

天空背景辐射对大气激光通信系统误码率的影响

鲁强^{1,2} 曾飞¹ 张玉良¹ 张鑫¹ 乔彦峰¹

¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了开关键控(OOK)调制下天空背景辐射对误码率的影响,介绍了通信端机收到的天空背景辐射的仿真方法。仿真结果表明:通信误码率一定时,天空背景辐射的上限值与接收信号光功率和雪崩光电二极管(APD)的电噪声大小有关。太阳直接辐射是大气激光通信系统接收到的主要背景辐射,大气散射相对于太阳直接辐射十分微弱。当太阳天顶角较小时,可以采取端机视轴规避太阳一定角度的方式,保证通信系统的误码率小于 10^{-9} 。

关键词 大气光学; 激光通信; 天空背景辐射; 误码率; 太阳辐射; 大气散射

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.070103

Influence of Sky Background Radiation on Bit Error Rate of Atmospheric Laser Communication System

Lu Qiang^{1,2} Zeng Fei¹ Zhang Yuliang¹ Zhang Xin¹ Qiao Yanfeng¹

¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract The influence of sky background radiation on bit error rate (BER) under on-off keying (OOK) modulation is studied, and the simulation method of sky background radiation received by the communication terminal is introduced. Simulation results show that when the communication BER is constant, the upper threshold of sky background radiation is related to the received signal optical power and the electrical noise of avalanche photodiode (APD). Direct solar radiation is the major background radiation received by atmospheric laser communication system, and atmospheric scattering, relative to the direct solar radiation, is very weak. When the solar zenith angle is small, the optic axis of the communication terminal can be adopted to avoid certain sun radiation angle, and it is ensured that the BER of the communication system is less than 10^{-9} .

Key words atmospheric optics; laser communication; sky background radiation; bit error rate; solar radiation; atmospheric scattering

OCIS codes 010.1310; 290.1350; 060.4510

1 引言

长距离工作链路、大气传输信道和高灵敏度的雪崩光电二极管(APD)探测器是大气激光通信系统的典型特点^[1-3]。由于处在较强的天空背景辐射下,通信端机除了会接收到信号光功率,还会接收到落在探测器空间和光谱范围内的天空背景辐射;由于通信系统使用灵敏度极高的 APD 探测器,即使是极弱的天空背景辐射也会引起 APD 的响应^[4],所以需要^对信号光功率和天空背景辐射进行后续处理。另外,长距离的工作

收稿日期: 2016-01-26; 收到修改稿日期: 2016-02-27; 网络出版日期: 2016-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(11403064, 61102023)

作者简介: 鲁强(1989—),男,博士研究生,主要从事激光通信光学系统设计方面的研究。

E-mail: luqiang52177@163.com

导师简介: 乔彦峰(1962—),男,研究员,博士生导师,主要从事光电测量方面的研究。

E-mail: qiaoyf@ciomp.ac.cn(通信联系人)

链路使通信端机接收到的信号光功率极其微弱,使端机接收到的天空背景辐射和信号光功率的量级可能十分接近。如果接收到的天空背景辐射与信号光功率量级相当或功率强于后者,将会使系统的信噪比(SNR)和误码率(BER)降低;如果天空背景辐射远大于信号光功率,将会直接造成端机通信的中断。因此,需要评估通信端机接收到的天空背景辐射和信号光功率的量级关系,分析天空背景辐射是否会对通信端机的误码率产生影响。

大气作为大气激光通信系统的传输信道,对通信端机接收到的天空背景辐射产生吸收和散射作用,表现为对太阳直接辐射的衰减和对大气背景辐射的增强^[5]。大气信道的存在使天空背景辐射的计算变得十分困难,如何计算大气激光通信系统接收到的天空背景辐射变得十分重要。此外,天空背景辐射对通信端机误码率的影响程度和一定误码率下天空背景辐射上限值的确定也是需要研究的问题。Leeb^[6]研究了不同接收方式下背景辐射对通信系统信噪比的影响。Khalighi等^[7]研究了天空背景辐射对地面激光通信系统性能的影响,提出采用多激光波长结合不同探测方式的方法,来降低天空背景辐射对通信系统性能的影响。Khatoon等^[8]研究了天空背景辐射对光强闪烁因子和信道参数的影响,提出了基于天空背景辐射的信道参数的多种估计方法。胥全春等^[9]对星地激光通信系统星上终端的天空背景辐射进行了深入的研究,利用双向散射函数建立太阳和地球的背景辐射模型。

