

二维相关K分布湍流信道的建模与仿真

柯熙政 田晓超

西安理工大学自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048

摘要 针对强湍流的空间相关性特点,拟合了基于1-范数的相关函数,利用修正的球不变随机过程(SIRP)法得到相关K分布随机场,建立了二维相关K分布湍流信道仿真模型;解决了球不变随机过程法固有的特征随机变量各态历经问题;计算了二维相关K分布信道模型的误时隙率和信道容量,并与一维K分布信道模型做比较。结果表明这种模拟湍流信道的方法可以很好地控制K分布湍流分量的分布形式和统计特性,为信道估计的研究奠定了基础。

关键词 光通信;大气湍流;K分布;球不变随机过程;误时隙率

中图分类号 TN929.12

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.0401005

Modeling and Simulation of Bi-Dimensional Correlated K-Distributed Turbulent Channel

Ke Xizheng Tian Xiaochao

Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China

Abstract The model of bi-dimensional correlated K-distributed Random turbulent is attained by the modified spherically invariant random process (SIRP) method. Then the bi-dimensional correlated K-distributed Random fields are obtained on the base of the assumption of spatial correlation on the one-norm. The various state experience problems of SIRP method are resolved, which is the inherent characteristic of SIRP method. The slot error rate and channel capacity of bi-dimensional correlated K-distributed channel model are caculated, compared with K-distributed channel model. The results indicate that the method of simulation of turbulent channel can be well controlled by the K-distribution of turbulent component distribution and statistical characteristics, and the validity of this modeling lays the foundation for the research of channel estimation.

Key words optical communications; atmospheric turbulence; K-distributed; spherically invariant random process; slot error rate

OCIS codes 010.1290; 010.1310; 010.1330

1 引言

在无线光通信系统中,光信号受到大气湍流的影响会造成光强闪烁和相位畸变。研究大气信道对于无线光通信系统具有重要的理论意义和应用价值,人们提出湍流模型主要有Kolomogorov、Tatarskii和Von Karman模型^[1-2]。Kolomogorov模型认为湍流局部均匀各向同性,Tatarskii模型基于Kolomogorov的局部均匀各项同性理论,主要描述弱湍流。而本文主要研究基于K分布的强湍流,有关K分布湍流模型的研究中,由于光学系统采用强度调制/直接检测的方法,只考虑了湍流多次散射过程中的径向相关性,并没有考虑不同散射过程间的横向相关性^[3-4],很难从理论上分析并给出自由空间光通信(FSO)系统接收信号中湍流分量^[5]的分布形式和统计特性。而湍流的分布形式和统计特性对自由空间光通信信道的估计十分重要。具有相关

收稿日期: 2014-11-14; 收到修改稿日期: 2015-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(61377080, 60977054)、陕西省“13115”科技统筹计划(2011KTCQ01-31)、陕西省教育厅产业化培育基金(2010JC17)、西安市科技成果转化基金(CX12165)、陕西省自然科学基金基础研究计划资助项目(2013JQ8011)、陕西省教育厅科研计划项目(2013JK1104)、江苏省省级前瞻性研究专项资金(第三批)项目(BE2013088)

作者简介: 柯熙政(1962—),男,教授,主要从事无线激光通信方面的研究。E-mail: xzke@263.net.

性并符合非高斯分布信号产生的方法主要有零记忆非线性变换法和球不变随机过程法两种。其中,球不变随机过程(SIRP)法能够对序列的分布特性和相关性分别进行控制,使得产生的序列能同时满足概率分布要求和相关性要求。

本文采用修正球不变随机过程法产生的空间二维相关K分布矩阵,通过相关参数控制信号的分布特性和湍流的相关性。该方法弥补了传统方法只考虑径向相关性的缺陷,又解决了特征随机变量各态历经问题,避免了K分布退化为瑞利分布,计算了一维和二维信道模型的误码率和信道容量,分析了相关性对湍流信道的影响。

2 修正 SIRP 模拟空间二维 K 分布湍流模型的方法

2.1 模型介绍

球不变随机过程方法的主要思想是:把强湍流信道看成一个 SIRP,对一个 SIRP 进行采样,得到的矢量是一个球不变随机矢量(SIRV),并且 SIRV 具有“线性变换不变性”,经过线性变换后,强湍流 K 分布的特征概率密度函数不变,这样就能控制信号的概率分布特性。

图 1 为 SIRP 产生空间相关矩阵法,图中矩阵 A 和 B 用来控制分布的相关性。1)产生一个 $I \times J$ 维各分量独立的高斯随机矩阵 Z ; 2)生成随机变量 S ,并归一化 $V = S/\delta_s$, δ_s 为 K 分布的分布函数标准差。使矩阵 Z 中的每个元素都与随机变量 V 相乘,则得到一个各分量独立的矩阵 X (即白色 SIRP); 3)对 X 做线性变换,左、右分别乘以矩阵 A 和 B ,得到相关矩阵 Y (即相关 SIRP); 4)对矩阵 Y 中元素取模,得到相关 K 分布矩阵 $A(i,j) = |Y(i,j)|$ 。

