

无人机空地信道衰落包络统计特性研究

王亚文 成 能 陈小敏 仲伟志 朱秋明

(南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业与信息化部重点实验室, 江苏南京 211100)

摘 要: 针对电平通过率和平均衰落持续时间能有效反映信道衰落包络的恶劣状况, 提出了一种基于几何随机的无人机信道模型, 该模型支持任意三维轨迹运动。在此基础上, 分析推导了电平通过率和平均衰落持续时间的理论表达式, 并得到二维散射情况下的闭式解。针对无人机高速飞行场景的仿真结果表明, 本文推导的电平通过率和平均衰落时间理论值与仿真值吻合, 并且与实际测量结果基本一致, 可极大降低评估计算的复杂度, 对 UAV 通信系统的差错控制编码和分组交织设计具有理论指导意义。

关键词: 无人机; 信道模型; 衰落包络; 电平通过率; 平均衰落时间

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.01.004

引用格式: 王亚文, 成能, 陈小敏, 等. 无人机空地信道衰落包络统计特性研究[J]. 信号处理, 2020, 36(1): 25-31. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.01.004.

Reference format: Wang Yawen, Cheng Neng, Chen Xiaomin, et al. Statistical Properties of UAV-to-Ground Channel Fading Envelope[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(1): 25-31. DOI: 10.16798/j.issn.1003-0530.2020.01.004.

Statistical Properties of UAV-to-Ground Channel Fading Envelope

Wang Yawen Cheng Neng Chen Xiaomin Zhong Weizhi Zhu Qiuming

(Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211100, China)

Abstract: The level crossing rate and average fading duration can reflect the quality of channel fading envelope along time. A geometry-based stochastic UAV-to-Ground channel model is proposed which supports three-dimensional arbitrary trajectory motion. On this basis, the exact solutions of level crossing rate and average fading duration are analyzed and derived. Meanwhile, an approximate simplified solution for two-dimension scattering scenarios is also obtained. The numerical simulation results under UAV high-speed flight trajectories show that our theoretical results of level crossing rate and average fading time agree well with the simulation ones, and they are also consistent with the actual measurement results under UAV scenarios. Since these results can greatly reduce the computational complexity of statistical properties of UAV channels, it's helpful for the design of error control coding and block interleaver in UAV communication systems, and significantly improve the analysis of efficiency and simulation of UAV communication systems under complex and dynamic scenarios.

Key words: unmanned aerial vehicle; channel model; fading envelope; level crossing rate; average fading duration

1 引言

近年来,无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)

在远程监视、中继通信、货物运输和环境监测等领域扮演了重要角色,成为国内民生的新经济增长点^[1]。然而,UAV 大范围飞行时,无线信号传播过

程中会产生明显的随机衰落,导致 UAV 通信系统经常受到干扰甚至是中断^[2-3]。因此,构建符合真实传播环境的 UAV 信道模型并研究信道衰落包络统计特性,对 UAV 机载通信设备的方案设计、算法优化和性能评估至关重要。

UAV 通信场景具有高速飞行和地面区域快速切换的特点,其传播信道与传统地面移动通信道差异明显。研究表明,对于空-地(Air-to-Ground, AG)信道,地面端(Ground Station, GS)接收到的信号可分为视距(Line-of-Sight, LoS)路径分量和非视距(Non-Line-of-Sight, NLoS)路径分量,后者包括 UAV 机身的遮挡和接收端周围散射体产生的散射径分量。根据建模方法的不同,AG 信道模型可以分为确定性模型,统计性模型和几何随机模型^[4]。其中,几何随机模型由于其在复杂性和准确性之间取得平衡,近年来已成为 AG 信道建模的主流方法。

