

## 信道相关对空间分集接收信号闪烁的影响

沈 红, 范承玉

(中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031)

**摘 要:** 为了探究信道相关性对无线光通信中空间分集接收信号闪烁的影响, 给采用空间分集接收技术的通信端的各子孔径大小与分布设计提供参考, 理论推导了弱起伏条件下空间分集接收信道相关系数的表达式, 给出了信道相关系数与分集接收信号闪烁的关系; 数值研究了水平湍流均匀路径与整层大气湍流非均匀下行传输路径下的信道相关系数。结果表明, 对于平面波, 湍流非均匀路径下孔径接收时信道间存在明显的负相关特性。对于球面波, 湍流非均匀路径下孔径接收时的信道相关性与湍流均匀路径情况类似, 负相关特性都不明显。

**关键词:** 大气光学; 光通信; 信号闪烁; 信道相关系数

**中图分类号:** TN929.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)08-2523-05

## Influence of channel correlation on the signal scintillation with spatial diversity receiver

Shen Hong, Fan Chengyu

(Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In order to explore influence of channel correlation on the signal scintillation in free space communications system with spatial diversity receiver and provide references for design of the sub-aperture size and its distribution, the expression of channel correlation coefficient of spatial diversity receiver under weak fluctuation conditions was deduced in theory. The relationship between channel correlation coefficient and signal scintillation with spatial diversity receiver was obtained. Channel correlation coefficient under both horizontal uniform and whole layer download non-uniform turbulent propagation paths was numerically studied. For the plane wave, there is an obvious negative correlation property between sub-channels for aperture receiver under non-uniform turbulent propagation path. For the spherical wave, it is similar for both turbulent non-uniform path and uniform path for aperture receiver; the negative correlation properties are not obvious.

**Key words:** atmospheric optics; optical communication; signal scintillation; channel correlation coefficient

收稿日期: 2014-12-10; 修订日期: 2015-01-21

作者简介: 沈红(1988-), 女, 博士生, 主要从事激光大气传输和空间光通信方面的研究。Email: shustc@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 范承玉(1965-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事激光大气传输及校正方面的研究。Email: cyfan@aiofm.ac.cn

## 0 引言

当无线光通信链路经过大气信道时,大气闪烁会导致信号的衰落,严重影响无线光通信系统的性能。孔径平滑与多孔径接收(空间分集接收)都可以用于大气无线光通信中来对抗湍流造成的光信号的衰落,减小闪烁,从而降低系统误码率<sup>[1-2]</sup>。由于实际条件限制,接收孔径不可能很大,因此要综合考虑孔径平滑与空间分集效应来设计通信接收端的各子孔径大小与分布。分集技术通过对两个或多个不相关子信道的信号进行处理,以抑制无线光通信信道中的信号衰落及大气湍流导致的接收光强起伏,然而在实际应用中,各子信道间通常并非完全不相关的。有参考文献[3]认为,分集接收时,孔径间距大于第一菲涅耳尺度时,就可以认为各子信道间完全不相关,事实上此时信道间仍然存在一定的相关性。在空间分集接收系统中,各子信道的空间相关性对空间分集接收的性能有重要影响。

大多数文献对信道相关性的研究局限在理想化的水平湍流均匀路径和点接收的情况<sup>[1,4-5]</sup>,而考虑实际传输路径上湍流起伏和孔径接收的研究很少,因此对实际湍流不均匀路径和孔径接收下的信道相关性的研究是十分必要的。文中在 Kolmogorov 湍流假设基础上,推导了弱起伏条件下空间分集接收信道相关系数的表达式,给出了信道相关系数与分集接收闪烁的关系;然后数值研究了水平均匀路径与整层大气下行传输路径传输下的信道相关系数。

## 1 空间分集接收闪烁的理论分析

在弱起伏条件下,利用 Sasiela 发展的解析方法<sup>[6]</sup>,空间对数振幅起伏协方差函数为:

$$B_A(\rho) = 1.303k^2 \int_0^L dz C_n^2(z) \int_0^\infty J_0(\kappa\gamma\rho) \kappa^{-8/3} \sin\left(\frac{\kappa^2\gamma z}{2k}\right) F(\kappa) d\kappa \quad (1)$$

式中:将观测平面  $z=0$  作为坐标起点,其中  $\rho$  为两子孔径的空间间距; $k$  为光波波数; $C_n^2$  为折射率结构常数; $L$  为湍流路径传播距离; $\kappa$  为空间波数; $J_0$  为第一类零阶贝塞尔函数; $\gamma$  为传播因子,对于平面波, $\gamma$  为 1,对于球面波, $\gamma$  为  $1-z/L$ ;  $F(\kappa)$  为滤波函数,对于直

