

星地光链路中孔径平均效应对相偏估计性能的影响

李宏伟^{1,2,3,4}, 黄永梅^{1,3,4*}, 王强^{1,3,4}, 彭真明²

(1.中国科学院 光束控制重点实验室,成都 610209;2.电子科技大学 信息与通信工程学院,成都 611731;

3.中国科学院 光电技术研究所,成都 610209;4.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为了实现相干接收,提高星地光通信系统的性能,针对星地光链路的数字相干接收系统,分析了接收机孔径平均效应对相偏估计算法性能的影响;对比了当信道为常参信道(接收口径足够大)和大气湍流信道(有限接收口径)时,相偏估计性能的差别;给出了相偏估计误差与接收机孔径之间的关系曲线。仿真实验表明:当孔径在30cm以下时,相偏估计误差受孔径大小的影响较为明显。

关键词:星地光链路;孔径平均;相偏估计;估计误差;大气湍流

中图分类号:TN256 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)06-0050-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.06.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Influence of aperture average effect on the performance of phase offset estimation in satellite-to-ground optical links

LI Hongwei^{1,2,3,4}, HUANG Yongmei^{1,3,4*}, WANG Qiang^{1,3,4}, PENG Zhenming²

(1. Key Laboratory of Optical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 2. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 3. Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to achieve coherent reception and improve the performance of satellite-to-ground optical communication system, for the digital coherent receiving system of satellite-to-ground optical link, the influence of receiver aperture averaging effect on the performance of phase offset estimation algorithm is analyzed. Difference in performance of phase offset estimation is compared when the channel is a constant parameter channel (receiving aperture is large enough) and atmospheric turbulence channel (limited receiving aperture). The relationship curve between phase offset estimation error and receiver aperture is given. The simulation results show that when the aperture is below 30cm, the phase offset estimation is error obviously affected by the aperture size.

Key words: satellite-to-ground optical link; aperture averaging; phase offset estimation; atmosphere turbulence

0 引言

空间激光通信系统以其安全性高、传输速率高和抗干扰能力强等优点,受到国内外诸多学者和工程技术人员的高度重视。除了卫星间的光通信链路外,星地光链路、机载终端与地面之间的光链路和地面不同

终端之间的光链路等都需要经过大气信道。由于大气信道会对光通信系统产生许多不良影响,如大气吸收导致接收到的信号能量下降、大气中粒子对光信号造成散射而引发多径干扰以及大气湍流会引起光信号的光强闪烁和波前畸变等^[1]。因此,接收机接收到的光信号经常是信噪比不高且伴随着闪烁,当存在较强的大气湍流时,尤其如此。由于空间光通信系统具有上述特点,所以保证较高的系统性能和提高接收机的灵敏度是一项有效的措施。相干接收方案可以利用接收机本振光的放大作用,提升接收机灵敏度^[2],相干接收也是目前学术界的一个研究热点。但是,实施零差相干接收,需要本振光与信号光同频同相,这是一个技

收稿日期:2019-01-20。

基金项目:国家自然科学基金(61571096)资助。

作者简介:李宏伟(1985-),男,博士生,主要研究方向为空间光通信技术与信号处理。曾参与多项空间光通信相关课题的研究,并长期从事外场实验工作。

*通信作者:黄永梅(E-mail:huangym@ioe.ac.cn)。



术实现的难点。现在可供选择的相干接收方案有 2 种:第一种为使用锁相环对本振光与信号光之间的频偏与相偏进行估计,从而控制本振激光器的参数,实现对信号光频率与相位的跟踪;第二种为先使信号光与本振光在混频器中混频,且不去控制本振光,混频后进行光电探测和数字化采样,然后对采样得到的数字信号进行处理,通过数字信号处理(DSP)系统估计出频偏与相偏,进而进行数字域补偿^[3,4]。由于使用锁相环的办法难度大、成本高,而随着高速模数转换器(ADC)和高性能 DSP 系统的飞速发展,使得数字相干接收表现出明显的优势。除了相干接收,适当增加接收孔径的面积,也是一个提高链路性能的有效措施^[5]。孔径增大不仅可以接收到更多的信号能量、增加信噪比,还可以借助孔径平均效应,减轻大气湍流导致的光强闪烁程度。

