

星地激光通信中接收光信号的仿真方法

朱 勇¹ 孙晓霞²

(¹ 中国人民解放军理工大学通信工程学院电信工程系, 江苏 南京 210007)
(² 中国人民解放军理工大学通信工程学院研究生一队, 江苏 南京 210007)

摘要 星地激光通信中, 由于大气湍流等影响, 接收光信号将出现包络起伏现象, 严重时将引起接收系统突发误码。为研究其中突发误码的发生规律及其对通信有效性的影响, 对接收光信号包络起伏的仿真方法进行了研究。针对常规的仿真方法在计算量、资源消耗、仿真时间长度等方面存在的诸多弱点, 提出了一种使用 Gauss 随机过程的幂级数拟合接收光信号幅度的仿真方法, 该方法利用接收光信号均值、方差、偏态系数和峰度系数计算各阶系数, 最高取到 3 次方项, 并使用 FFT/IFFT 实现时间功率谱特征拟合。仿真结果证明了该仿真方法的合理性。

关键词 光通信; 星地激光链路; 包络起伏; 随机过程

中图分类号 TN929.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s2.0134

Simulation Method of Receiving Signal in Satellite-Ground Laser Communication

Zhu Yong¹ Sun Xiaoxia²

¹ Institute of Communication Engineering, The Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China
² Graduate Student Team One, The Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China

Abstract In satellite-ground laser communication system, atmospheric turbulence causes the fluctuation of the receiving optical signal, which can arouse burst bit error while in bad situation. In order to study the characteristic and influence of the burst bit error, a new simulation method of fluctuated receiving signal simulation was studied in this paper, which uses the power series of Gaussian process to fit the target process. The highest power order of Gaussian process was set to 3, and the factor of power series was obtained from the statistic character (mean, quadratic mean deviation, skewness and kurtosis) of the envelope fluctuation of the receiving optical signal, and the power spectra density of the fluctuation was fit by FFT /IFFT. This method takes advantages in computational complexity and resource consumption.

Key words optical communication; satellite-ground laser link; envelope fluctuation; stochastic process

1 引 言

由于稠密大气层的影响, 星地激光链路中, 接收光信号将遭受吸收、散射、湍流等大气效应的损伤, 其中以大气湍流造成的影响最为复杂^[1,2]。光束波前在大气湍流影响下将产生畸变, 在接收天线的焦平面上引起随机的像点抖动和光斑扩展等现象, 使得接收端光电检测器光敏面上的光功率出现大范围的随机波动, 湍流强度较大时, 波动可达 40 dB 以上。由于大气湍流的时变带宽在几赫兹到千

赫兹之间, 受此影响, 接收端光信号包络也将出现带宽与之相当的幅度起伏, 对于高速数字光通信而言, 这种起伏可能造成系统频繁出现兆比特的突发误码, 严重时还将导致链路频繁地进入帧失步状态。

由于星地激光通信系统构成复杂, 成本高, 因此对其进行仿真研究是非常必要的。本文将对其中接收光信号的仿真方法进行探讨, 主要考虑如何获得足够长度的序列以研究接收信号包络起伏对突发误码间隔时间和持续时间的影响。

2 接收光信号的包络起伏及其常规仿真方法

2.1 湍流波前及其对接收光信号的影响

在大气光学领域，湍流是指大气中局部温度、压力的随机变化而带来的折射率的随机变化。湍流产生许多温度、密度具有微小差异因而折射率不同的旋涡元，这些旋涡元随风速等快速运动并不断地产生和消失，变化的频率可达几百赫兹，变化的空间尺度可能小到几毫米，大到几十米。当光束通过这些折射率不同的旋涡元时会产生光束的弯曲、漂移和扩展畸变等大气湍流效应，经光学天线会聚后，波前的总体倾斜将使像点偏离焦平面的中心位

置，出现像点抖动，而波前的起伏则将使像点出现光斑扩展现象。

为获得宽带特性而设计的星地激光链路通信速率一般在吉比特每秒以上，在接收机中，为提高响应速度，有必要使用结电容很小的光电检测器，其光敏面直径在数十微米量级。如此，大气湍流造成的像点抖动和光斑扩展将可能造成部分接收光功率落在检测器光敏面之外，使得实际可检测光信号功率下降，并由于湍流的随机性而出现接收光信号包络的随机起伏。