上述工作都没有详细分析天空背景辐射对通信端机误码率的影响,以及通信端机接收的天空背景辐射的计算问题。本文分析了开关键控(OOK)调制方式下通信系统的误码率和天空背景辐射之间的关系,在通信误码率一定时,研究了不同发射信号光功率下天空背景辐射的理论上限值;提出一种大气激光通信系统天空背景辐射的计算方法,并利用对通信端机模型的数值仿真来验证该方法的可行性。

2 背景辐射对误码率的影响

激光通信系统的天空背景辐射包括:太阳辐射、地球背景辐射、月球辐射、行星和恒星辐射,通信系统主要受太阳直射和大气散射的影响。太阳直射的光谱辐射远大于地球自身热辐射和地面反射的太阳光谱辐射,相比之下后2项可以忽略;而大气散射辐射主要包括大气自身的热辐射作用、大气对地面热辐射和太阳辐射的散射作用^[10],如图1所示。

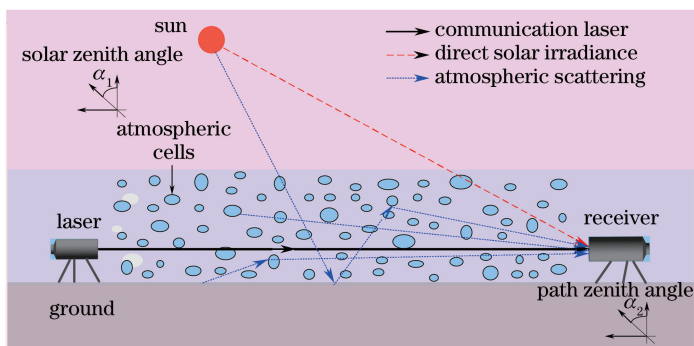


图1 天空背景辐射的传输模型图

Fig. 1 Transmission model diagram of sky background radiation

端机接收到的天空背景总辐射包括太阳直射功率和大气散射功率。接收到的天空背景辐射将会引起APD的响应,与信号光功率同时被后续电路处理。APD的输出值为

$$i = i_s + i_r + i_n, \quad (1)$$

式中 i_s 为信号光功率引起的电信号值, i_n 是APD的电噪声值, i_r 为天空背景辐射引起的电信号值。

假设通信系统发射的“0”码和“1”码的概率相等,当判决门限取 $i_T = 0.5i_s$ 时,系统的总误码率可以表示为

$$r_{\text{BER}} = \frac{1}{2}P(0|1) + \frac{1}{2}P(1|0) = \frac{1}{2} + \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(\frac{R_{\text{SN0}} - 2i_r/\sigma_N}{2\sqrt{2}}\right) - \frac{1}{4} \operatorname{erfc}\left(-\frac{R_{\text{SN0}} + 2i_r/\sigma_N}{2\sqrt{2}}\right), \quad (4)$$

式中 $\operatorname{erfc}()$ 为误差函数。天空背景辐射引起的电信号值为 $i_r = \frac{\eta e P_r}{h\nu}$, 其中 e 为电子电荷数, η 为量子效率, h 为普朗克常量, ν 为光谱频率, P_r 为天空背景辐射功率。因此, 系统的误码率与信噪比 R_{SN0} 、天空背景辐射功率 P_r 和 APD 的电噪声 σ_N 大小有关。不同信噪比下, 通信误码率随天空背景辐射信号值与电噪声比值变化的仿真结果如图 2 所示。可以看出: 通信误码率随天空背景辐射信号值 i_r 与电噪声方差 σ_N 的比值增大而增大。在信噪比一定的情况下, 背景辐射 P_r 决定了误码率的大小; 信噪比越小, 天空背景辐射值越大, 通信误码率越大。