径  $D$  的圆孔接收  $F(\kappa)$  为  $[2J_1(\kappa\gamma D/2)/(\kappa\gamma D/2)]^2$ ,  $J_1$  为第一类一阶贝塞尔函数。在上述表达式中,采用 Kolmogorov 湍流谱模型<sup>[1]</sup>,忽略内外尺度的影响。作变量代换  $u=z/L$ ,  $\kappa=\kappa D$ , 并设  $F_N$  为菲涅耳数  $D^2/\lambda L$ , 公式(1)可化为:

$$B_A(\rho) = 1.303k^2 LD^{5/3} \int_0^1 C_n^2(uL) du \int_0^\infty d\kappa \left[ 2 \frac{J_1(\gamma\kappa/2)}{\gamma\kappa/2} \right] \kappa^{-8/3} J_0\left(\gamma\kappa \frac{\rho}{D}\right) \sin\left(\frac{\kappa^2\gamma u}{4\pi F_N}\right) \quad (2)$$

两子信道的相关系数即两子孔径上的对数振幅起伏的相关系数为:

$$b_A(\rho) = \frac{B_A(\rho)}{B_A(0)} \quad (3)$$

综合公式(2)、(3)可知相关系数除受湍流强度影响外,还与菲涅耳数  $F_N$  和孔径间距与孔径直径的比例  $\rho/D$  有关;若  $F_N$  固定,相关系数与波长无关。

空间分集接收时,假设各子信道的闪烁指数相等,分集接收得到的闪烁指数<sup>[7]</sup>为:

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_c^2}{n} + 2 \frac{\sigma_c^2}{n^2} \sum_{i<j} C_{ij} \quad (4)$$

式中: $n$  为信道数目; $C_{ij}$  是第  $i$  和第  $j$  信道的相关系数。通常这  $n$  个信道间的距离并不相等,因此各子信道间的相关系数是不相同的,这时需要知道这  $n$  个子信道的具体分布才能得到分集接收叠加后的闪烁。

为简化分析,假设各子孔径间距相等且具有对称分布(此时  $n$  的最大值为 3),则空间分集接收得到的闪烁指数可以表示为:

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_c^2}{n} + b\sigma_c^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right) \quad (5)$$

式中: $b$  为子信道间的相关系数。由公式(3)可知,空间分集接收的闪烁指数不仅与信道数目有关,还受信道间的相关性影响。

图 1 为不同信道数目接收时,使用单信道的闪烁对多信道的闪烁进行归一化的闪烁值随相关系数的变化情况。由图可知,相关系数  $b$  为 1 时,信道完全相关,此时多信道与单信道的效果一样。在信道不完全相关时,信道数目越多,归一化闪烁值越小;光束相关系数越小,归一化闪烁值降低越明显。当两信道间的光强起伏相关性很小,即相关系数  $b$  接近零时,此时空间分集接收得到的闪烁将会降低约  $n$  倍;当两信道间存在负相关特性,即相关系数  $b$  小于零

时,此时多孔接收得到的闪烁将会降低多于  $n$  倍。

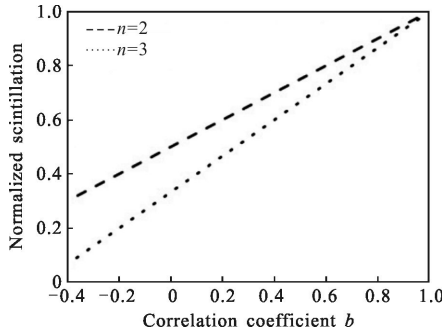


图 1 归一化闪烁值随相关系数的变化

Fig.1 Normalized scintillation with variant correlation coefficient

总的说来,当信道数目确定时,空间分集接收的闪烁的下降与相关系数有关,信道相关系数越小,分集接收效果越好。大多数文献对信道相关性的研究局限在理想化的水平湍流均匀路径点接收情况,而考虑实际传输路径上湍流起伏和孔径接收的研究很少,因此将对孔径接收和实际湍流不均匀路径情况下的信道相关性进行计算分析。

## 2 相关系数的数值计算

### 2.1 水平湍流均匀路径

为考察孔径接收对湍流均匀路径信道相关特性的影响,首先计算了水平湍流均匀路径,孔径接收时平面波与球面波两种情况下的相关系数随两孔径间距的变化关系,并与点接收情况进行了对比。计算中的参数选取典型值并保证满足弱起伏条件。选取波长  $\lambda=500\text{ nm}$ ,传输距离  $L=1\text{ km}$ ,其他计算参数和结果如图 2~3 所示。其中 $(\lambda L)^{1/2}$ 为第一菲涅耳尺度,此处相应值为  $2.2\text{ cm}$ 。