UAV 信道衰落与机身运动及地形地貌密切相关,实际中通常采用衰落幅值概率密度函数(PDF)、电平通过率(Level Crossing Rate, LCR)和平均衰落时间(Average Fade Duration, AFD)来描述信道衰落包络的恶劣程度。早期 AG 信道模型通常假设信道满足广义平稳条件,此类模型针对信道模型衰落包络的一阶统计特性研究比较成熟^[5-11]。最近,基于几何随机的 UAV 信道模型已经聚焦 LCR 和 AFD 的研究,文献[12]首次给出 UAV 瑞利信道的 LCR 和 AFD 表达式;文献[13]提出基于椭球体的 UAV 信道模型并给出与角度扩展等参数相关的 LCR 和 AFD 理论表达式;文献[14-15]假设 UAV 以恒定角度飞行,建立 UAV 信道模型并推导了 AG 信道的 LCR 和 AFD 的闭式解;文献[16]针对 UAV 超高速飞行场景建立模型,指出 LCR 与载波频率呈正相关。值得注意的是,UAV 空中飞行轨迹的多样性对通信系统性能的影响巨大,支持 UAV 任意轨迹的三维 AG 模型已经成为未来该领域的研究趋势。文献[17-18]将三维运动轨迹和三维天线影响因素纳入到 AG 信道模型中,进一步研究两者对 AG 信道衰落包络统计特性的影响,然而文中并没有推导出 LCR 和 AFD 的闭式解。

为了研究三维任意飞行轨迹 UAV 通信场景下信道衰落包络的 LCR 和 AFD,本文首先提出了一种基于几何随机的三维 UAV 空地信道模型,该模型支持三维任意运动轨迹。进一步地,本文基于理论模

型推导出三维 UAV 飞行场景下 LCR 和 AFD 的理论表达式,并得到二维情况下的闭式解,研究模型参数对统计特性的影响。最后,针对无人机飞行场景,本文将 LCR 和 AFD 的理论值与仿真值及实测结果进行了比较,验证了推导结果的准确性。

2 无人机空地信道模型

图1给出了典型的 UAV 与 GS 通信场景。假设 UAV 周围不存在散射体,GS 周围的散射体分布半球体表面。图中 $\mathbf{V}_u(t)$ 、 $\mathbf{V}_g(t)$ 分别表示 UAV 和 GS 的移动速度, $\omega_u^\phi(t)$ 、 $\omega_g^\phi(t)$ 分别表示 UAV 和 GS 速度的方位角, $\omega_u^\theta(t)$ 、 $\omega_g^\theta(t)$ 分别表示 UAV 和 GS 速度俯仰角; $\phi_{tx}^{\text{LoS}}(t)$ 和 $\theta_{tx}^{\text{LoS}}(t)$ 表示 LoS 离开角的方位角(Azimuth Angle of Departure, AAoD)和俯仰角(Elevation Angle of Departure, EAoD), $\phi_{rx}^{\text{LoS}}(t)$ 和 $\theta_{rx}^{\text{LoS}}(t)$ 表示 LoS 到达角的方位角(Azimuth Angle of Arrival, AAoA)和俯仰角(Elevation Angle of Arrival, EAoA), $\phi_{tx,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 和 $\theta_{tx,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 表示第 n 条 NLoS 中第 m 条散射支路的 AAoD 和 EAoD, $\phi_{rx,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 和 $\theta_{rx,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 表示第 n 条 NLoS 中第 m 条散射支路的 AAoA 和 EAoA。

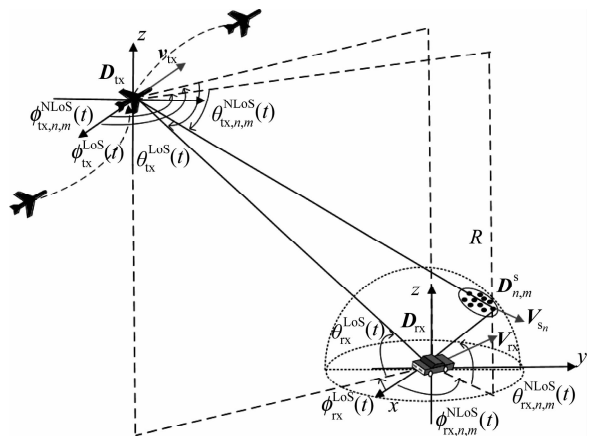


图1 无人机空地信道模型

Fig. 1 UAV air-ground channel model

基于电磁波传播理论可将 UAV 信道模型表示为 LoS 和 NLoS 两部分,其中 NLoS 路径又包含多条散射支路。此时,UAV 信道的冲激响应可表示为^[10]