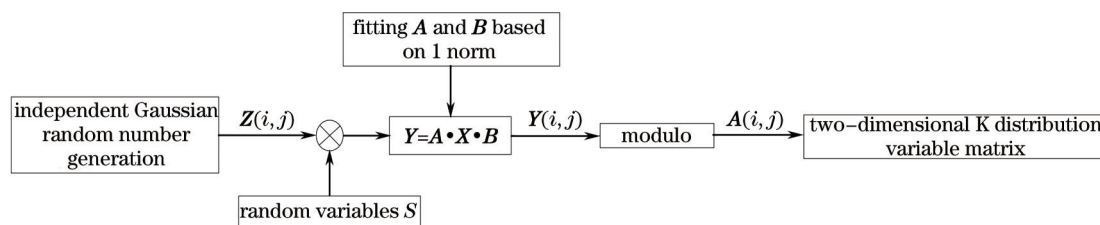


图 1 球不变随机过程产生空间相关矩阵的方法

Fig.1 Spherically invariant random process method for generating a spatial correlation matrix

2.2 随机变量 S 产生及其各态历经问题

为了生成随机变量 S ,研究了 K 分布的分布函数。在自由空间光通信中,强湍流信道模型可以用 K 分布表示,其概率密度函数(PDF)形式可表示为^[6]

$$f_h(h) = \frac{2a^{(a+1)/2}}{\Gamma(a)} \cdot h^{(a-1)/2} K_{a-1}(2\sqrt{ah}), h > 0, \quad (1)$$

式中 $K_{a-1}(\cdot)$ 为 $a-1$ 阶第二类修正的 Bessel 函数, a 是与离散散射体的有效数目相关的信道参数,在强湍流范围内,可以改变 a 值来仿真不同强度的湍流,当 a 值越大时,仿真的湍流强度越小,反之,仿真的湍流强度越大, h 为光强,可表示为 $h = xy$, x, y 分别服从指数分布和 Gamma 分布。

由随机过程分布函数的定义可知, K 分布的分布函数^[7]为

$$F(S, a) = \int_{-\infty}^S \frac{2a^{(a+1)/2}}{\Gamma(a)} \cdot S^{(a-1)/2} K_{a-1}(2\sqrt{aS}) dS. \quad (2)$$

(2)式的概率密度分布形式保证矩阵 $A(i,j)$ 中的元素服从 K 分布^[8]。由于(2)式无法求得其闭合表达式,因此可以采用“蒙特卡罗”方法生成随机变量 S ,如图 2 所示。

如图 2 所示, 1)定义随机变量分布的有效区间 $[l_1, l_2]$; 2)定义最大概率密度值 P_{max} ; 3)产生区间均匀分布的随机变量 R_1 , 和区间 $[0, P_{max}]$ 均匀分布的随机变量 R_2 ; 4)计算变量 R_{temp} , $R_{temp} = f_s(R_1)$; 5)如果 $R_2 < R_{temp}$, 则为满足要求的随机变量,并进行归一化,否则返回至 4)。