影响过程如图 1 所示，所示的畸变波前、光斑会聚及接收光信号包络起伏为仿真得到的样本。

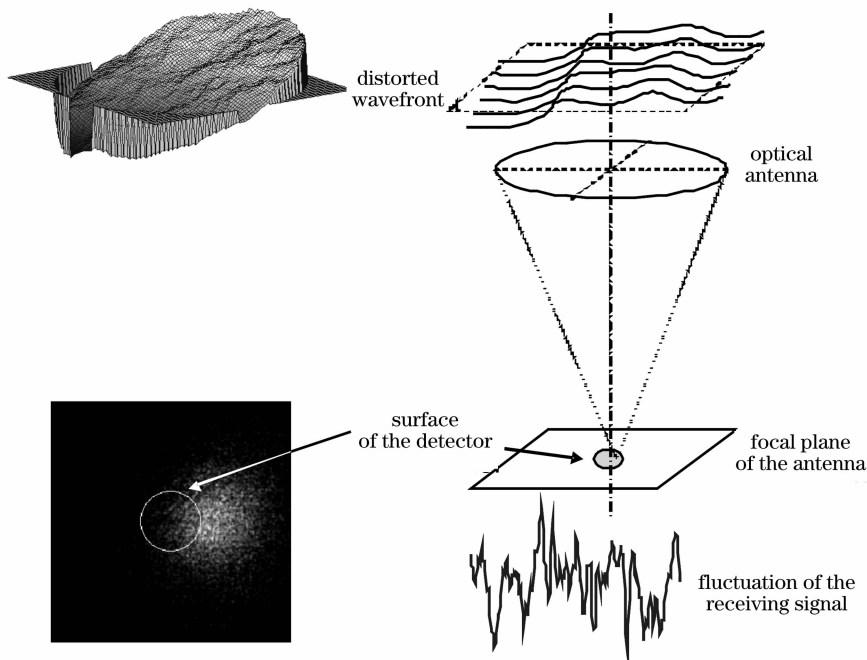


图 1 大气湍流影响产生的接收光信号包络起伏

Fig. 1 Fluctuation of the receiving signal envelope caused by atmospheric turbulence

在大气湍流造成的像点抖动和光斑扩展两种效应中，像点抖动的影响更大，仿真中，像点抖动造成的接收光信号包络起伏可超过 40 dB。因像点抖动由畸变光学波前的整体倾斜引起，对接收机而言，其效应与光束方向偏折等价，而星地光通信系统中的捕获、瞄准和跟踪(APT)子系统可对通信光束方向进行跟踪^[2,3]，因此像点抖动可以被有效抑制。在仿真中，在模拟 APT 系统消除畸变波前的整体倾斜后，接收光信号包络起伏范围被抑制到几分贝范围内。

2.2 接收光信号常规仿真方法

大气湍流的影响过程较为复杂，因此对受其影响的接收光信号包络的仿真一般需要通过 3 个步骤

完成^[2]。1) 给定大气湍流的内外尺度和风速等参数，生成时间上相关的随机大气相位屏序列；2) 给定光学天线参数，计算各相位屏在焦平面上的光斑会聚情况；3) 给定光电检测器光敏面直径、位置等参数，计算可检测光功率，获得接收光信号包络。

常规仿真方法是按照大气湍流对接收光信号的影响过程顺序进行仿真的，其仿真结果可信度高，但也存在 2 个主要的缺点。1) 需要的内存资源大。生成时间上相关的大气相位屏时，常使用一次生成的办法，考虑一个相位屏划分为 100×100 的方形网格，湍流变化频率最高可达 100 Hz，则每秒至少要产生 200 个以上、每一个数据量都达 10 K 的相位屏，再考虑每个数据由 4 Byte 表示，则要仿真

1 min的大气湍流变化情况,所需内存达到了480 Mbyte;2)计算量大。在进行光斑会聚计算时,需要将每个方形网格微元划分为两个三角形,对每个相位屏要求解约20000个平面方程,很难实现实时计算(仿真中,每秒约可计算3个相位屏的光斑会聚情况)。