图 3 是误码率为 10^{-9} 时, 不同信噪比下的信号光功率 P_{S1} 和天空背景辐射上限值 P_{LIM} 。计算时: 系统的电信号值为 $i_s = \frac{\eta e P_{\text{S1}}}{h\nu}$, APD 的电噪声值 $\sigma_N = \sqrt{\frac{2\eta e^2 B P_{\text{S1}}}{h\nu}}$, 其中, $e = 1.6 \times 10^{-19}$ C, B 为探测器电噪声频率带宽, $\eta = 0.75$, $h = 6.626 \times 10^{-34}$ J · s。

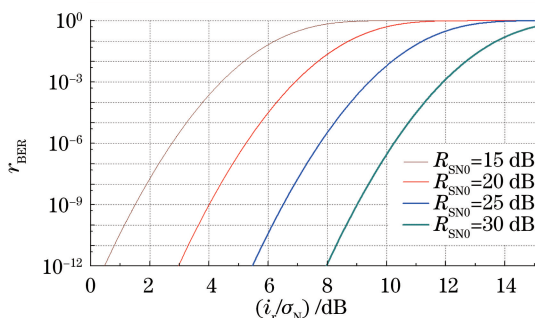


图 2 误码率随天空辐射功率和电噪声变化仿真曲线

Fig. 2 Simulation curves of BER with variation of sky radiation power and electrical noise

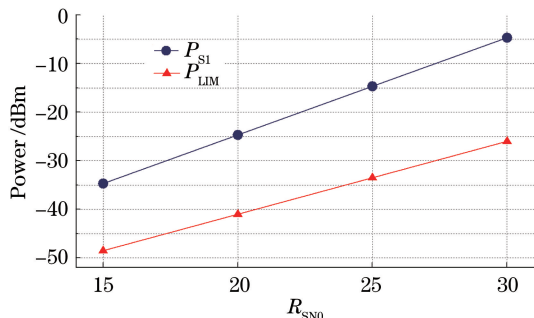


图 3 不同信噪比下的信号光功率和天空背景辐射上限值

Fig. 3 Signal optical power and sky background radiation upper threshold with different SNRs

一般认为通信系统误码率小于 10^{-9} 时具有较好的通信状态^[11], 在信号光功率不变的情况下, 天空背景辐射的增大会使通信端机的信噪比下降, 误码率上升。若想将误码率控制在 10^{-9} 以下, 背景辐射需要控制在某个量级(定义为天空背景辐射上限值 P_{LIM}) 以下。从图 2、3 可以看出: 系统通信误码率一定时, 信噪比越大, 系统天空背景辐射的上限值也越大, 接收信号光功率越大, 天空背景辐射量级增大才会使端机的误码率上升到原来的量级。

3 分析方法

在背景辐射对通信端机误码率影响的实际分析中, 需要获得 3 个物理量: 天空背景辐射上限值、天空背景辐射功率、系统的能量透射率。天空背景辐射上限值根据前文的分析, 由系统接收的光功率和 APD 电噪声决定, 在误码率一定的条件下, 可以得到不同信噪比下的天空背景辐射上限值。能量透射率曲线是计算天空背景辐射总功率的必要输入量, 可以通过 Lighttools 软件获得, 具体的仿真方法已经十分成熟^[12]。大气信道对天空背景辐射表现为衰减和增强两方面的相互作用: 1) 大气粒子的吸收和散射作用引起了太阳直接辐射的衰减; 2) 大气粒子的热辐射和散射作用增加了通信端机接收的大气背景辐射功率。大气层散射作用的加入使得太阳辐照度值 $E(\lambda)$ 和大气散射辐亮度值 $L(\lambda)$ 计算起来十分困难。目前, 太阳辐照度和大气散射解析模型的具体解法已经很成熟^[5], 但是计算起来仍十分繁琐。MODTRAN 作为成熟的大气传输模型软件, 可以用来辅助分析特定大气路径下的太阳辐照度和大气散射辐亮度^[13-14]。

在特定信道环境下, 可以通过图 4 所示的方法分析天空背景辐射对误码率的影响。确定通信信道参数后, 利用 MODTRAN 软件仿真出端机接收的太阳直射辐照度值和大气散射辐亮度值, 同时, 由 Lighttools 软件仿真通信端机的能量透射率 $T(\lambda)$, 二者结合计算出总的天空背景辐射。在误码率一定时, 由信噪比的大小确定出信号光功率的大小, 信号光功率的大小决定了 APD 电噪声的大小, 即可求出一定误码率下天空背景辐射的上限值。将计算出的天空背景辐射值与背景辐射上限值相比较, 分析出天空背景辐射对通信误码率的影响。