乘性随机变量只取一个单点值 S ,是不能满足各态历经条件的,会导致矩阵 X 和矩阵 Y 中的元素退化

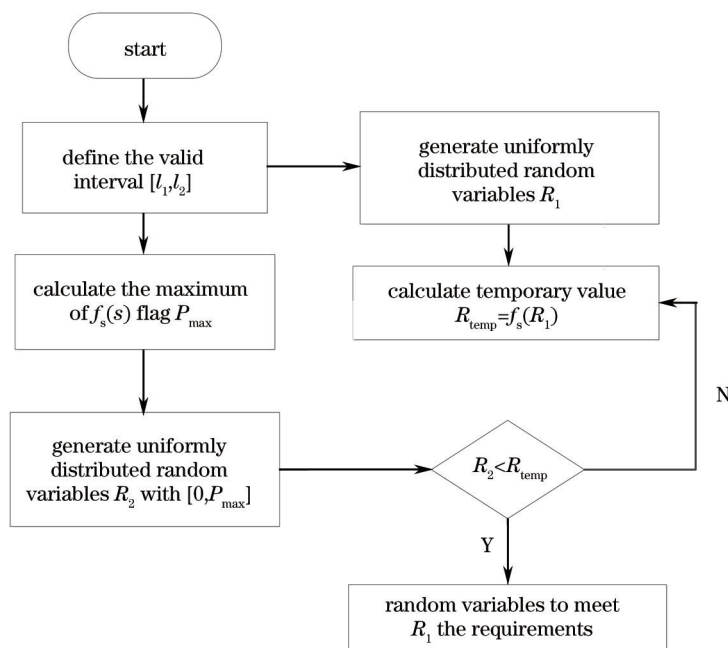


图2 蒙特卡罗法求随机变量

Fig.2 Random variable of Monte Carlo method

为高斯分布,矩阵 A 中的元素为负指数分布,而不是所要求的 K 分布了。如图 3(a)所示,Conte 等^[9]用随机序列代替单点 S [如图 3(a)]值,以改善其遍历性,且 SIRP 的相关性基本不受影响。类似地,可以采用矩阵 [如图 3 (b)] $S(i,j) (i=1, \dots, I; j=1, \dots, J)$ 来代替单点值 S ^[10],使其尽可能满足各态历经性条件。

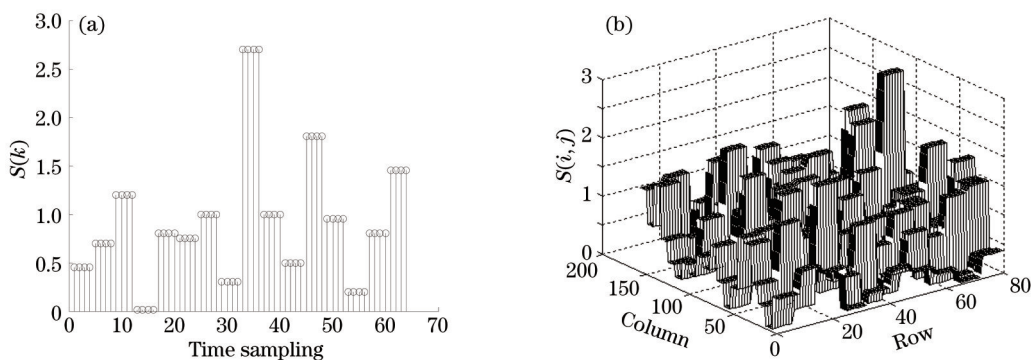


图3 (a)随机序列 $S(k)$ 和(b)随机场矩阵随时间采样

Fig.3 (a) Random sequence $S(k)$ and (b) random field matrix versus time sampling

如图 3(b)所示,矩阵 $S(i,j)$ 由矩阵 $S_0(i_0,j_0) (i_0=1, \dots, I; j_0=1, \dots, J)$ 扩张得到: $S_0(i_0,j_0)$ 中每个元素向横向和径向各“拉伸” P 和 Q 倍, P 、 Q 为单位湍流小矩形的长度,并有 $M=P \cdot I, N=Q \cdot J$ 。其中,矩阵 $S_0(i_0,j_0)$ 中的元素独立分布,其概率密度函数由(2)式给出。该做法的物理意义为: K 分布是一个复合散射模型,即对应于单个分辨单元的快变化分量叠加在一个慢变化分量上,因此可以将这种慢变化对应到随机变量 S 的起伏变化上,从而可以用矩阵 $S(i,j)$ 代替单点值 S 。

P 和 Q 的取值会影响 SIRP 产生矩阵的概率分布和相关性。仿真中,要依据模拟的湍流特征来确定 P 和 Q 的值。如果湍流起伏比较快,或者湍流均匀程度比较差,那么 P 和 Q 应该取较小值,具体数值可以通过仿真数据与实际湍流数据的特征比对,不断地进行调整获得。通常, P 和 Q 值越小,对相关性的影响越大。

3 相关矩阵 A 、 B 的讨论和仿真

3.1 基于 1-范数的空间相关性

对 $\forall P_1, P_2 \in \mathbb{R}^2$ 有 $P_1 = (i_1, j_1)^T, P_2 = (i_2, j_2)^T$, 则两元素之差的 1-范数为

$$\|P_1 - P_2\| = \sum_{k=1}^2 |P_1(k) - P_2(k)| = |i_2 - i_1| + |j_2 - j_1|, \quad (3)$$

若将 P_1 、 P_2 看成是湍流信道上的两点, (i_1, j_1) 和 (i_2, j_2) 分别为它们所处的位置(其中, $i_1, i_2 = 1, \dots, I-1$; $j_1, j_2 = 1, \dots, J-1$), 即在径向和横向上的时间采样, 则定义两点间的相关函数离散形式为

$$R_y(i_1, j_1, i_2, j_2) = R_y(|i_2 - i_1| + |j_2 - j_1|), \quad (4)$$

称 $R_y(\cdot)$ 为基于 1-范数的空间二维相关函数。

3.2 线性变换矩阵 A 和 B

矩阵 Y 的相关矢量可写为

$$Y_{\text{vec}} = [y(1, 1), y(2, 1), \dots, y(M, 1), \dots, y(I, J)]^T, \quad (5)$$