目前,对于数字相干接收的研究多数集中在恒参信道(光纤通信系统),而对空间激光通信系统的数字相干接收研究不多,特别是关于大气湍流和接收孔径大小对数字相干接收的影响的文献很少。因此,本文针对数字相干空间光通信系统,研究接收机孔径平均效应对相偏估计算法性能的影响。

1 接收机模型

一个典型的基于 DSP 的接收机模型如图 1 所示。

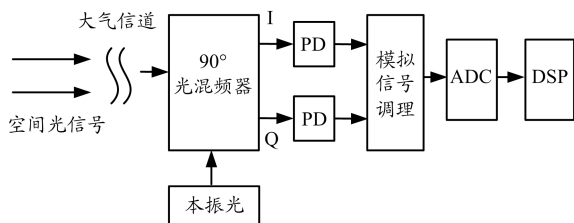


图 1 空间光通信系统的数字相干接收机结构

经过大气信道的光信号,在混频器中与本振光混频后,分为同相(I)通路和正交(Q)通路。在光电探测器(PD)中转化成电信号,再经过模拟信号调理过程,由 ADC 转化为数字信号,最后进入 DSP 环节。DSP 单元在 k 时刻输入的信号 r_k 可表示为^[2]:

$$r_k = e^{j(\omega_{if}k + a_k + \theta_k)} + n_k \quad (1)$$

其中, $e^{j(\cdot)}$ 为模值是 1 的复数, ω_{if} 为本振光与信号光之间的频偏, θ_k 为相偏, a_k 为正交相移键控(QPSK)的调制信息 ($a_k = \left\{ \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4}, \frac{7\pi}{4} \right\}$), n_k 为高斯白噪声。

对于星地光通信下行链路,接收到光强的闪烁指数 $\sigma_I^2(d)$ 是接收孔径 d 的函数,即光强方差,可以表示为^[6]:

$$\sigma_I^2(d) = 8.7k_0^{7/6} (H-h_0)^{5/6} \sec^{11/6}(\zeta) \times \text{Re} \int_{h_0}^H C_n^2(h) \times \left[\left(\frac{k_0 d^2}{16(H-h_0) \sec \zeta} + i \frac{h-h_0}{H-h_0} \right)^{5/6} - \left(\frac{k_0 d^2}{16L} \right)^{5/6} \right] dh \quad (2)$$

其中, k_0 为波数 ($k_0 = 2\pi/\lambda$), λ 为光信号波长, H 和 h_0 分别是卫星和地面接收机的海拔高度。 ζ 和 L 分别为卫星天顶角和链路长度。 $C_n^2(h)$ 为大气折射结构参数,且为海拔高度 h 的函数,又与 rms 风速和 $C_n^2(0)$ 相关,具体含义可参见文献[7]。定性分析式(2)可知,随着接收孔径面积的增大,光强闪烁指数不断减小。

2 相偏估计算法

由于本文研究的是接收孔径大小对相偏估计性能的影响,此处忽略频偏 ω_{if} , 设其为 0, 对式(1)做 4 次指数运算:

$$r_k^4 = \left[e^{j(a_k + \theta_k)} + n_k \right]^4 = e^{j4(a_k + \theta_k)} + 4e^{j3(a_k + \theta_k)} n_k + 6e^{j2(a_k + \theta_k)} n_k^2 + o(n_k^2) \quad (3)$$

忽略等式右侧的后 3 项,得:

$$r_k^4 \approx e^{j4(a_k + \theta_k)} = e^{j4\theta_k} \quad (4)$$

于是近似认为:

$$\theta_k = \frac{\arg(r_k^4)}{4} \quad (5)$$

这便是被广泛使用的用于估计相偏的 Viterbi-Viterbi(V-V)算法。由于该算法受到噪声影响,所以常采用对连续 N 个估计值求平均值的方法来抑制噪声^[8],即:

