

文章编号: 1002-2082(2004)06-0031-03

水平均匀大气中多束光在接收面上的相关性及其对光强起伏的影响

刘维慧, 吴 健

(电子科技大学 光电信息学院, 四川 成都 610054)

摘 要: 在科尔莫戈罗夫理论的基础上, 推广了光束在接收面上相关函数的物理含义。分析了多光束在接收面上的相关性, 并在此基础上形成多光束光强起伏方差的解析表达式。分析结果表明, 随着信道间距的增加, 信道相关性下降, 到达接收面的光强起伏方差降低; 当信道完全重合, 即相关系数变为 1 时, 叠加后的光强起伏方差没有明显降低, 与单光束时没有区别; 在允许范围内增加光束数目可降低光强起伏。

关键词: 大气湍流; 相关系数; 光强起伏方差; 对数幅度起伏

中图分类号: TN249-34

文献标识码: A

The Correlation Study of Channels in Horizontal Multi-beam Atmospheric Communication

LIU Wei-hui, WU Jian

(School of Opto-electronic Information, UESTC, Chengdu 610054, China)

Abstract: On the basis of Kolmogorov theory, the physical meaning of beam correlation function on receiving plane is extended. Based on the correlation analysis of multiple beams crossing over the atmosphere. The analytical solution formula of the light-intensity oscillation variance of multiple beams is deduced. The result shows along with the spacing increase of channels, the channel correlation decreases, and so does the oscillation variance. When the channels overlap completely, the light-intensity oscillation variance of multiple channels is no difference from that of one channel.

Keywords: atmospheric turbulence; correlation coefficient; light-intensity oscillation variance; logarithm amplitude fluctuation

引言

近年来, 近地面大气激光通信再度成为研究的热潮, “最后 1 km 接入”的研究已形成商品, 进入初步使用阶段。大气通信与其他通信方式相比有诸多优点: 封装费用低、保密性好、机动性能强和数据率高等。但它受大气的影 响比其它通信方式明显, 除了大气汽溶胶引起的信道衰减外, 大气湍流也会对信道产生影响, 主要表现在大气闪烁、光束漂移、光束扩展和到达角起伏等方面。为克服湍流的影响, 部分光通信产品采用多孔径发射, 即采用多光束来降低大气湍流的衰落, 以提高通信质量。美国 AstroTerra 公司做过 1、2、4、8 和 16 孔径的近地大

气通信实验, 使归一化的光强起伏方差降低 3~8 dB^[1]。此实验局限于各光束等晕域外的多束光, 即在光束之间互不相关的基础上进行的。理论与实验证明^[2~4], 由于湍流的相关性, 各光束在接收平面上的幅度起伏也具有相关性, 加上在实际通信中各通道最后总有重合的部分, 所以大气湍流对各光束的影响是不可能看作完全独立的。多光束大气通信的理论研究还未见有文献报道, 因此对各通道之间的相关关系进行分析是非常必要的。

1 理论分析

对于一个通信系统来说, 为保证接收端能落在

收稿日期: 2003-09-15

作者简介: 刘维慧(1977-), 女, 山东临沂人, 硕士研究生, 主要从事激光工程方面的研究工作。

发射光束之内,发射光束的发散角不应很小。光束到达接收端时,光斑尺寸通常都比接收孔径大很多。因此,用平面波近似是可行的。在分析一个光束通过科尔莫戈罗夫弱湍流时,只考虑 $\sqrt{\lambda L} \gg l_0$ 的情况 (l_0 为湍流内尺度,实际中这种情况总是满足的)。光束传播距离 L 后,在接收平面对数光场起伏的归一化相关函数为^[2]

$$B(r, L) = \frac{\int_0^{\infty} J_0\left(\frac{1}{r} \sqrt{\frac{xk}{L}}\right) (1 - \sin x/x) x^{-4/3} dx}{\int_0^{\infty} (1 - \sin x/x) x^{-4/3} dx} \quad (1)$$

式中, r 为接收面上两点之间的距离; k 为波数; $J_0\left(\frac{1}{r} \sqrt{\frac{xk}{L}}\right)$ 为零阶贝塞耳函数。在通信系统中,各子孔径发射的光束总是平行的。假设各光束之间的间距为 r , 光束到达接收面形成各自光斑后,各光斑上任意 2 对应点的距离为 r (参见图 1), 接收面上相距 r 的 2 点的情况就反映了发射孔径间距为 r 时它们各自光斑中起伏的相关情况。所以, (1) 式中的 r 就可以被认为是发射孔径间距。图 2 示出以 $r/\sqrt{\lambda L}$