由于这些缺点,在仿真实接收光信号时实际可获得的序列时间长度十分有限,很难由此进一步探索由于接收光信号起伏引起的突发误码的规律。

3 接收光信号包络的 Gauss 过程幂级数近似拟合仿真方法

3.1 基本思路

为解决2.2节中所述的问题,提出了一种基于结果的仿真方法。

该方法的原理与使用计算机仿真掷骰子类似。对于掷骰子仿真而言,如果使用过程模拟的方法进行仿真,则需要首先生成随机的骰子出手高度、速度,然后根据物理学原理与公式计算其旋转、下落、碰撞、摩擦等过程,最终获得骰子停止时朝上的数字。显然,该方法虽然可信度高,但模型复杂且计算量非常大,事实上目前除非有特殊需求,很少使用这种方法进行仿真。相应地,最常使用的仿真方法是,根据掷骰子结果中1~6出现概率相等的原理,直接用计算机产生1个(0,6)之间均匀分布的随机数并向上取整。这种方法根据掷骰子结果的统计情况进行仿真的方法十分简单,且仿真结果同样有效。

同理,在仿真受大气湍流影响的接收光信号时,也可采用类似的仿真方法。首先通过实际测试结果或利用2.2节所述的仿真方法得到的结果,获

得接收光信号起伏(大气湍流影响结果)的统计特征,然后直接仿真出所需接收光信号包络的时间序列。该方法可大大降低仿真所需要的内存资源和计算量,提高其实时仿真的可能性。

与掷骰子不同的是,此时面临的不是随机数的产生问题,而是随机过程的产生问题。大气湍流对接收光信号最终造成的影响为包络随机起伏,这种随机起伏可视作一个随机过程。对于随机过程而言,其特征不仅包括均值、方差等幅度上的统计特征,还包括常使用功率谱来表征的时间特征。因此仿真的目标是生成一个随机时间序列,其幅度统计特征和功率谱特征应当与接收光信号包络的对应特征相符。

3.2 随机过程的 Gauss 过程幂级数近似方法

随机过程的仿真中,Gauss过程的仿真相对较易实现。但接收光信号的包络起伏在幅度上并不服从高斯分布,对于这样的非 Gauss 过程,仿真较为困难。文献[4]指出可使用 Gauss 过程的幂级数实现其近似,将介绍该方法的变换过程。

设需要仿真的目标随机过程(即受大气湍流影响的接收光信号包络) $X(t)$ 为平稳随机过程,首先通过(1)式将其变换为标准随机过程,

$$X_0(t) = \frac{[X(t) - \mu_X]}{\sigma_X}, \quad (1)$$

其中 μ_X 和 σ_X 分别为该随机过程的均值和均方差。将 $X_0(t)$ 展开成 Gauss 过程的幂级数,且取0~3次幂项近似,则,

$$X_0(t) = a_0 + a_1 U(t) + a_2 U^2(t) + a_3 U^3(t), \quad (2)$$

式中, a_0, a_1, a_2, a_3 为待定系数,可通过 $X_0(t)$ 的1~4阶矩求解。对(2)式两边分别取1~4阶矩, $E[X_0^n(t)]|_{n=1,2,3,4}$,并代入标准 Gauss 过程的各阶矩 $E[U^n(t)](n=1,2,\dots,14)$,可以得到四个方程构成的方程组

$$\begin{cases} E[X_0(t)] = a_0 + a_2 \\ E[X_0^2(t)] = a_0^2 + 2a_0 a_2 + a_1^2 + 6a_1 a_3 + 3a_2^2 + 15a_3^2 \\ E[X_0^3(t)] = a_0^3 + 3a_0^2 a_2 + 3a_0 a_1^2 + 18a_0 a_1 a_3 + 9a_0 a_2^2 + 45a_0 a_3^2 + 9a_1^2 a_2 + 90a_1 a_2 a_3 + 15a_2^3 + 315a_2 a_3^2 \\ E[X_0^4(t)] = a_0^4 + 4a_0^3 a_2 + 6a_0^2 a_1^2 + 36a_0^2 a_1 a_3 + 18a_0^2 a_2^2 + 90a_0^2 a_3^2 + 36a_0 a_1^2 a_2 + 360a_0 a_1 a_2 a_3 + 60a_0 a_2^3 + \\ 1260a_0 a_2 a_3^2 + 3a_1^4 + 60a_1^3 a_3 + 90a_1^2 a_2^2 + 630a_1^2 a_3^2 + 1260a_1 a_2^2 a_3 + 3780a_1 a_3^3 + 105a_2^4 + \\ 5670a_2^2 a_3^2 + 10395a_3^4 \end{cases} \quad (3)$$

(3)式共有4个方程,各方程的左边可分别由目标随机过程的均值、方差、偏态系数和峰度系数确定。由该方程组可解得 a_0, a_1, a_2, a_3 四个待定系数(四元四次方程组的人工求解较为困难,可使用