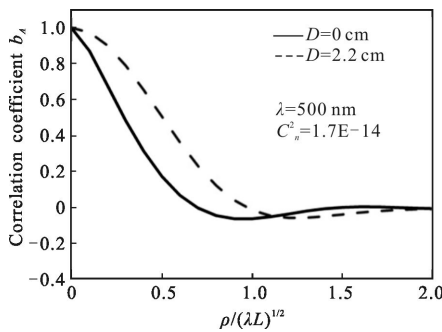


图 2 平面波水平传输时的相关系数

Fig.2 Correlation coefficient under horizontal propagation path for the plane wave

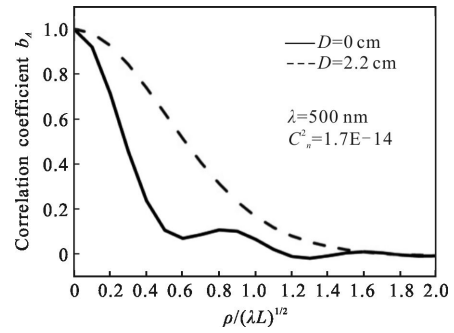


图 3 球面波水平传输时的相关系数

Fig.3 Correlation coefficient under horizontal propagation path for the spherical wave

由图 2~3 相关系数曲线可知,对于水平湍流均匀路径,无论是平面波还是球面波,点接收时的相关距离约为第一菲涅耳尺度,与前人所得结果一致<sup>[1,4]</sup>,验证了理论分析的正确性;当采用孔径接收时,相关距离大于点接收时的相关距离,而且在相关距离内,相关系数随孔径间距增大的下降趋势更为平缓,也就是说当孔径间距一定时,孔径接收的相关性要好于点接收情况;对于平面波,孔径间光强起伏存在负相关,而球面波的负相关性不明显。

### 2.2 整层大气湍流非均匀下行路径

为考察湍流非均匀路径对信道相关性的影响,数值计算了整层大气湍流非均匀路径下行传输条件下的平面波和球面波两种情况下的相关系数。计算中湍流采用典型的 HV5/7 模型<sup>[8]</sup>,HV 模型一般认为  $30\text{ km}$  以上无湍流,选取传输距离  $L=30\text{ km}$ ,天顶角  $\varphi=0\text{ rad}$ ,波长  $\lambda=500\text{ nm}$ ,相应的第一菲涅耳尺度约为  $12\text{ cm}$ 。其他计算参数和结果如图 4~5 所示。

对比图 4 和图 2 可知,对于平面波,整层下行传输点接收的相关系数曲线与水平均匀传输不同,存在较大的起伏。点接收时,下行路径的相关距离约为第一菲涅耳尺度的一半(图 4 中实线)。孔径接收时,当孔径约为第一菲涅耳尺度时,曲线与水平均匀下点接收情况相似,相关量级为第一菲涅耳尺度。同样在相关距离内,孔径接收的光强起伏相关性要好于点接收。当孔径约为  $1/2$  的第一菲涅耳尺度时,曲线起伏较大,下行传输在孔径间距为第一菲涅耳尺度附近存在较大的负相关( $-0.23$  左右)。

结合图 5 和图 3 可知,对于球面波,整层传输点接收的相关系数曲线与水平均匀传输也存在明显不同。下行路径下点接收光强起伏相关量级约为第一

菲涅耳尺度的一半,而且存在负相关性(图 5 中实线)。孔径接收时,当孔径约为第一菲涅耳尺度时,下行传输曲线与水平均匀下情况相似。相关距离内,孔径接收的光强起伏相关性要好于点接收时。球面波传输下行传输,非均匀湍流路径孔径接收时负相关性依然不明显。

