

大气光通信信道特性及相位补偿技术研究

吴晗玲¹, 李新阳², 严海星¹, 杨慧珍²

(1. 中国科学院力学研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘要: 大气湍流使光载波的强度和相位在空间和时间上都呈现随机起伏, 从而极大地降低了激光通信系统的性能。基于大气湍流信道的特点, 分析了各种湍流效应对大气激光通信系统性能的影响, 介绍了自适应光学相位补偿技术在大气激光通信系统中的应用进展, 特别指出基于随机并行梯度下降 (SPGD) 算法的自适应光学技术由于具有诸多优点, 在未来的大气激光通信系统中可能有较为广阔的应用前景。

关键词: 大气激光通信; 大气湍流; 自适应光学; 误码率

中图分类号: TN929.12; O439 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2008)07-0058-04

Study of channel characteristics and its phase compensation technology for atmospheric optical communication

WU Han-ling¹, LI Xin-yang², YAN Hai-xing¹, YANG Hui-zhen²

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Optoelectronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China)

Abstract: Atmospheric turbulence makes phase and intensity of the optical carrier wave occurring random variations at spatial and temporal scale, so that the performance of the laser communication system is severely degraded. Based on characterizations of atmospheric turbulence channel, various turbulence effects on performance of atmospheric laser communications system are analyzed. Then adaptive optics compensation technology for the atmospheric channel and its effect on the performance of atmospheric laser communication are introduced. Especially, it is pointed out that the stochastic parallel gradient descent (SPGD) algorithm is a promising control algorithm for the future application of adaptive optics to atmospheric laser communication due to having several advantages.

Key words: atmospheric laser communication; atmospheric turbulence; adaptive optics; bit-error rate

1 引言

大气激光通信^[1]是指以激光束作为信息的载体, 在大气中进行信息双向传递的一种宽带通信技术。由于其可供使用的带宽非常宽、光束发散角小等优点, 有可能实现比微波通信更高速率、更大容量的信息传输能力, 是目前大容量空间通信最具竞争力的解决方案, 在星地通信、地面中短距离宽带通信及军事通信领域都有着广泛的应用和发展前景。然而, 传输信道中的大气湍流是限制通信距离及通信系统性能的瓶颈之一^[2]。它会使光载波在传输过程中随机地改变其光束特性, 致使携带信息的光波的强度和相位在空间和时

间上都呈现随机起伏, 从而极大地降低了激光通信系统的性能。针对大气湍流效应的特性, 人们开始尝试使用自适应光学(Adaptive Optics- AO)相位补偿技术^[3]来克服或缓解大气湍流对通信质量的不利影响, 并获得了一定的研究成果。

本文从大气湍流信道特性出发, 分析了各种大气湍流效应及其对激光通信系统性能的影响, 介绍了自适应光学技术在大气激光通信领域的研究和应用现状, 特别对基于随机并行梯度下降控制算法的自适应光学技术的应用研究作了较为详细的概述。

2 大气湍流效应及其对通信系统性能的影响

大气折射率随空间和时间作无规则的变化使得光载波在传输过程中随机地改变其光波参量, 导致传播

收稿日期: 2008-04-22。

作者简介: 吴晗玲(1979-), 男, 博士研究生, 主要从事大气湍流对激光通信链路的影响及其自适应光学补偿技术研究。

后的光束质量大大降低,出现所谓强度闪烁、光束漂移以及光束扩展等大气湍流效应,严重地影响了光信号传输结果,从而导致通信系统性能的急剧下降^[4]。

2.1 大气湍流效应

强度闪烁是大气湍流效应的一个重要表现,也是影响基于直接检测的光通信系统性能的一个主要因素。它会使激光信号受到随机的寄生调制而呈现出额外的大气湍流噪声,使接收信噪比减小,增加了通信系统误码率。这种湍流效应主要是由于同一光源发出的光通过不同路径的光线之间随机干涉的结果。它的度量是光强起伏的归一化方差^[4](又称闪烁指数):

$$I_1^2 = E\{I^2\} / (E\{I\})^2 - 1$$

这里 I 是载波光强, $E\{\cdot\}$ 表示系综平均。由于在大气湍流的作用下,系统的接收光强是一个随机起伏量,所以概率分布是光强起伏统计特征的最基本的描述方法。目前已经提出了多种光强起伏的概率密度函数模型。一这些分布模型一般都包含着可调节的参量,也有着各自不同的适用范围,寻找一个适用于所有湍流强度条件下的普适模型一直都是研究者所关注的热点,这个普适模型应该具有以下特征^[6]: 数学上易于处理、适合所有湍流强度和模型参数应与大气特性直接相关。