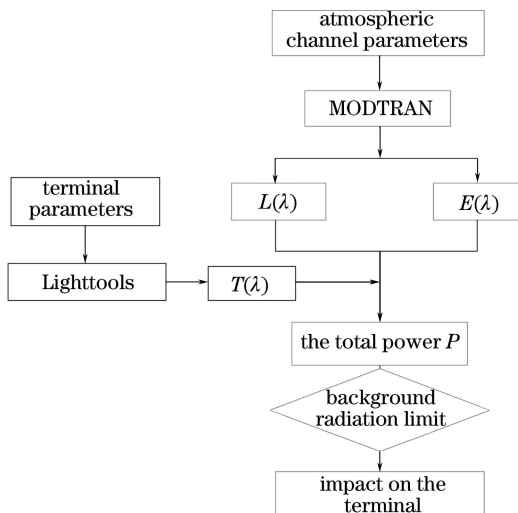


图4 天空背景辐射评估方法流程图

Fig. 4 Flow chart of sky background radiation evaluating method

4 系统仿真与数据分析

通信端机的通信支路由光学天线加接收子系统组成,如图5所示。光学天线采用卡式系统加后端准直透镜组形式。信号光线经过主镜反射到次镜,再经过次镜的反射作用成像到一次像面,后面的准直镜组将会聚光束转变为平行光束,通过反射镜的2次反射作用,由接收镜组成像到光纤端面。通信支路的各视场设计光学像质均达到衍射极限。主要光学指标:工作波长 $1.55 \mu\text{m}$,视场 $\pm 0.214 \text{ mrad}$,通光口径 150 mm ,遮拦比 0.21 (即半径比)。

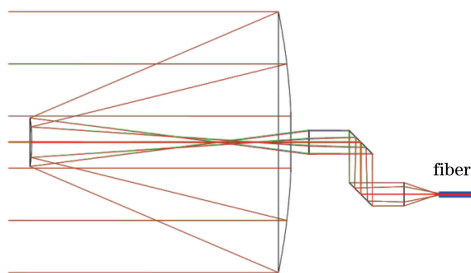


图5 大气激光通信系统的通信光路结构图

Fig. 5 Communication optical path structure diagram of atmospheric laser communication system

4.1 背景辐射抑制结构

端机的背景辐射抑制结构采用外遮光筒、内遮光筒、次镜遮光罩和视场光阑结合,其余后端支路设计消杂散光筒的结构^[15-19]。其中,通过镜面镀增透膜和提高光洁度来消除镜面间的多次反射作用,并在镜筒内壁和透镜边缘涂消光漆,设计的结构图如图6所示。

在杂散光分析软件 Lighttools 中对结构模型进行仿真分析。背景辐射抑制结构的仿真模型包括光学主镜、次镜、准直镜组和光纤接收镜组等光学结构,以及内、外遮光筒和次镜遮光罩等机械结构。分析之前要设置各结构件表面的光学属性,主、次镜面除了具有 98% 的反射特性外,还具有吸收和散射光线的作用,各机械结构面均设置为朗伯散射面。

能量透射率 $T(\lambda)$ 表示像平面上接收的功率与总入射光功率的比值

$$T(\lambda) = \frac{P_{\text{re}}}{P_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

在 Lighttools 软件中,在光学系统前设置一个均匀的面入射光源,在光纤端面处设置探测器(口径与纤芯直

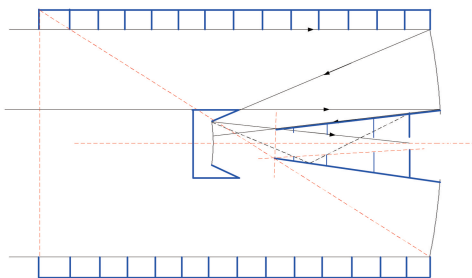


图 6 天空背景辐射抑制结构图

Fig. 6 Structure diagram of sky background radiation suppression

径相同), 追迹一定数量的光线(取 3000 万条), 得到探测器上接收到的能量值, 计算出该视场下的能量透射率。在光路视场内和视场外各选一定数量的角度, 调节面光源的入射角度, 重复操作, 得到不同入射角度下的能量透射率拟合曲线, 如图 7 所示。