$$h(t, \tau) = \sqrt{\frac{K(t)}{K(t)+1}} \sqrt{P^{\text{LoS}}(t)} h^{\text{LoS}}(t) \delta(\tau - \tau^{\text{LoS}}(t)) + \sqrt{\frac{1}{K(t)+1}} \sum_{n=1}^{N(t)} \sqrt{P_n^{\text{NLoS}}(t)} h_n^{\text{NLoS}}(t) \delta(\tau - \tau_n^{\text{NLoS}}(t)) \quad (1)$$

其中, $K(t)$ 表示时变的莱斯因子; $h^{\text{LoS}}(t)$ 、 $\sqrt{P^{\text{LoS}}(t)}$ 和 $\tau^{\text{LoS}}(t)$ 分别表示 LoS 部分的复信道系数、功率和时延; $h_n^{\text{NLoS}}(t)$ 、 $\sqrt{P_n^{\text{NLoS}}(t)}$ 和 $\tau_n^{\text{NLoS}}(t)$ 分别表示第 n 条 NLoS 的复信道系数、功率和时延, $N(t)$ 表示 NLoS 路径包含的散射支路数目。

进一步地, LoS 和 NLoS 的信道冲激响应可以表达为

$$h^{\text{LoS}}(t) = e^{j\chi \int_0^t [\mathbf{V}_{\text{tx}}(\tau) \cdot \mathbf{s}_{\text{tx}}^{\text{LoS}}(\tau) + \mathbf{V}_{\text{rx}} \cdot \mathbf{s}_{\text{rx}}^{\text{LoS}}(\tau)] d\tau + \phi^{\text{LoS}}} \quad (2)$$

$$h_n^{\text{NLoS}}(t) = \sqrt{\frac{1}{M}} \sum_{m=1}^M e^{j\chi \int_0^t [\mathbf{V}_{\text{tx}}(\tau) \cdot \mathbf{s}_{\text{tx},n,m}(\tau) + \mathbf{V}_{\text{rx}} \cdot \mathbf{s}_{\text{rx},n,m}(\tau)] d\tau + \phi_{n,m}} \quad (3)$$

其中, $\chi = 2\pi f_0 / c_0$ 表示波数, f_0 表示载波频率, c_0 表示光速; ϕ^{LoS} 和 $\phi_{n,m}$ 则表示各支路随机初始相位。 $\mathbf{V}_{\text{tx}/\text{rx}}(t) = \nu_{\text{tx}/\text{rx}}(t) [\cos \omega_{\text{tx}/\text{rx}}^\theta(t) \cos \omega_{\text{tx}/\text{rx}}^\phi(t), \cos \omega_{\text{tx}/\text{rx}}^\theta(t) \sin \omega_{\text{tx}/\text{rx}}^\phi(t), \sin \omega_{\text{tx}/\text{rx}}^\theta(t)]$, $\mathbf{s}_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)$ 表示 LoS 离开角和到达角的球形单位矢量; $\mathbf{s}_{\text{tx}/\text{rx},n,m}(t)$ 表示第 n 条 NLoS 中第 m 条散射支路离开角和到达角的球形单位矢量。

$$\mathbf{s}_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)) \cos(\phi_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)) \\ \cos(\theta_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)) \sin(\phi_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)) \\ \sin(\theta_{\text{tx}/\text{rx}}^{\text{LoS}}(t)) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{s}_{\text{tx}/\text{rx},n,m}(t) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_{\text{tx}/\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)) \cos(\phi_{\text{tx}/\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)) \\ \cos(\theta_{\text{tx}/\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)) \sin(\phi_{\text{tx}/\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)) \\ \sin(\theta_{\text{tx}/\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)) \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$p_{\xi\dot{\xi}}(t, r, \dot{r}) = 4\pi r \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left[\prod_{m=1}^M J_0 \left(2\pi \frac{1}{\sqrt{m}} \left\{ r_1^2 + (2\pi \dot{\Phi}^{\text{NLoS}}(t) r_2)^2 - 4\pi \dot{\Phi}^{\text{NLoS}}(t) r_1 r_2 \sin \theta \right\}^{\frac{1}{2}} \right) \right] \cdot e^{-j2\pi [r r_1 \cos \theta + \dot{r} r_2]} r_1 d\theta dr_1 dr_2 \quad (9)$$