式中上标“T”表示转置, Y 的协方差矩阵 Y_{cov} 为

$$Y_{\text{cov}} = E\{Y_{\text{vec}} \cdot Y_{\text{vec}}^T\}. \quad (6)$$

分解 $Y_{\text{cov}} = KK^T$, 对 SIRP 矩阵作线性变换 $Y = KX$, 则 Y 满足指定的相关性。因为矩阵的行数 I 和列数 J 比较大, 直接分解 $IJ \times IJ$ 的矩阵 Y_{cov} 计算量太大, 为了减小计算量, 采用降维的方法。

本文对空间相关函数进行拟合^[11], 使其满足指数衰减 $R_y(k) = \exp[-(k-1)\lambda]R_y(0)$, 式中 λ 是时间常数倒数, 可得到:

$$R_y(k) = \rho^{k-1} R_y(0), \quad k = 0, 1, \dots, M + N - 2, \quad (7)$$

式中 $\rho = \exp(-\lambda)$ 为相关性的衰减系数, $0 < \rho < 1$, 实际中已被广泛采用。由(6)式和(7)式, 协方差矩阵可重新写为

$$Y_{\text{cov}} = \begin{bmatrix} 1 \cdot K_R & \rho \cdot K_R & \dots & \rho^{I-1} \cdot K_R \\ \rho \cdot K_R & 1 \cdot K_R & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \rho \cdot K_R \\ \rho^{I-1} \cdot K_R & \dots & \rho \cdot K_R & 1 \cdot K_R \end{bmatrix} = K_L \otimes K_R, \quad (8)$$

式中, “ \otimes ”表示 Kronecker 积, 矩阵 K_L 、 K_R 分别为

$$K_L = \begin{bmatrix} 1 & \rho & \dots & \rho^{I-1} \\ \rho & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \rho \\ \rho^{I-1} & \dots & \rho & 1 \end{bmatrix}, \quad K_R = R_y(0) \begin{bmatrix} 1 & \rho & \dots & \rho^{J-1} \\ \rho & 1 & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & \rho \\ \rho^{J-1} & \dots & \rho & 1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

可以看出, K_L 、 K_R 都是 $I \times I$ 、 $J \times J$ 的实对称 Toeplitz 矩阵, 分解矩阵 K_L 、 K_R , 分别得到 $I \times I$ 的矩阵 A 和 $J \times J$ 的矩阵 B :

$$K_R = AA^T, \quad K_L = BB^T. \quad (10)$$

通过改变式 $\rho = \exp(-\lambda)$ 中 λ 值, 可以生成不同的矩阵 A 和 B 。不同的相关性矩阵可以使信道模型中湍流的相关程度发生变化, 控制信道模型的相关性。

4 二维相关 K 分布湍流信道误时隙率(SER)的计算

自由空间光通信中, 激光束携带信息在空间传播时, 光强受大气湍流的影响视为乘性噪声, 光强本身受到激光器的影响看作加性噪声。由此可得湍流信道的数学模型^[12-13]:

$$I_i = sr + n = \eta hr + n, \quad (11)$$

式中 I_i 是接收端光电探测器的输出电流, r 是发送的信号, $s = \eta h$ 是接收端光强增益, η 是光电转换效率, h 表示接收信号瞬时的光强, n 是接收端器件的噪声, 为高斯白噪声。

由于光的强度受湍流的影响时刻在变化, 信噪比(SNR)也时刻在变化, 因此只能求得误时隙率的平均值。平均误时隙率表达式为^[14]

$$\langle P_{se} \rangle = \int_0^{\infty} P_{se} \cdot f(h) dh, \quad (12)$$

式中 $f(h)$ 为湍流情况下光强的概率密度函数,不同强度的湍流的表达形式不同,由文献[15]可知信道误时隙率可以表示为

$$P_{se} = \frac{1}{2(l+1)} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln l - \mu}{2\sqrt{\mu}} \right) + l \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{\ln l + \mu}{2\sqrt{\mu}} \right) \right], \quad (13)$$

式中 μ 为电信噪比, l 表示发送的数字信号序列中“0”出现的概率和“1”出现的概率的比值,不同调制方式的 l 值不同,采用开关调制(On-Off Keying, OOK), l 取值为 1。接收端接收到的光信号经过光电转换后得到的电流为 $I_i = \eta P_{\gamma} = \eta A_{\gamma} h$, 则电信号的平均功率为 $P = I_i^2 R = \eta^2 A_{\gamma}^2 h^2 R$, 电信噪比为

$$\mu = \frac{P}{2\sigma_n^2} = \frac{\eta^2 A_{\gamma}^2 h^2 R}{2\sigma_n^2} = \eta^2 A_{\gamma}^2 R \frac{h^2}{2\sigma_n^2}, \quad (14)$$