Mathematica软件求解)。将解得的系数代入(2)式,并进一步由(1)式可近似得到所需要的非 Gauss 随机过程。

3.3 功率谱处理

随机过程不仅拥有幅度上的统计特征，还拥有功率谱特征，要完成一个随机过程的仿真，还必须考虑如何在仿真中拟合目标随机过程的功率谱。

如(2)式所示，使用标准 Gauss 过程的幂级数近似拟合目标随机过程时，由于式中含有时域的高次方项，而时域的乘积在频域为卷积，因此功率谱的拟合涉及到反卷积问题，其处理非常复杂、很难实现。但研究发现，由于目标随机过程展开成标准 Gauss 过程的幂级数时，高阶项系数收敛较快，所造成的频域卷积对最终随机过程的功率谱总体影响很小，因此仿真中仅考虑了一次幂的功率谱处理问题。

同前，目标随机过程的功率谱 $S(f)$ 可由实测或仿真数据获得。仿真中，首先在给定采样频率 F_s 下生成目标时间长度 T 的标准 Gauss 白噪声序列，然后对其进行离散傅里叶(DFT)变换，并根据(4)式^[5]进行功率谱赋形，最后再进行傅里叶反变换(IDFT)，即可获得功率谱与目标随机过程一致的标准高斯过程 $U(t)$ 。

$$A_k = \sqrt{2S(f_k)\Delta f}, \quad k = 1, \dots, N, \quad (4)$$

其中 A_k 为各频点的功率谱赋形系数， $S(f_k)$ 为各频点的目标功率谱高度， Δf 为离散傅里叶变换后的频率间隔，且有 $\Delta f = F_s/(2N)$ ， N 为总的序列点数，且有 $N = F_s \times T$ 。

将所得 $U(t)$ 和 3.1 节中计算得到的系数 a_0, a_1, a_2, a_3 共同代入(2)式进行计算可得到 $X_0(t)$ ，再由(1)式可最终得到目标随机过程 $X(t)$ ，此即为所需要仿真的存在起伏的接收光信号包络。

4 仿真结果验证

为检验所提仿真方法的有效性，进行了仿真实验，结果如图 2 所示。图 2(a)~(c)分别为序列样本、幅度分布密度和功率谱密度，虚线表示的序列为使用 2.2 节描述的常规仿真方法获得的序列及其特征，实线表示使用 Gauss 过程幂级数近似方法获得的序列及其特征。进行幂级数近似时，目标随机过程即为常规方法所得结果序列。由图 2(a)可直观地看出，两种方法获得的序列在起伏幅度和起伏频率方面非常相似。