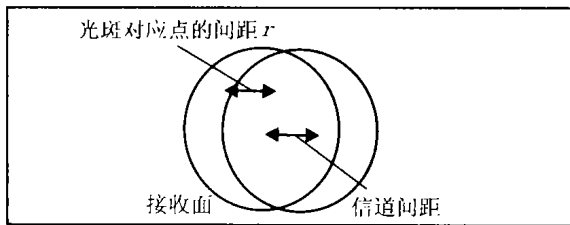


图 1 信道间距与光斑上对应点的关系

Fig. 1 The relationship of channel spacing and responding points 为纵坐标的相关函数 $B(r, L)$ 的变化规律。图 2(a) 表示相关函数随 r 和 L 变化的情况; 图 2(b) 为 (a) 的局部放大变化图。可以看出, $r/\sqrt{\lambda L} = 0.54$ 时, $B(r, L) = 0$ 。定义 r_0 为相关距离, 它具有 $\sqrt{\lambda L}$ 的量级, 当取 $\lambda = 780 \text{ nm}$, $L = 5 \text{ 000 m}$ 时, r_0 约为 6 cm。负值区的存在说明, 在接收平面上任意 2 个相距为非涅耳距离的点, 从平均意义上讲, 当其中一个点处于比平均值更亮一些的区域时, 另一个点则处于较暗的区域, 两者的变化相反^[2]。当两个大气信道之间的距离 $r < r_0$ 时, 对数幅度具有一定的相关性; 当 $r > r_0$ 时, 对数幅度的变化不再相似, 即变得几乎不相关。

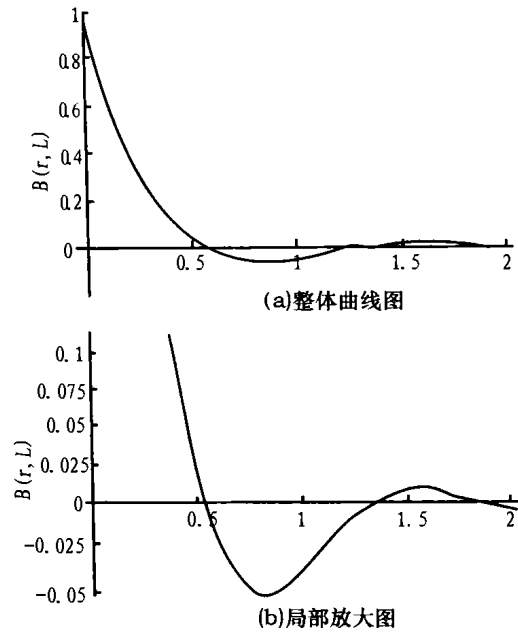


图 2 相关函数 $B(r, L)$ 与 $r/\sqrt{\lambda L}$ 的关系图

Fig. 2 Relevant function $B(r, L)$ versus $r/\sqrt{\lambda L}$

2 相关性对接收光强起伏的影响

由参考文献[1]可知, 光强起伏方差 σ_x^2 与传播距离 L 的关系为

$$\sigma_x^2 = 4 \times 0.124 C_n^2 L^{11/6} k^{7/6} \quad (2)$$

如果大气信道间距 $r \gg r_0$, 则 n 束光在接收面上的对数幅度起伏互不相关, 其叠加后的光强起伏方差^[5] 为

$$\sigma_{xn}^2 = \frac{1}{n} \sigma_x^2 \quad (3)$$

考虑到设备的机动性能及探测器实际大小, n 束光完全不相关的几率并不大, 所以必须考虑各光束之间的相关性对光强起伏的影响。为简化分析, 假设各光束之间间距相等且具有对称分布, 则叠加后的光强起伏方差为

$$\sigma_{xn}^2 = \frac{1}{n} (1 - \gamma) \sigma_x^2 + \gamma \sigma_x^2 \quad (4)$$

式中, 等式右边的第一部分表示光束不相关部分产生的光强起伏, 与 (3) 式相符; γ 为 (1) 式中的 $B(r, L)$, 即 $\gamma = B(r, L)$; 第二部分为光束之间的相关性引起的部分。从 (4) 式可看出, 随着 n 的增加, 光强起伏方差减小, 但当光束完全相关, 即 $\gamma = 1$ 时, n 束光的光强起伏方差与单束光的情形相同。