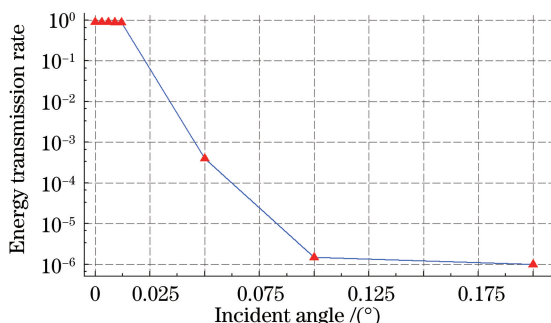


图 7 不同入射视场下通信端机的能量透射率曲线

Fig. 7 Energy transmission rate curve of communication terminal with different incident field of view

由图 7 可以看出, 在光路视场内(视场半角为 0.012°), 能量透射率基本不变(约为 0.9); 在光路视场外, 随着视场角度的增加能量透射率快速减小; 视场角为 0.1° 时, 杂光系数迅速下降到 10^{-6} 。仿真结果表明背景辐射抑制结构保证了视场内较高的能量透射率, 同时对视场外的背景辐射表现出很好的抑制作用。

4.2 天空背景辐射仿真

MODTRAN 软件是美国空军实验室开发的高分辨率大气传输分析软件, 其输入参数有模型大气、气溶胶参数、运行模式和几何参数。MODTRAN 软件对太阳辐照度仿真时默认端机孔径总是垂直接收太阳的光谱辐照, 仿真时只需输入太阳天顶角, 而大气散射辐亮度需要同时输入太阳天顶角和路径天顶角。不同太阳天顶角和视轴天顶角下太阳散射辐照度值和大气散射辐亮度值拟合曲线如图 8 所示。参数选择如下: 中纬度夏季模式, 乡村气溶胶模式, 气象条件 23 km 能见度, 波长 $1.55 \mu\text{m}$, 地面反照率 0.4; 运行模式: 直接太

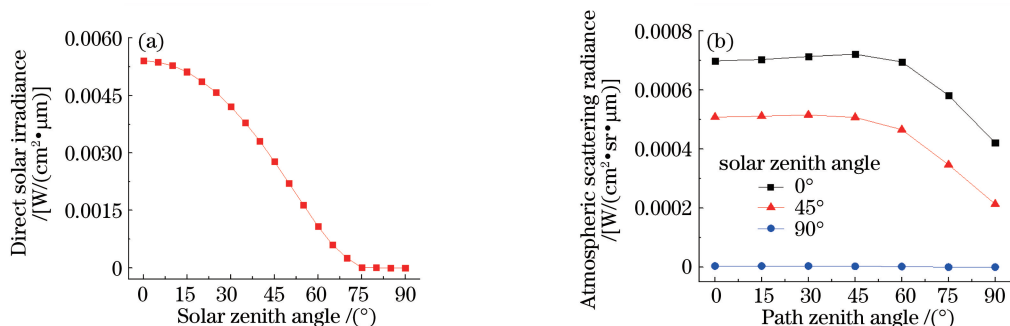


图 8 MODTRAN 软件天空背景辐射仿真结果。(a) 太阳直射辐照度; (b) 大气散射辐亮度

Fig. 8 Simulation results of sky background radiation based on MODTRAN software.