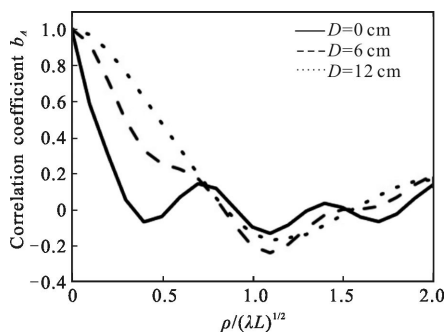


图 4 平面波下行传输时的相关系数

Fig.4 Correlation coefficient under download propagation path for the plane wave

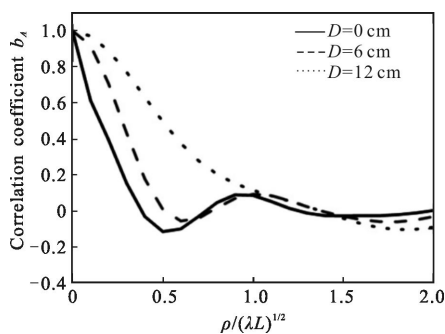


图 5 球面波下行传输时的相关系数

Fig.5 Correlation coefficient under download propagation path for the spherical wave

结合 2.1 节和 2.2 节的结算结果,可以知道对于平面波,湍流非均匀路径与均匀路径的信道相关系数存在明显不同。点接收时,两种路径下信道都有一定的负相关性;孔径接收时,只有非均匀路径的信道存在明显的负相关特性;无论是非均匀路径还是均匀路径,在相关距离内,孔径接收的信道相关性要优于点接收情况。对于球面波,湍流非均匀路径与均匀路径的信道相关系数也不完全相同。点接收时,非均匀路径信道表现出一定的负相关性,均匀路径信道的负相关特性不明显;孔径接收时,非均匀路径的信道相关性与均匀路径情况类似,都没有明显的负相关性。对比图 4 和图 5 可知,平面波传输与球面波传输的明显差异在于,当孔径间距

为第一菲涅耳尺度时,对于平面波传输,光强起伏存在明显的负相关特性,而对于球面波传输,光强起伏的负相关特性不明显。

因此,在空间分集接收系统中,信道间距为第一菲涅耳尺度时,并不一定能获得最好的信号衰落抑制性能;信道间距与信号衰落抑制性能间也不是正比关系,也就是说信道间距也不是越大越好。无论是对于平面波还是球面波,要想获得最好的信号衰落抑制效果,孔径接收比点接收时需要选取更大的信道间距。对于整层大气下行传输点接收,在信道间距为第一菲涅耳尺度的一半时,信道存在一定的负相关性,此时就可以获得较好的信号衰落抑制效果。根据具体的传输场景,合理的选择信道间距,可以获得较小的,甚至是负值的相关系数,可以显著减小接收信号的闪烁值,抑制信号的衰落,从而降低系统的误码率。

### 3 结论

文中理论推导了弱起伏条件下空间分集接收信道相关系数的表达式,给出了信道相关系数与分集接收闪烁的关系;数值研究了水平湍流均匀路径与整层大气湍流非均匀传输路径下行传输的信道相关系数。计算结果表明,无论是平面波还是球面波,在湍流非均匀路径下信道的特性都与湍流均匀路径情况存在一些差异。结合实际传输场景,合理选择信道间距,就可以利用信道的负相关特性,减小分集接收的闪烁,得出的理论结果对实际工程应用具有一定参考意义。

需要指出的是,文中的结果是在普遍的 Kolmogorov 湍流谱模型、弱起伏条件下得到的,对于非 Kolmogorov 湍流谱及强起伏条件下的信道相关性与文中所得结论的差异,将在以后开展研究。

### 参考文献:

- [1] Andrews L C, Phillips R L. Laser Beam Propagation Through Random Media [M]. Berlin: SPIE, 2005.
- [2] Wang Zixiong, Zhong Wende, Fu Songnian, et al. Performance comparison of different modulation formats over free-space optical(FSO) turbulence links with space diversity reception technique [J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, 1(6): 277-285.
- [3] Wu Changqi, Pan Jimin, Yu Rongjin. Atmospheric optical

- communication with optimal selection diversity [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 114–126. (in Chinese)
- [4] Chen Zhixiao, Yu Song, Jiang Long, et al. Influence of channel correlation on the scintillation performance of receiver diversity systems for free-space optical communications [C]// OFC/NFOEC Technical Digest, 2013, JW2A. 42: 1–3.
- [5] Tatarski. *Wave Propagation in a Turbulent Medium* [M]. Beijing: Science Press, 1978.
- [6] Sasiela R J. *Electromagnetic Wave Propagation in Turbulence* [M]. Berlin: SPIE, 2007.
- [7] Zhang Deliang, Jiang Wenhan. Wandering of the speckle formed by multiple beams focused on the target in the horizontal homogeneous atmosphere [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 1998, 25(2): 2037–2041.
- [8] Andrews L C, Phillips R L, Hopon Cynthia Y. *Laser Beam Acintillation with Applications* [M]. Berlin: SPIE, 2001.