3 计算结果与分析

图3给出了4束光束通过各自通道后,光强起伏方差随传播距离 L 及信道间距 r 的不同,而在接收面上的变化情况。曲线从上到下依次为 $r=0, r=4\text{ cm}, r=8\text{ cm}$ 及 $r=10\text{ cm}$ 的情况。可以看出,随着传播距离的增大,光强起伏方差变大;随着信道间距变大,各光束通过相同大气湍流的可能性降低,信道的相关性下降,从而使光束间相互补偿的几率提高,接收面上的光强起伏随之减小。但是,当信道间距继续增加时,光强起伏的改善并不十分明显。

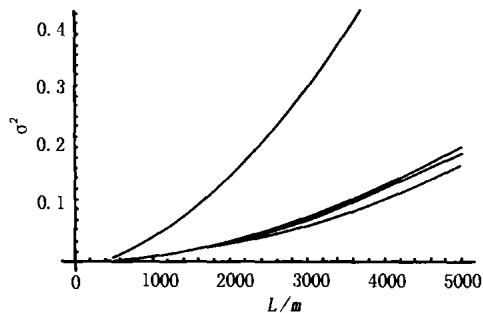


图3 4通道时起伏方差与传播距离 L 及信道间距 r 的关系图

Fig. 3 Curves of oscillation variance versus transmission distance L and channel spacing r with four channels

图4给出信道间距为定值6 cm时,接收面上的光强起伏方差随发射光束数量及传播距离的变化情况。曲线从上到下依次为 $n=1, n=4, n=6$ 及 $n=8$ 时的情况。可以看出,当大气状况稳定且发

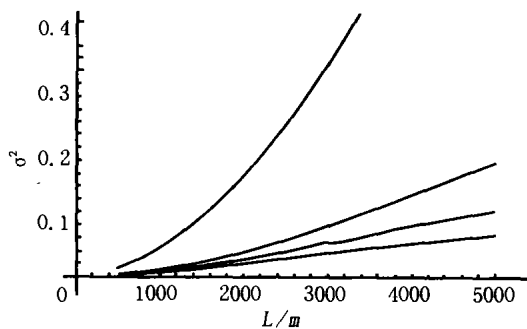


图4 信道间距 $r=0.06\text{ cm}$ 时,起伏方差随发射孔径数 n 与传播距离 L 的变化曲线图

Fig. 4 Variation of oscillation variance along with the aperture quantity n and transmission distance L when the channel spacing is $r=0.06\text{ cm}$

射孔径间距一定时,采用多孔径发射可以降低接收面上的光强起伏,孔径数目越多,光强起伏降低越明显,这与参考文献[1]中实验得到的结论完全一致。实际应用中要考虑设备的机动性与小型化,以及孔径数目适量。

图5给出传播距离为定值5 000 m时,光强起伏方差随信道间距 r 及发射孔径数目 n 的变化情况。曲线从上到下依次为 $r=4\text{ cm}, r=8\text{ cm}, r=10\text{ cm}$ 和 $r=12\text{ cm}$ 的情况。从图中可以看出信道间距为5~8 cm时,对光强起伏方差的影响不甚明显。

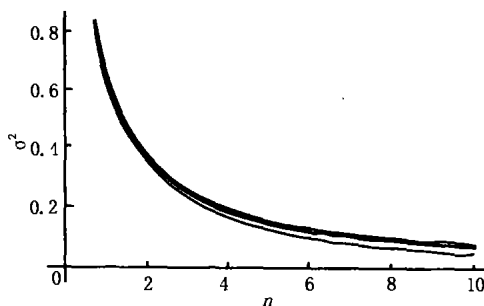


图5 光强起伏方差随发射孔径数量和信道间距的变化图

Fig. 5 Variation of light-intensity oscillation variance with the launching aperture quantity and channel spacing

4 结论

推导了多光束水平大气通信中信道的近似相关系数,在假设其统计平均的基础上,对接收平面上的光强起伏方差进行了初步的分析计算,得出的结果与Kim^[1]的实验结果基本吻合。

参考文献:

- [1] Isaac I Kim, Harel Hakakha. Scintillation reduction using multiple transmitters[J]. SPIE, 1997, 2990: 102-113.
- [2] 吴健,乐时晓. 随机介质中的光传播理论[M]. 成都: 成都电讯工程学院出版社, 1988.
- [3] 宋正方,范承玉. 湍流外尺度对大气相干长度和等晕角的影响[J]. 强激光与粒子束, 1994, 6(3): 17-20.
- [4] 李继陶. 统计光学基础[M]. 成都: 四川大学出版社, 1990.