(a) Direct solar irradiance; (b) atmospheric scattering radiance

阳照度,有散射辐亮度。

由图 8 可以看出,太阳直射辐照度值在太阳天顶角为 0° 时最大,随着太阳天顶角的增加,太阳直射辐照度值随之下降;当太阳天顶角大于 75° 时,太阳直射辐照度接近于 0。大气散射辐亮度值随太阳天顶角的增大快速减小,同一太阳天顶角下,路径天顶角小于 60° 时大气散射辐亮度基本不变,大于 60° 后快速减小。

4.3 结果分析

大气激光通信端机接收到的天空背景辐射功率 P_r 为

$$P_r = P_L + P_S, \quad (6)$$

式中 $P_S = \int E(\lambda)ST(\lambda)d\lambda$, $P_L = \iint L(\lambda)ST(\lambda)d\lambda d\theta$, λ 为通信波长, S 为通信端机接收面积, θ 为端机的通信立体视场角, P_S 为太阳直射功率, P_L 为大气散射功率。太阳直射功率和大气散射功率的计算结果如图 9 所示,图 9(a) 是太阳直射功率随太阳天顶角的变化关系,图 9(b) 是不同太阳天顶角下大气散射功率随路径天顶角的变化关系。计算时: $\Delta\lambda = 3 \text{ nm}$; 太阳直射的视场内能量透射率为 0.9, 视场外能量透射率为 1×10^{-6} ; 大气散射的能量透射率为 0.9。

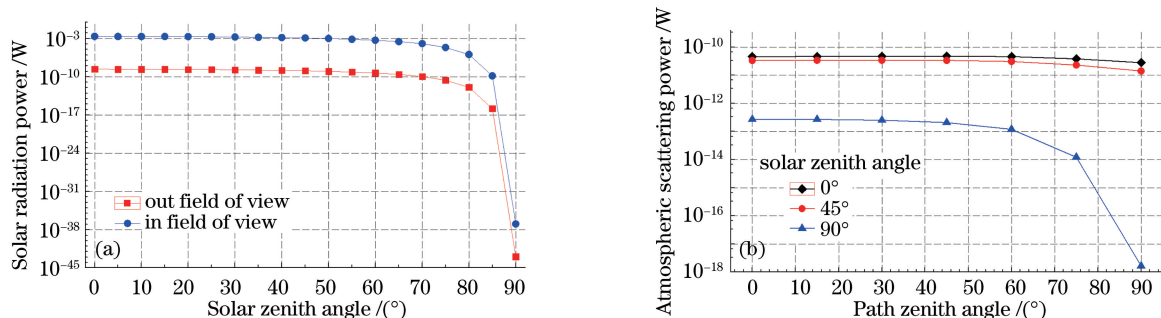


图 9 天空背景辐射功率计算结果。(a) 太阳直射功率; (b) 大气散射功率

Fig. 9 Calculation results of sky background radiation power.

(a) Direct solar radiation power; (b) atmospheric scattering power

通信端机工作时视场内总是充满大气散射功率,大气散射功率是对端机全视场散射功率的积分。由图 9(b) 可以看出:任意太阳天顶角和路径天顶角下通信端机接收到的大气散射功率总小于 -73 dBm , 大气散射功率十分微弱,主要是由于通信光路视场和大气散射辐亮度值都很小。此外,太阳天顶角为 0° 时大气散射辐亮度值最大,随着太阳天顶角的增大,大气散射辐亮度值逐渐减小;路径天顶角为 0° 时大气散射功率最大,随着路径天顶角的增加,大气散射功率越来越小,说明大气散射功率受太阳天顶角和路径天顶角共同影响。

图 8(a) 中太阳辐照度值在太阳天顶角为 0° 时最大,此时,若太阳直射到端机视场内,太阳直射功率出现最大值。随着端机视轴偏离太阳方向,能量透射率逐渐由视场内的 0.9 下降到 10^{-6} 或更小,大气散射总功率快速下降。由于太阳光线近似平行入射通信光路,太阳直射功率与大气散射功率不同,不是对视场内功率的积分求和,只是特定视场下的功率计算,因此背景辐射抑制结构对太阳直射的抑制作用十分明显。从图 9(a) 可以得出任意太阳天顶角下,视场外(能量透射率 10^{-6}) 的太阳直射功率总小于 -57 dBm , 而视场内的太阳直射功率范围从 $0(1 \text{ mW})$ 一直下降到十分微弱。

图 9 的仿真结果也表明:大气散射功率相比太阳直射功率十分微弱,太阳直射功率是通信端机接收到的主要天空背景辐射。太阳直射功率与太阳天顶角和端机视轴与太阳的偏离角度有关,当太阳天顶角一定时,利用背景辐射抑制结构使系统能量透射率随着入射视场角度的增大快速减小的特点,可采取增加端机视轴偏离太阳角度的方法,即通信端机规避太阳一定角度来抑制太阳直射功率。

