 星地激光通信可靠性保障技术研究现状[J]. 中国电子科学研究院学报, 2018, 13(6): 650-657.
- [2] Kong Y X, Ke X Z, Yang Y. Bit error rate of laser linewidth in spatial coherent optical communication link[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(4): 040603.
孔英秀, 柯熙政, 杨媛. 激光器线宽对空间相干光通信链路传输误码率研究[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(4): 040603.
- [3] Viswanath A, Jain V K, Kar S. Aperture averaging and receiver diversity for FSO downlink in presence of atmospheric turbulence and weather conditions for OOK, M-PPM and M-DPPM schemes [J]. Optical

- and Quantum Electronics, 2016, 48: 435.
- [4] Shrestha A, Giggenbach D, Mustafa A, *et al.* Fading testbed for free-space optical communications [J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9991: 999105.
- [5] Geisler D J, Yarnall T M, Stevens M L, *et al.* Multi-aperture digital coherent combining for free-space optical communication receivers [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12661-12671.
- [6] Ma J, Li K N, Tan L Y, *et al.* Exact error rate analysis of free-space optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Journal of Modern Optics, 2016, 63(3): 252-260.
- [7] Viswanath A, Jain V K, Kar S. Reduction in transmitter power requirement for earth-to-satellite and satellite-to-earth free space optical links with spatial diversity [J]. Optical and Quantum Electronics, 2018, 50: 418.
- [8] Odeyemi K O, Owolawi P A, Srivastava V M. Performance analysis of free space optical system with spatial modulation and diversity combiners over the Gamma Gamma atmospheric turbulence [J]. Optics Communications, 2017, 382: 205-211.
- [9] Ma J, Li K N, Tan L Y, *et al.* Performance analysis of satellite-to-ground downlink coherent optical communications with spatial diversity over Gamma-Gamma atmospheric turbulence[J]. Applied Optics, 2015, 54(25): 7575-7585.
- [10] Belmonte A, Kahn J M. Capacity of coherent free-space optical links using diversity-combining techniques: errata [J]. Optics Express, 2010, 18(17): 17748.
- [11] Niu M B, Cheng J L, Holzman J F. Exact error rate analysis of equal gain and selection diversity for coherent free-space optical systems on strong turbulence channels [J]. Optics Express, 2010, 18(13): 13915-13926.
- [12] Viswanath A, Jain V K, Kar S. Performance evaluation of satellite-to-earth FSO link in presence of turbulence and weather conditions for different IM schemes [C] // 2016 Twenty Second National Conference on Communication (NCC), March 4-6, 2016, Guwahati, India. New York: IEEE, 2016: 16285519.
- [13] Niu M B, Cheng J L, Holzman J F. Error rate performance comparison of coherent and subcarrier intensity modulated optical wireless communications [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2013, 5(6): 554-564.
- [14] Al-Habash M A, Andrews L C, Phillips R L. Mathematical model for the irradiance probability density function of a laser beam propagating through turbulent media [J]. Optical Engineering, 2001, 40(8): 1554-1562.
- [15] Andrews L C, Young C Y, Al-Habash M A, *et al.* Fade statistics associated with a space/ground laser communication link at large zenith angles [J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3763: 268-277.
- [16] Sun J, Huang P M, Yao Z S. Diversity reception technology in coherent optical communication over Gamma-Gamma atmospheric turbulence channel [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(7): 0706002. 孙晶, 黄普明, 么周石. Gamma-Gamma 大气湍流下相干光通信分集接收技术研究 [J]. 光学学报, 2018, 38(7): 0706002.
- [17] Andrews L C, Phillips R L. Laser beam propagation through random media [M]. 2nd ed. Washington: SPIE Press, 2005.
- [18] Zhao J, Zhao S H, Zhao W H, *et al.* Performance analysis for mixed RF/FSO airborne communication systems over atmospheric turbulence and pointing error [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906001. 赵静, 赵尚弘, 赵卫虎, 等. 大气湍流和指向误差下混合 RF/FSO 航空通信系统性能分析 [J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906001.
- [19] Ghassemlooy Z, Popoola W, Rajbhandari S. Optical wireless communications: system and channel modelling with MATLAB [M]. New York: CRC Press, 2012.
- [20] Kim I I, McArthur B, Korevaar E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4214: 26-37.
- [21] Gu K, Xu Z Y, Wang J Y, *et al.* Long-wave infrared wireless laser communication performance under atmospheric turbulence conditions [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030603. 谷康, 徐智勇, 汪井源, 等. 大气湍流条件下长波红外无线激光通信性能分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030603.
- [22] Niu M B, Cheng J L, Holzman J F, *et al.* Coherent free-space optical transmission with diversity combining for Gamma-Gamma atmospheric turbulence [C] // 2010 25th Biennial Symposium on Communications, May 12-14, 2010, Kingston, ON, Canada. New York: IEEE, 2010: 217-220.