式中 σ_n^2 为方差, R 为电阻, A_r 为接收面积。

假设接收面积为 $A_{\gamma} = 1$, $\eta^2 A_{\gamma}^2 R = 1$, 那么归一化后的平均电信噪比 $\mu_0 = h^2 / 2\sigma_n^2$, σ_n^2 为方差。代入 (13) 式可得到

$$P_{se} = \frac{1}{2(l+1)} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\ln l \cdot \sqrt{\frac{h}{4\mu_0}} - \sqrt{\frac{\mu_0}{4h}} \right) + l \cdot \operatorname{erfc} \left(\ln l \cdot \sqrt{\frac{h}{4\mu_0}} + \sqrt{\frac{\mu_0}{4h}} \right) \right]. \quad (15)$$

由 (1)、(12) 和 (15) 式可以得到在强湍流情况下的平均误时隙率为

$$\langle P_{se} \rangle = \frac{a^{(a+1)/2}}{\Gamma(a)(l+1)} \int_0^{\infty} \left[2 - \operatorname{erfc} \left(\ln l \cdot \sqrt{\frac{h}{4\mu_0}} - \sqrt{\frac{\mu_0}{4h}} \right) + l \cdot \operatorname{erfc} \left(\ln l \cdot \sqrt{\frac{h}{4\mu_0}} + \sqrt{\frac{\mu_0}{4h}} \right) \right] h^{\frac{a-1}{2}} K_{a-1}(2\sqrt{ah}) dh. \quad (16)$$

二维相关 K 分布的湍流模型是矩阵形式,不能直接使用 (12) 式计算。采用改进的方法假设在 OOK 调制下, $l=1$ 时计算二维相关 K 分布湍流信道的平均误时隙率。

1) 根据激光器的详细参数,通过计算机仿真生成产生一组标准的光强信号序列 $h(m), (m=1, 2, \dots, M)$, 并将 $h(m)$ 逐一代入到 (15) 式中, 得到 $P_{se}(m), (m=1, 2, \dots, M)$;

2) 在前面二维相关 K 分布矩阵的基础上,从湍流信道矩阵 $A(i, j)$ 中随机采样得出一组受湍流影响的激光信号 $h'(m), (n=1, 2, \dots, M)$;

3) 在前两步的基础上,通过计算 $\langle P_{se}(m) \rangle = \sum_{n=1}^N P_{se}(m) \cdot h'(m)$ 得出二维相关 K 分布的平均误时隙率。

5 二维相关 K 分布湍流信道容量的计算

湍流信道下平均信道容量关于信噪比的表达式为^[16]

$$\langle C \rangle = \int_0^{\infty} B \log(h + \gamma) p_{\gamma}(\gamma) d\gamma, \quad (17)$$

式中 γ 为信噪比, $\gamma = \frac{s^2}{N_0} = \frac{\eta^2 I_i^2}{N_0}$ 。 $p_{\gamma}(\gamma)$ 是信噪比 γ 的概率密度函数,因光强 h 服从分布的不同而不同。

K 分布信噪比 γ 的概率密度函数如下^[17]:

$$p_{\gamma}(\gamma) = \frac{a^{(a+1)/2}}{\Gamma(a)} \cdot \frac{\gamma^{(a-3)/4}}{\mu^{(a+1)/4}} K_{a-1} \left(2 \sqrt{a \frac{\gamma}{\mu}} \right), \quad (18)$$

式中 $\mu = \frac{[\eta E(h)]^2}{N_0} = \frac{\eta^2}{N_0}$ 为光强归一化后的平均信噪比 $E(\cdot)$ 表示取平均值, μ 和 γ 的关系为 $h = \sqrt{\gamma/\mu}$ 。

二维相关 K 分布的湍流模型是矩阵形式,不能直接使用 (17) 式计算,故采用改进的方法计算二维 K 分布的湍流信道容量:

1) 在二维相关K分布矩阵的基础上,从湍流信道矩阵 $A(i,j)$ 中随机采样得出一组受湍流影响的光强信号序列 $h(m), (m = 1, 2, \dots, M)$, 并对每个元素平方,得到二维信道下的一组 $\gamma(m), (m = 1, 2, \dots, M)$ 。

2) 将 $\gamma(m)$ 代入 $\langle C \rangle = \sum_{\gamma=1}^M B \text{lb}[1 + \gamma(m)] p_{\gamma}[\gamma(m)]$, 得出二维K分布湍流信道的信道容量。

6 仿真和实验

当收发两端距离为 Z 时,激光通信系统对应的空间传输方程为^[18]

$$P_R(\theta, \alpha) = P_T \eta_T \eta_R (\lambda/4\pi Z)^2 G_T G_R L_A L_T(\theta) \alpha, \quad (19)$$

式中光学系统参数如表1所示,为了验证二维相关K分布建模的合理性,根据表1中的参数对标准矩阵分布和白色SIRP矩阵以及相关SIRP矩阵幅度分布等进行了仿真,如图4所示。