在误码率为 10^{-9} 时,不同信噪比下天空背景辐射的上限值已在图 3 中给出,整理后如表 1 所示。对于给定的天空背景辐射的上限值,当太阳直射通信支路视场内时,随着太阳天顶角从 90° 逐渐减小,太阳直射功率在某个太阳天顶角(称为临界太阳天顶角)下开始大于天空背景辐射的上限值,此时,端机视轴需要规避太阳的一定角度来保证误码率小于 10^{-9} 。天空背景辐射的上限值越小,端机需要规避太阳的角度越大。同时,表 1 中的数据表明:信噪比越大,天空背景辐射上限值越大,对应的临界太阳天顶角越小。

表1 不同信噪比下通信端机的临界太阳天顶角

Table 1 Critical solar zenith angles of communication terminal with different SNRs

R_{SN0}/dB	r_{BER}	Background radiation limit /dBm	Avoiding angle /($^{\circ}$)	Critical solar zenith angle /($^{\circ}$)
15	10^{-9}	-48.5	5	82
20	10^{-9}	-41.0	5	81
25	10^{-9}	-33.5	5	80
30	10^{-9}	-26.0	5	79

对于表1中给出的不同信噪比,在给定的临界太阳天顶角下,视场内的太阳直射功率都会大于其对应的背景辐射上限值,使误码率小于 10^{-9} 。图9结果表明:在太阳天顶角大于临界天顶角后,端机规避太阳 0.2° (能量透射率 10^{-6})就可以满足太阳直射功率小于背景辐射上限值,但是考虑实际应用条件的复杂性,取规避角为 5° 。

5 结 论

针对天空背景辐射对大气激光通信系统误码率的影响问题,分析了天空背景辐射的种类,系统主要受太阳直射和大气散射的影响,推导出OOK调制方式下天空背景辐射对通信误码率的影响公式。仿真结果表明:系统的误码率与信噪比、天空背景辐射值和APD的电噪声大小有关;信噪比一定的情况下,系统接收的背景辐射决定了误码率的大小;信噪比越小,天空背景辐射值越大,通信误码率越大。利用MODTRAN软件仿真计算得到了大气散射辐亮度和太阳直射辐照度。利用Lighttools软件对通信端机背景辐射抑制结构建模和仿真。计算结果表明:太阳直接辐射是大气激光通信系统接收到的主要背景辐射,当太阳天顶角较小时,可以采取端机视轴规避太阳一定角度的方式,保证通信误码率小于 10^{-9} 。给出的传输模型和辐射功率计算方法简单、有效,能够仿真不同太阳天顶角和路径天顶角下的天空背景辐射,分析出天空背景辐射对通信误码率的影响。研究结果对大气激光通信系统误码率的评估和通信端机指标分析具有一定的意义。

参 考 文 献

- Chen Jing, Xue Haizhong, Liu Xuewen, *et al.*. Low-power laser jamming techniques to free space optical system[J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(1): 0106005.
陈 静, 薛海中, 刘学文, 等. 无线激光通信系统弱光干扰技术[J]. 光学学报, 2012, 32(1): 0106005.
- Jin Guang, Li Yanjie, Zhong Xing, *et al.*. Design of co-aperture optical system for space imaging and laser communication[J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(8): 2067-2074.
金 光, 李艳杰, 钟 兴, 等. 空间成像与激光通信共口径光学系统设计[J]. 光学精密工程, 2014, 22(8): 2067-2074.
- Nilsson O. Fundamental limits and possibilities for future telecommunication[J]. IEEE Communications Magazine, 2001, 39(5): 164-167.
- Xu F, Khalighi M A, Bourennane S, *et al.*. Impact of different noise sources on the performance of PIN- and APD-based FSO receivers[C]. IEEE 11th International Conference on Telecommunications, 2011: 211-218.
- Gu Jilin, Xu Wenhai. Method research on the calculation atmospheric path radiation in foggy weather[C]. SPIE, 2011, 8193: 81934M.
- Leeb W R. Degradation of signal to noise ratio in optical free space data links due to background illumination[J]. Applied Optics, 1989, 28(16): 3443-3449.
- Khalighi M A, Xu F, Jaafar Y, *et al.*. Double-laser differential signaling for reducing the effect of background radiation in free-space optical systems[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2011, 3(2): 145-154.
- Khatoun A, Cowley W G, Letzepis N, *et al.*. Estimation of channel parameters and background irradiance for free-space optical link[J]. Applied Optics, 2013, 52(14): 3260-3268.
- Xu Quanchun, Yu Jianjie, Zhou Yanping, *et al.*. Decreasing earth background radiation in satellite-ground communication[J]. Infrared and Laser Engineering, 2014, 43(7): 2300-2305.
胥全春, 俞建杰, 周彦平, 等. 星地激光通信中地球背景辐射的抑制研究[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(7): 2300-2305.
- Che Nianzeng, Yan Dayuan. Radiometry and photometry[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1990.
车念增, 闫达远. 辐射度学和光度学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1990.