$$\theta_k = \frac{1}{4} \arg \left(\sum_{i=1}^N r_i^4 \right) \quad (6)$$

其中, N 为信息符号总数, r_i 为第 i 个信息符号。本文主要研究当 $N=6$ 和 $N=12$ 时,湍流信道对 V-V 算法性能的影响。

3 实验与仿真结果

由上节内容可知,经过大气信道的光信号进入接收机后,其闪烁的强度与接收孔径大小有关。光强闪烁的时域曲线和直方图如图 2 所示。

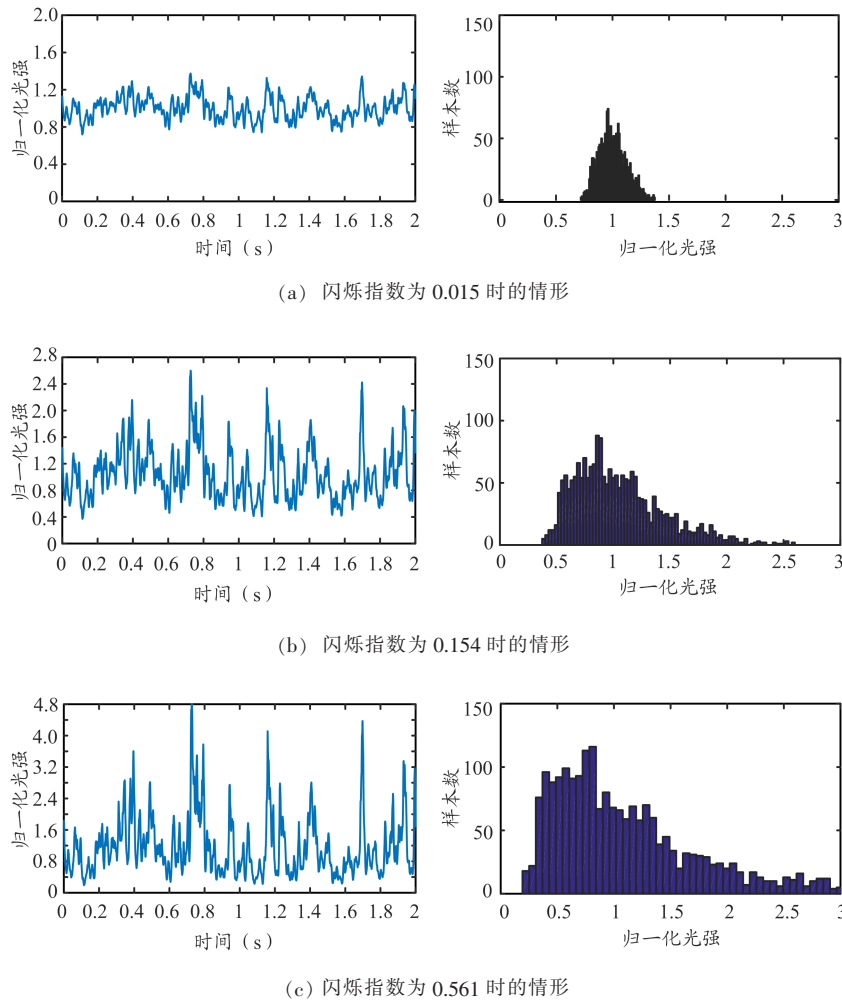
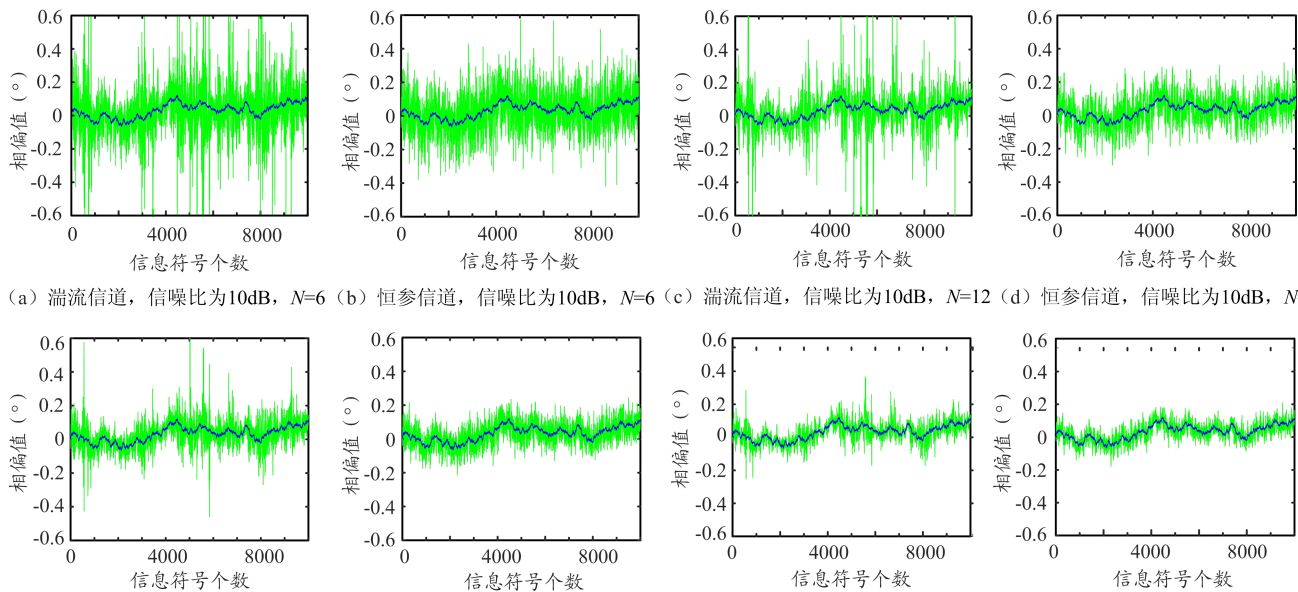