弱起伏条件下,光强起伏服从对数正态分布^[6]。但最近研究发现,弱起伏区的光强起伏分布并不是一个真正的对数正态分布,实验结果和模拟数据均表明,起伏分布的尾端偏离对数正态统计值。从理论上来看显然也是这样,因为 Rytov 近似中只保留到二阶扰动项,第一阶项是高斯型分布,第二阶项不是高斯型分布,从而导致由此所得的概率分布不是一个真正的对数正态分布。与测量数据相比,其尾端值与对数正态统计值有较大的偏差。而概率密度函数尾端值对激光雷达和激光通信系统有着重要的影响,因为其探测概率或衰落概率主要是由给定概率密度函数尾端部分计算得到的。

强起伏条件下, K 分布与对数调制负指数分布与实验结果相一致。 IK 分布、对数正态调制 Rician 分布和 gamma-gamma 分布^[2] 都可用来描述所有湍流条件下的光强起伏行为。球面波的数值模拟及实验数据均表明对数正态调制 Rician 分布适用于对各种湍流强度条件下光强起伏行为的分析,而 gamma-gamma 分布则获得了数值模拟结果的支持且由于该模型易于进行数学处理,现在应用较为广泛。以上这些理论结果与实验或数值模拟结果的比较都是球面波或平面波在水平路径上传输,使用小孔径接收器(点接收)所获得的。

孔径平均对光强起伏的概率分布有着重要的影响^[6]。研究表明,在中等强度的湍流下,足够大孔径上的光强起伏概率分布是对数正态分布。文献[6]对发散高斯光束在中等强度的大气湍流中近地面水平传输进行了研究。实验在两种湍流强度条件下,使用三种不同孔径的接收器收集测得光强数据,并与数值模拟、理论结果(对数正态模型和 gamma-gamma 模型)进行了分析比较。结果表明,在所有情况下,实验结果和数值模拟结果都非常吻合,这也说明了数值模拟方法在光信号大气传输研究中具有很大的优越性。

如果激光光束直径远小于湍流的特征尺度时,则湍流的主要影响是使光束作为一个整体产生随机偏折,在远处接收平面上,光束将以某个位置为中心发生快速随机性的跳动,此现象称为光束漂移。在这种情况下,光束的漂移则会使激光束偏离接收孔径,降低信号强度,甚至引起通信中断。

所谓光束扩展是指接收到的光斑半径或面积发生变化,一般分为短期扩展和长期扩展。它是与激光通过大气湍流传输后光束强度降低相关联的一种湍流效应。因为这种湍流效应与检测信号强度直接相关,所以深入了解光束的湍流扩展规律对大气激光通信链路的设计有着十分重要的意义。

在不同的应用中由于通信链路的不同,所以大气湍流对光信号的影响也不同。如在卫星-地面通信系统的下行链路中,光束经过长距离的真空传播,到达大气层顶部时,其直径已扩展得比大气湍流外尺度大,故大气湍流对光信号的影响基本上只有光束扩展和小尺度引起的闪烁效应,此时漂移效应可以忽略;而对于同等条件下的上行链路,光束漂移、扩展和闪烁效应同等重要。另外,对于在大气层内使用的通信系统,各种湍流效应对光信号的影响都比较明显,如近地面长程传输的水平链路中,即使是弱湍流条件,随着传播距离的增加,信号光到达接收孔径时依然会有较为严重的闪烁效应。因此在大气激光通信系统的设计和分析以及实施自适应光学相位补偿技术时,必须要考虑到这些通信链路的差异性,有针对性的设计可以使通信系统获得最佳效果。

综上所述,大气湍流效应是影响大气激光通信链路的最重要因素之一。从某种角度来说,大气激光通信能否大规模的应用到实际中,很大程度上受制于大气湍流的抑制或缓解技术能否得到有效突破,目前所采取的一些方案和技术只能在某些条件下起到一定的缓解作用,还未从根本上解决这个问题。

2.2 大气湍流对信噪比及误码率的影响

信噪比和误码率作为通信系统的重要性能指标,大气湍流对它们的影响正日益受到重视。L.C.Andrews [2]在仅考虑散粒噪声极限情况下,推出大气湍流环境中通信系统的平均信噪比为:

$$E\{SNR\} = \frac{SNR_0}{\sqrt{P_{s0}/E\{P_s\} + {}_1^2(D) SNR_0^2}}$$

式中 SNR_0 、 P_{s0} 分别是不考虑大气湍流效应时系统的信噪比及接收到的信号功率,而 $E\{P_s\}$ 是大气湍流环境中系统接收到的平均信号功率,功率比 $P_{s0}/E\{P_s\}$ 提供了湍流导致的信噪比降低程度的一种度量,实际上它的倒数就是接收信号的 Strehl 比。 ${}_1^2(D)$ 是一定接收孔径下的闪烁指数,它反映了孔径平均效应对平均信噪比的影响。所以式 (1) 给出了大气湍流和孔径平均条件下的系统平均信噪比表达式。