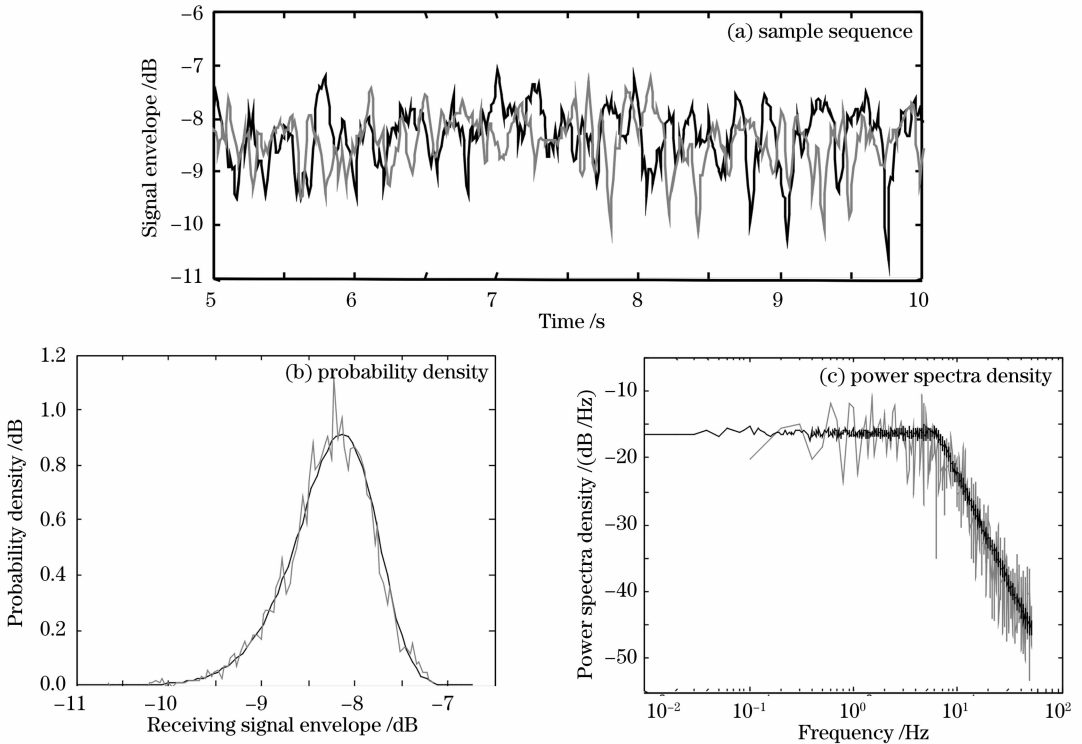


图 2 两种方法所得序列的特征对比

Fig. 2 Comparison of the simulated sequence character obtained by different method

比较图 2(b), (c)可见，使用标准 Gauss 过程幂级数近似法获得的序列，其幅度统计特征(由分布密度函数表征)与目标序列一致，其时间相关特

征(由功率谱表征)与目标序列相符(此例中有 $a_0 = 0.101704, a_1 = -0.958464, a_2 = -0.101704, a_3 = -0.0102729$ ，可见随着幂次的增高，系数以约

1/10 的速度收敛,故高次幂引入的功率谱卷积问题对最终结果引入的误差很小)。由此可见,所提方法可有效地实现对星地激光通信接收光信号包络的仿真。

常规仿真中,采样频率为 100 Hz,总共仿真生成了 3000 个相位屏,合 30 s 数据,到计算出如图 2 (a)所示曲线,耗时约 20 min,占用内存最大时约 1.5 Gbyte;使用提出的方法进行仿真时,采样频率同为 100 Hz,仿真 10000 s 数据耗时约 20 s,占用内存最大时约 500 Mbyte。由此可见,提出的仿真方法确实在资源占用和计算量方面具有常规方法不可比拟的巨大优势,这也使得以后进行接收系统突发误码规律的纯软件仿真和半实物仿真研究成为可能。

5 结 论

在星地激光通信接收光信号包络起伏的仿真问题上,针对常规仿真方法存在的计算量大、消耗资源多、仿真所得序列时间长度有限等缺点,提出了一种基于结果的接收光信号包络起伏的仿真方法,该法基于湍流对接收光信号造成的包络起伏的统计特征(包括由均值、方差、偏移度、峭度等表征的幅度统计特征和由功率谱密度表征的时间统计特征),使用 Gauss 随机过程的幂级数直接生成目标序列。仿真结果表明,使用该方法生成的序列,其幅度和时间统计特征与目标相符,验证了该方法的有效

性。该方法具有计算量小、占用资源相对较少的优势,可以实时生成星地光通信中接收光信号包络起伏数据,使得后续进行接收系统突发误码规律的纯软件仿真和半实物仿真研究成为可能。

参 考 文 献

- 1 Xing Jianbin, Xu Guoliang, Zhang Xuping *et al.*. Effect of atmospheric turbulence on laser communication system[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1850~1852
邢建斌, 许国良, 张旭莘等. 大气湍流对激光通信系统的影响[J]. *光子学报*, 2005, **34**(12): 1850~1852
- 2 Zhu Yong. Research of PAT, Doppler and atmospheric effect in satellite optical communication [D]. Nanjing: Institute of Communication Engineering, The Chinese People's Liberation Army University of Science and Technology, 2008
朱 勇. 卫星光通信若干问题研究[D]. 南京:解放军理工大学通信工程学院, 2008
- 3 Bailly M, Perez E. The pointing, acquisition and tracking system of the Silex European program major technological step for intersatellite optical communication[C]. *SPIE*, 1991, **1417**: 142~157
- 4 He Jun. Structural first failure times under non-Gaussian stochastic behavior[J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, **28**(11): 1325~1332
何 军. 非 Gauss 随机特性下的结构首次失效时间研究[J]. *应用数学和力学*, 2007, **28**(11): 1325~1332
- 5 Jiang Yu, Chen Xun, Tao Junyong *et al.*. Numerically simulating non-Gaussian random processes with specified PSD, skewness and kurtosis [J]. *Journal of System Simulation*, 2006, **18**(5): 1127~1130
蒋 瑜, 陈 循, 陶俊勇等. 指定功率谱密度、偏斜度和峭度值下的非高斯随机过程数字模拟[J]. *系统仿真学报*, 2006, **18**(5): 1127~1130