表1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Optical transmitting system efficiency η_T	0.4
Accept the optical system efficiency η_R	0.4
Detector sensitivity P_{min}	1
Sensitivity of the detector R_e	0.5
Background light power P_B	1
Detector dark current i_d	2
Load resistance R_L	2

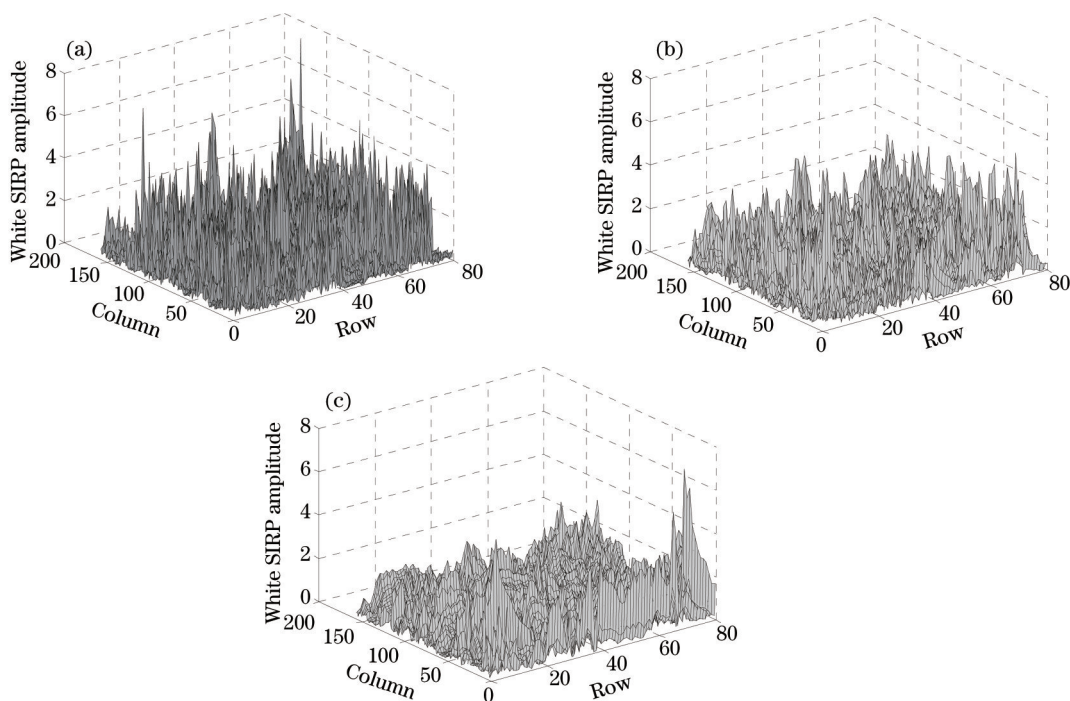


图4 白色SIRP和相关SIRP矩阵数值分布统计图。(a)白色SIRP矩阵数值分布;(b) $\lambda = 0.3$ 时,相关SIRP矩阵数值分布;(c) $\lambda = 0.1$ 时,相关SIRP矩阵数值分布

Fig.4 White SIRP and the related numerical SIRP matrix distribution statistical charts. (a) White SIRP matrix numerical distribution; (b) related numerical SIRP matrix distribution at $\lambda = 0.3$; (c) related numerical SIRP matrix distribution at $\lambda = 0.1$

1) 根据第3节相关性讨论,通过仿真白色SIRP矩阵和相关SIRP矩阵幅度分布,来验证所建立的二维相关K分布信道是否反映湍流信道空间相关性的特点,能否通过改变的值达到控制这种相关性的效果。仿真初始条件:湍流阶数 $a=2$,光功率 $\mu = 1$,分布函数方差 $\delta_s^2 = 0.5$,相关函数拟合参数 $\lambda = 0.3, \lambda = 0.1$ 。图4中 z

轴代表湍流矩形的幅度, x 轴和 y 轴代表湍流矩形的空间位置, 每个突起来的长方体代表一个小湍流。图 4(a) 是白色 SIRP 矩阵 $X(i,j)$ 数值分布, 图 4(b), 4(c) 是相关 SIRP 矩阵 $Y(i,j)$ 的数值分布。将图 4(a) 与图 4(b)、(c) 比较, 从图中很直观地可以看出, 白色 SIRP 矩阵数值相对离散, 经过线性变化后的相关 SIRP 空间相关性明显要强。比较图 4(b)、(c), 可以看出随着 λ 值的减小, 图中相邻小矩形相互影响越来越大, 空间相关性也越来越强。可以得出: 经过线性变换后的相关 SIRP 比白色 SIRP 的空间相关性要强, 在二维 K 分布模型下, 可以改变相关系数 λ 的值控制这种空间相关性。