在大气湍流信道中,开关键控(OOK)调制模式的系统误码率^[2]为:

$$BER = \frac{1}{2} \int_0^\infty p_1(s) \operatorname{erfc} \left(\frac{E\{SNR\}s}{2\sqrt{2}} \right) ds$$

其中, $\operatorname{erfc}(\cdot)$ 是误差补函数, $p_1(s)$ 为归一化光强分布的概率密度函数。

式 (1)、式 (2) 将大气湍流统计特性和通信系统性能参数联系在一起,是理论分析及数值仿真中用以评估大气激光通信系统性能的主要手段之一。

3 自适应光学相位补偿技术

鉴于自适应光学技术在天文观测和激光传输领域的成功应用,人们进行了大量的实验研究和理论探索,指出同样可以使用自适应光学相位补偿技术来抑制和缓解大气湍流信道对光通信链路产生的不利影响。

从控制系统的观点看,自适应光学系统是多变量、高带宽、高精度、多路并行的以光学波前为控制对象的实时反馈自动控制系统,其实质是控制和校正像差光波面使其达到参考光波面。因此,在一定条件下,采用自适应光学技术可以抑制和缓解大气信道对激光传输产生的动态波前误差。

Tyson^[7]首先在弱湍流条件下,通过引入自适应光学滤波函数,研究了激光信号衰减和上涨的统计特性与自适应光学系统参数之间的关系。理论分析表明,如果在上行链路和下行链路中将常规自适应光学技术引入激光通信系统中,则可以有效地降低由于大气湍流所造成的信号衰减和上涨幅度。

误码率的分析始终是激光通信系统性能分析的一个主要方面,Tyson^[8]针对 OOK 调制模式误码率表达式,利用 Gamma-Gamma 光强起伏分布,在弱、中等和强湍流条件下,分析了下行链路、上行链路和水平传输几种通信场景下的系统误码率,并考虑了自适应光学技术对非相干检测模式的影响。分析表明,在弱和中等强度的湍流条件下,使用常规自适应光学系统通过减小闪烁效应对进行光信号的补偿,改善效果很明显,可以使通信系统的误码率提高几个数量级。而后,Tyson^[9]通过实验获得光强分布的概率密度函数,利用式 (1) 和式 (3) 间接测出系统误码率,对补偿前和补偿后得到的误码率作了比较。结果表明,在较弱湍流条件下,使用常规自适应光学系统后,通信系统的误码率得到了明显的下降。

2002年,美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室^[10]采用常规自适应光学系统进行了斜程 28.2km 光通信数值模拟实验,传输速率为 10Gb/s,自适应光学系统用于下行链路波前畸变校正。从实验结果可以看出,自适应光学校正后相位面比较校正前平滑了很多,且光纤耦合效率从 20% 提高到 55%。

Belmonte^[11]从数值模拟的角度研究了在大孔径接收端使用自适应光学技术对通信系统误码率的改善效果。他假设大孔径接收的光强起伏概率分布服从正态分布概率模型,首先通过数值模拟获取校正前后的归一化光强和方差,根据正态分布模型计算其相应的概率密度函数,最后通过式 (2) 就可得到通信系统的误码率。显然,在孔径平均效应和自适应光学相位补偿技术的共同作用下,通信系统误码率得到明显的降低。

从以上研究结果来看,常规自适应光学技术对在弱湍流场景中的通信系统具有很好的改善效果。但在中到强湍流场景中,常规自适应光学系统的作用就有限,这主要是因为较强湍流环境中,由于光波信号的振幅起伏给波前探测带来很大的误差,因而波前控制器无法准确地复原相位,使得常规自适应光学系统的校正能力受到了限制。由于不使用波前传感器的自适应光学系统^[12]避开了波前探测这一环节,再加上随机并行优化算法的逐渐成熟而使得该自适应光学系统日益受到人们的重视。Weyrauch 等人^[13]所采用的实验台由用于倾斜控制的光束定向系统和基于随机并行梯度下降算法的高分辨率自适应光学系统组成,其中高分辨率自适应光学系统主要由超大规模集成电路实现的随机并行梯度下降控制器和 132 单元微机电变形镜组成,把接收器上接收到的信号强度作为优化指标。实

验结果证明了在强湍流条件下该自适应光学系统对波前畸变的抑制能力和降低信号衰减的有效性。由于基于随机并行梯度下降算法的自适应光学系统不但能够在常规自适应光学技术能够工作的弱、中等湍流情况下工作,而且能够适应强湍流环境,再加上硬件实现相对简单(不需要波前传感器),该类自适应光学技术正越来越受到自适应光学系统研究领域的重视,其应用面也将越来越广。