图 2 光强闪烁的时域曲线和直方图

设有一低轨卫星, 轨道高度为 570km, rms 风速为 76m/s, 地面 $C_n^2(0)$ 为 1.7×10^{-13} , 图 2 显示的数据相当于分别在接收孔径为 0.64m、0.21m 和 0.04m 的接收机接收到的光信号的闪烁强度。可以看出, 接收孔径越小, 光强闪烁越剧烈, 低信噪比符号出现的概率越高。

本文选择图 2(b)中的数据(接收孔径为 0.21m)来分析 V-V 算法的相偏估计性能。同时, 为了突出湍流对 V-V 算法性能的影响, 我们给出了 V-V 算法在恒参信道中对相偏的跟踪曲线, 如图 3 所示。这里“恒参”的意思是光信号通过信道后不存在闪烁, 即信道增益为一常数。在实际工程中, 只有接收孔径足够大时, 信道才近似为恒参, 这可以看成是孔径平均效应达到极限时的情形。

本振光与信号光之间的相偏是一个随时间变化的量, 可用维纳过程描述^[9]。图 3(a)、图 3(c)、图 3(e)和图 3(g)为湍流信道下 V-V 算法对相偏的估计曲线; 图 3(b)、图 3(d)、图 3(f)和图 3(h)则表示恒参信道下的情形。无论是湍流信道还是恒参信道, 在相同信噪比下, $N=12$ 的效果明显优于 $N=6$ 的效果。在 N 与信噪比都相同时, 恒参信道中的相偏估计误差在