- 11 Yuksel H, Milner S, Davis C C. Aperture averaging for optimizing receiver design and system performance on free-space optical communication links[J]. *Applied Optics*, 2005, 44(8): 462-475.
- 12 Yang Jiaqiang, Li Ronggang, Peng Qingqing, *et al.*. Research of stray light in the IR system based on Lighttools and Matlab[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 44(8): 888-891.
杨加强, 李荣刚, 彭晴晴, 等. 基于 Lighttools 和 Matlab 的内辐射杂光分析方法研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 44(8): 888-891.
- 13 Mao Kebiao, Qin Zhihao. The transmission model of atmospheric radiation and the computation of transmittance of MODTRAN [J]. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 2004, 27(4): 1-3.
毛克彪, 覃志豪. 大气辐射传输模型及 MODTRAN 中透射率计算[J]. *测绘与空间地理信息*, 2004, 27(4): 1-3.
- 14 Tao Dongxing, Zhao Huijie, Jia Guorui, *et al.*. A MODTRAN-based double-lookup-tables retrieval algorithm for water vapor amount of hyperspectral data[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1001001.
陶东兴, 赵慧洁, 贾国瑞, 等. 基于 MODTRAN 的双查找表法反演高光谱数据的水汽含量[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1001001.
- 15 Li Da, Liu Peng, Chen Bin, *et al.*. Stray light analysis and experimental verification of spherical reflective corona graph experimental devices[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1265-1277.
李 达, 刘 鹏, 陈 斌, 等. 球面反射式日冕仪实验装置的杂光分析和实验验证[J]. *光学 精密工程*, 2015, 23(5): 1265-1277.
- 16 Lu Haiping, Yuan Xiangyan, Zhang Kaiyuan, *et al.*. Infrared background radiation removing design and simulation of Antarctic survey telescope[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(11): 1122002.
卢海平, 袁祥岩, 张凯元, 等. 南极红外巡天望远镜红外背景辐射抑制方法[J]. *光学学报*, 2014, 34(11): 1122002.
- 17 Yang Lin, Li Da, Cui Tiangang, *et al.*. Measurement and elimination of stray light from space solar telescopes for imaging test at UV band[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, 19(7): 1456-1463.
杨 林, 李 达, 崔天刚, 等. 空间太阳望远镜在紫外波段成像检测中的杂散光测量和消除[J]. *光学 精密工程*, 2011, 19(7): 1456-1463.
- 18 Lin Jianchun, Sun Liwei, Chen Boyang, *et al.*. Stray light analysis of a coaxial two reflect mirror system and optimized design of inner photo mask[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0116001.
林剑春, 孙丽葳, 陈博洋, 等. 同轴两反光学系统杂散光分析及内遮光罩优化设计[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0116001.
- 19 Zhu Yang, Zhang Xin, Wu Yanxiong, *et al.*. Optical design and stray light analysis for ultraviolet board width off-axis four mirrors optical system[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(2): 0216001.
朱 杨, 张 新, 伍雁雄, 等. 紫外宽幅离轴四反光学系统设计及其杂散光分析[J]. *中国激光*, 2015, 42(2): 0216001.