但是,已有的理论及数值仿真研究结果都是在作了过多简化的基础得到的,如 Tyson 和 Belmonte 的关于自适应光学相位补偿技术在通信系统中应用的工作都是只考虑一种较理想的情况:通过去掉 Zernike 畸变模式的前若干阶来实现相位校正,而没有针对实际场景和实际的自适应光学系统作理论及数值仿真研究。另外,对于把自适应光学系统放在发射端和接收端对通信系统性能的改善效果有何异同也没有作更多定量的分析说明。美国劳伦斯-利弗莫尔国家实验室的工作则与通信系统联系不够紧密,没有详细考虑自适应光学系统对通信系统性能参数的改善效果。关于无波前传感器自适应光学系统在大气激光通信系统中的应用,大部分已有工作都还局限于原理性的论证阶段,对实际通信系统的性能参数有多大程度的提高还没有定量的结论。鉴于在评估自适应光学系统对天文成像系统和激光传输系统的影响时,数值仿真技术发挥着重要的作用,我们同样可以利用数值仿真技术来考察大气湍流对无线激光通信系统性能的影响以及自适应光学系统在其中可能发挥的作用,这可以弥补解析理论分析和实验研究的不足。

4 结束语

本文分析了大气湍流效应的特点,由于接收平面上光强起伏的概率分布对评估激光通信系统性能有非常重要的作用,故对目前在光强起伏的概率分布方面的研究进展作了较详细的评述。同时,对大气湍流信道对通信系统的信噪比和误码率的影响也作了说明,指出自适应光学相位补偿技术可以有效地改善通信系统性能;而基于随机并行梯度下降控制算法的自适应光学技术由于其适应面广、结构相对简单,在将来可能有较为广泛的应用。

由于大气湍流效应及激光通信系统本身的复杂性,解析理论分析面临着很大的挑战,只能解决某些特定条件下的问题,对整个系统性能的分析也是在大量

简化条件下得出的,这使得解析理论分析受到了一定的限制;而实验研究则面临着成本高、周期长等不利因素;因此,在对系统进行设计之前,进行数值仿真计算和开展数值模拟研究是非常必要和有益的,它可以优化系统设计、缩短实验周期和降低成本。这对于加速大气激光通信的民用化和实用化都具有重要的实际意义。

参考文献:

- [1] 李玉权,江平,朱勇.光通信原理与技术[M].北京:科学出版社,2006.
- [2] ANDREWS L C, PHILLIPS R.L. Laser beam propagation through random media[M]. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 2005.
- [3] TYSON R K. Principle of Adaptive Optics [M]. San Diego: Academic Press, 1991
- [4] 柯熙政,席晓莉.无线激光通信概论[M].北京:北京邮电大学出版社,2006.
- [4] FRIDA S V, CYNTHIA Y. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence [J]. Applied Optics, 2007, 46(11):2099-2107.
- [5] 塔塔尔斯基 B.N.湍流大气中波的传播理论[M].温景嵩,宋正方,等译.北京:科学出版社,1978.
- [6] FRIDA S V, CYNTHIA Y. Aperture averaging effects on the probability density of irradiance fluctuations in moderate-to-strong turbulence [J]. Appl. Opt., 2007, 46(11): 2099-2107.
- [7] TYSON R K. Adaptive optics and ground-to-space laser communications [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 1996, 35(19):3640-3646.
- [8] TYSON R K. Bit-error rate for free-space adaptive optics laser communications [J]. J. Opt. Soc. Am. A, 2002, 19(4): 753-758.
- [9] TYSON R K., CANNING D E. Indirect measurement of a laser communications bit-error-rate reduction with low-order adaptive optics [J]. Appl. Opt., 2003, 42(21): 4239-4243.
- [10] YANG Changqi, JIANG Wenhan, RAO Changhui. Bit-error rate for free-space optical communication with tip-tilt compensation [J]. Waves in Random and Complex Media, 2006, 16(3):281-292
- [11] WILKS S C, MORRIS J R, et al. Modeling of Adaptive Optics-based free-space communications systems [C]. Proceedings of SPIE, 2002, 4821: 121-128.
- [12] ANICETO Belmonte, ALEJANDRO Rodríguez. Performance evaluation of an adaptive optics, free-space laser communications system from simulation of beam propagation [C]. Proceedings of SPIE, 2006, 6399: 639905-1-639905-12.
- [13] VORONTSOV M. A., CARHART G W, PRUIDZE D V, et al. Image quality criteria for an adaptive imaging system based on statistical analysis of the speckle field [J]. J. Opt. Soc. Am. A. 1996, 13(7): 1456-1466.
- [14] WEYRAUCH T, VORONTSOV M A. Free-space laser communications with adaptive optics: Atmospheric compensation experiments [J]. Journal of Optical and Fiber Communications Reports, 2004, 1(4):355-379.