图 3 当信道为湍流信道($d=0.21\text{m}$)和恒参信道(孔径足够大)时, V-V 算法对相偏的跟踪曲线

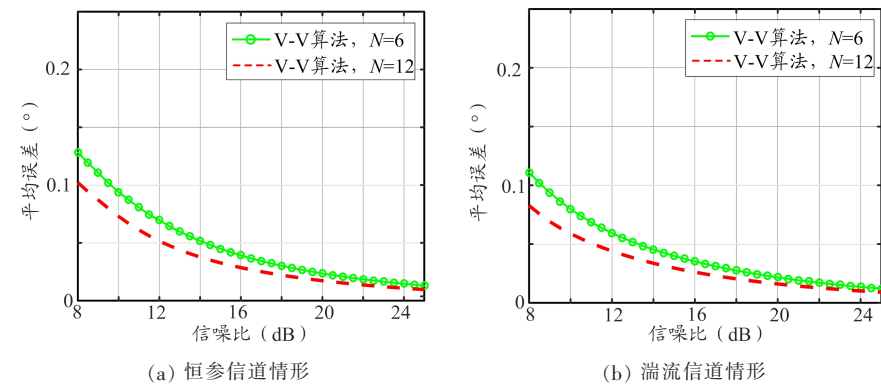


图4 信噪比与平均相偏估计误差的关系曲线

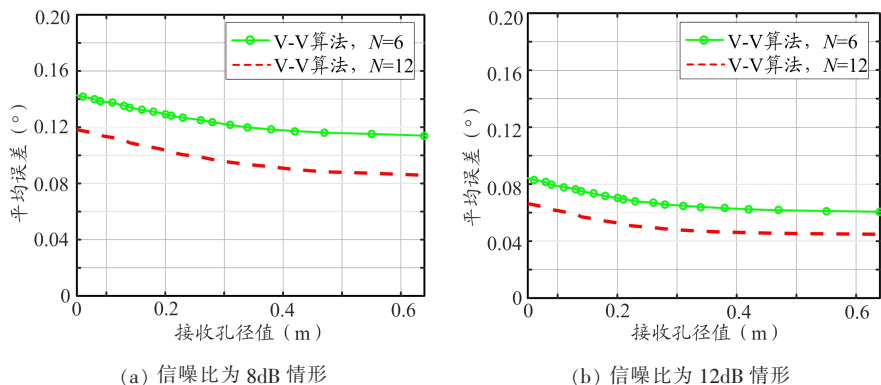


图5 接收孔径与平均相偏估计误差的关系曲线

时间上分布较为均匀,而大气湍流则会导致相位跟踪曲线在局部上出现大量的较大的误差(毛刺),这是由于光强闪烁造成许多低信噪比的信息位。

为了定量地体现出信噪比对相偏估计误差的影响,图4给出了二者之间的关系曲线。纵坐标为在当前信噪比下,对10000个信息位进行相偏估计所产生的误差的平均值。在低信噪比时, $N=12$ 与 $N=6$ 的效果差别较为明显,随着信噪比增加,二者的性能差别逐渐减小。由图4可知,由于接收孔径大小有限,导致光强闪烁的存在,出现了大量的低信噪比的信息符号,从而使得相偏估计的平均误差高于恒参信道,在平均信噪比较低时,这种情况表现得更加明显。随着平均信噪比增加,湍流带来的负面影响逐渐减弱。

为了进一步分析接收孔径大小对相偏估计性能的影响,图5给出了当平均信噪比为8dB和12dB时,相偏估计误差与接收孔径大小之间的关系曲线。可以看出,当接收孔径在30cm以下时,相偏估计误差受接收孔径大小影响较大;当接收孔径达到40cm以上时,相偏估计误差随接收孔径大小变化趋缓。

4 结束语

本文针对星地激光通信链路的数字相干接收机,

考察了接收机孔径平均效应对相偏估计算法的影响。随着接收机孔径的增大,光强的闪烁强度减弱,相偏估计误差减小。适当增加接收孔径面积,可有效抑制大气湍流导致的信号光强闪烁,从而提高通信系统性能。但是,随着接收孔径的增大,湍流引起的波前畸变也将增大,从而降低了相干接收机的性能。因此,选择适当的接收机孔径面积是一项重要的工作。此外,光强闪烁产生大量的低信噪比的信息位,而这些低信噪比的信息位的设计精度更高的相偏估计算法将成为下一步工作的重点。

参考文献:

- [1] KAUSHAL H, KADDOUM G. Optical communication in space: challenges and mitigation techniques [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2017, 19(1): 57–96.
- [2] NIU M, SONG X, CHENG J, et al. Performance analysis of coherent wireless optical communications with atmospheric turbulence [J]. Optics Express, 2012, 20(6): 6515–6521.
- [3] SCHAEFER S, GREGORY M, ROSENKR-ANZ W. Coherent receiver design based on digital signal processing in optical high-speed intersatellite links with M-phase-shift keying [J]. Optical Engineering, 2016, 55(11): 11614-1–11614-12.
- [4] KAZOVSKY L G, KALOGERAKIS G, SHAW W T. Homodyne phase-shift-keying systems: Past challenges and future opportunities [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4876–4884.
- [5] YUKSEL H, MILNER S, DAVIS C. Aperture averaging for optimizing receiver design and system performance on free-space optical communication links [J]. Journal of Optical Networking, 2005, 4(8): 462–475.
- [6] PHILLIPS R L. Laser Beam Propagation through Random Media, 2nd ed[M]. Washington: SPIE Press, 2005: 481–496.
- [7] TOYOSHIMA M, TAKENAKA H, TAKAYAMA Y. Atmospheric turbulence-induced fading channel model for space-to-ground laser communications links[J]. Optics Express, 2011, 19(17): 15965–15975.
- [8] ZAFRA, ORTEGA S, JACOBSEN X, et al. Phase noise tolerance study in coherent optical circular QAM transmissions with Viterbi-Viterbi carrier phase estimation[J]. Optics Express, 2014, 22(25): 30579–30585.
- [9] WANG Yan, SERPEDIN E, CIBLAT P. Optimal blind nonlinear least-squares carrier phase and frequency offset estimation for general QAM modulations [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2003, 2(5): 1040–1054.