2) 通过观察流信道矩阵 $A(i,j)$ 的幅度分布统计图, 与标准 K 分布的幅度分布做比较, 检验仿真模型是否符合 K 分布, 能否解决随机变量 S 的各态历经性。仿真初始条件: 标准的 K 分布概率密度函数由 (2) 式给出, 湍流阶数 $a=2$, 光功率 $\mu=1$, 分布函数方差 $\delta_s^2=0.5$ 相关函数拟合参数 $\lambda=0.15$ 。从图 5 中可以看出, 矩阵元素的数值分布与理论的 K 分布贴近很好, 说明了湍流模型仍然符合 K 分布。由此可以得出, 利用矩阵 $S(i,j)$ 代替特征随机变量 S 时, 二维 K 分布矩阵仍然贴近 K 分布, 没有退化为瑞利分布, 这表明解决了特征随机变量的各态历经问题。

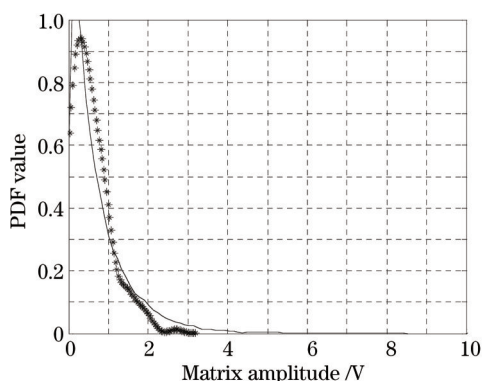


图 5 矩阵元素的数值分布统计

Fig.5 Numerical statistical distribution of matrix elements

3) 为了观察空间相关性对误时隙率的影响, 设湍流阶数 $a=2$, 湍流模块长度 $P=Q=4$, 激光信号平均功率设置为单位功率, 光强从 0~100 mW 均匀变化。相关函数 $R_y(k) = \exp[-\lambda(k-1)]$ [17] 可拟合为 $\lambda=0.15$ 的一条曲线 [19]。图 6 描述了二维 K 分布信道和 K 分布信道的平均误时隙率。信噪比较小小的时候, 二维 K 分布信道误时隙率比一维 K 分布信道略低, 信噪比较大时二维 K 分布湍流信道和一维 K 分布信道相差不大, 得出的结论是, 加入了相关性控制的湍流信道模型是合理的。

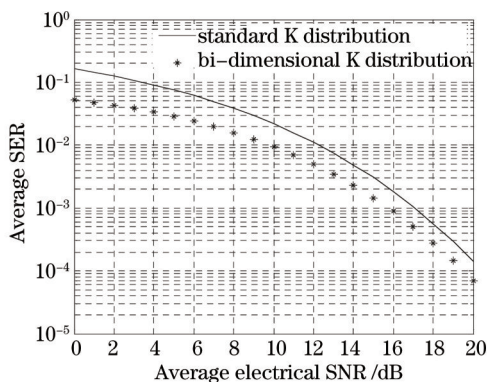
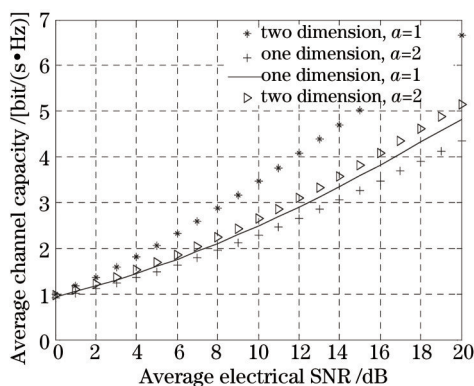


图 6 一维和二维 K 分布信道随信噪比变化的误时隙率

Fig.6 One and bi-dimensional K distribution channel with SNR slot error rate of change

4) 波长 λ 取值为 850 nm, 传输距离 Z 取值 5000 m, 接收机孔径 D 取为 10 cm, 强湍流情况下光强服从 K 分布时的信道参数 a 分别取 1 和 2。一维 K 分布湍流模型和二维相关 K 分布湍流模型平均信道容量关于信噪比的比较如图 7 所示, 从图中可以看出, 平均信道容量是随着信噪比的增大而增大, 随着信道参数 a 的增大而增大, 在 a 相同时, 二维信道湍流模型比一维信道湍流模型的信道容量要大。

图7 一维和二维信道分别在 $a=1, a=2$ 时随信噪比变化的信道容量Fig.7 One and bi-dimensional channel in $a=1, 2$ with SNR channel capacity change

7 结 论

在强湍流信道空间相关性存在的事实基础上,基于1-范数假设,利用SIRP方法产生了空间二维相关K分布矩阵,并利用 $S(i,j)$ 代替了随机变量 S ,解决了各态历经性问题。通过计算二维相关K分布信道模型的误时隙率和信道容量,并和一维K分布信道模型作比较,表明当考虑湍流的横向和纵向相关性时,可以很好地控制K分布湍流分量的分布形式和统计特性。

参 考 文 献

- Zhang Yinghai, Huo Zeren, Wang Hongfeng. Current situation and development trend of free space optical communication [J]. Chinese Data Communications, 2004, (12): 78-82.
张英海, 霍泽人, 王宏锋. 自由空间光通信的现状与发展趋势[J]. 中国数据通信, 2004, (12): 78-82.
- Wang Lili, Ke Xizheng, Chen Lixin. The testing system for optical power through atmosphere [J]. Chinese Journal of Light Scattering, 2006, 17(4): 378-383
王丽黎, 柯熙政, 陈丽新. 基于大气激光通信系统的实验测量研究[J]. 光散射学报, 2006, 17(4): 378-383
- Wang Yi, Zhou Hongxian, Ma Zhenhe. Measurement of total velocity components of particle flow with optical coherence tomography [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1117002
王 毅, 周红仙, 马振鹤. 用光学相干层析进行粒子流流速全部分量测量[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1117002.
- Liu Man. Distribution properties of intensity and phase of speckle fields produced by vortex beam [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(11): 1126001.
刘 曼. 涡旋光束形成的散斑场光强和相位的分布特性[J]. 光学学报, 2014, 34(11): 1126001.
- Chen Jun, Huang Dexiu, Yuan Xiuhua. Analysis of turbo coded optical wireless communication based on three different modulated modes [J]. Acta Photonica Sinica, 2007, 36(4): 694-697.
陈 俊, 黄德修, 元秀华. 基于三种调制模式下的turbo码光无线通信系统分析[J]. 光子学报, 2007, 36(4): 694-697.
- Muralidhar Rangaswamy, Donald Weiner. Computer generation of correlated non-Gaussian radar clutter [J]. IEEE Trans on AES, 1995, 31(1): 106-116.
- Yao K. A representation theorem and its applications to spherically invariant random process [J]. Transonic IT, 1973, 19(5): 600-608.
- Gong Chunwen, Li Xuebin, Li Jianyu, et al.. New method of aerosol extinction coefficient measurement [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0101001.
宫纯文, 李学彬, 李建玉, 等. 大气气溶胶消光系数测量新方法[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0101001.
- E Conte, M Longo. Characterisation of radar clutter as a spherically invariant random process [C]. IEE Proceedings, 1987, 134(2): 191-197.
- Liu Jinjing, Luo Xiaoyang, Liu Daoya. Investigation on optical property and negative refractive index in double-layer chiral structure of optical region[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0116003.
刘锦景, 罗孝阳, 刘道亚. 光频段双层手征结构光学特性及负折射率研究[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0116003.

- 11 S Watts, K D Ward. Spafial correlation in K-distributed sea clutter [C]. IEE Proceedings, 1987, 134(6): 526-532.
- 12 Wang Wei, Liu Wenqing, Zhang Tianshu. Continuous field measurements of stable isotopes in atmospheric water vapor by FTIR spectrometry [J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 0130003.
王 薇, 刘文清, 张天舒. 利用傅里叶变换红外光谱技术连续测量环境大气中水汽的稳定同位素[J]. 光学学报, 2014, 34(1): 0130003.
- 13 Hector E Nistazakis, Evangelia A Karagianni, Andreas D Tsigopoulos. Average capacity of optical wireless communication system over atmospheric turbulence channels [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(8): 974-979.
- 14 Xiaoming Zhu, Joseph M Kahn. Free-space optical communication through atmospheric turbulence channels [J]. IEEE Transactions on Communications, 2002, 50(8): 1293-1300.
- 15 V Grigoriev, A Huppenen, M Sadovnikov. A base laser terminal for space communication [C]. IEEE Satellite Communications, 1998: 78-81.
- 16 Hector E Nistazakis, Evangelia A Karagianni, Andreas D Tsigopoulos. Average capacity of optical wireless communication system over atmospheric turbulence channels [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(8): 974-979.
- 17 H G Sandalidis, T A Tsiftsis. Outage probability and ergodic capacity of free-space optical links over strong turbulence [J]. Electronics Letters, 2008, 44(1): 46-47.
- 18 S Arnon. The effects of atmospheric turbulence and building sway on optical wireless communication systems [J]. Opt Lett, 2003, 28(2): 129-131.
- 19 Zhu Yaolin, An Ran, Ke Xizheng. Effect of rainfall on wireless laser communication [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1206003.
朱耀麟, 安 然, 柯熙政. 降雨对无线激光通信的影响[J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1206003.
- 20 W K Pratt. Digital Image Processing [M]. New York: John wiley & Sons, 1978.

栏目编辑: 王晓琰