$$N(t, r) = 4\pi r \int_0^{\dot{r}} \int_0^\infty \int_0^{2\pi} \left[\prod_{m=1}^M J_0 \left(2\pi \frac{1}{\sqrt{m}} \left\{ r_1^2 + (2\pi \dot{\Phi}^{\text{NLoS}}(t) r_2)^2 - 4\pi \dot{\Phi}^{\text{NLoS}}(t) r_1 r_2 \sin \theta \right\}^{\frac{1}{2}} \right) \right] \cdot e^{-j2\pi [r r_1 \cos \theta + \dot{r} r_2]} r_1 d\theta dr_1 dr_2 d\dot{r} \quad (10)$$

其中 $J_0(\cdot)$ 表示第一类零阶贝塞尔函数, $\Phi^{\text{NLoS}}(t) = \int_0^t \chi (\mathbf{V}_{\text{tx}}(\tau) \cdot \mathbf{s}_{\text{tx},n,m}(\tau) + \mathbf{V}_{\text{rx}} \cdot \mathbf{s}_{\text{rx},n,m}(\tau)) d\tau$, 将公式(9)代入公式(6)可以得到 LCR 的理论表达式如(10)所示。

当路径数 M 趋向于无穷时, 可以得到 LCR 表达式为

$$N(t, r) = \sqrt{\frac{\beta(t)}{2\pi}} p_\xi(r) \quad (11)$$

其中 $\beta(t)$ 为信道响应的自相关函数 (autocorrelation function, ACF) 的二阶导数, 表示为

3 衰落包络统计特性分析

3.1 LCR 和 AFD 精确解推导

LCR 和 AFD 是反映信号衰落包络随时间波动的两个重要统计参数, 对通信系统交织、编码方案的最优设计及参数选取具有非常重要的意义。其中, LCR 定义为单位时间内信号包络以正斜率或负斜率通过规定电平的预期速率, AFD 定义为衰落包络保持低于给定阈值的平均持续时间, 二者可以分别表示为

$$N(t, r) = \int_0^{+\infty} \dot{r} p_{\xi\dot{\xi}}(t, r, \dot{r}) d\dot{r} \quad (6)$$

$$T(t, r) = \frac{P_\xi(t, r)}{N(t, r)} \quad (7)$$

其中, r 表示电平值; $\dot{\xi}$ 表示包络的一阶导数, $p_{\xi\dot{\xi}}(t, r, \dot{r})$ 表示 ξ 和 $\dot{\xi}$ 包络的联合概率密度函数; $P_\xi(t, r)$ 表示对 ξ 包络的累计概率密度函数。实际中, LoS 可看做包含单条散射支路的 NLoS 特例, 因而本文以 NLoS 路径为例分析推导 UAV 信道衰落包络的统计特性。首先, 令 $\xi = |h_n^{\text{NLoS}}(t)|$, 对任意时刻任意路径, ξ 包络的概率密度函数 $p_\xi(r)$ 可表示为公式(8), ξ 和 $\dot{\xi}$ 包络的联合概率密度函数 $p_{\xi\dot{\xi}}(t, r, \dot{r})$ 表示为公式(9)^[19]

$$p_\xi(r) = (2\pi)^2 r \int_0^\infty \prod_{m=1}^M J_0 \left(2\pi \sqrt{\frac{1}{m}} x \right) J_0(2\pi x r) x dx \quad (8)$$

$$\beta(t) = \frac{\partial^2 r_{\xi\dot{\xi}}(t, \Delta t)}{\partial \Delta t^2} \Big|_{\Delta t=0} \quad (12)$$

进一步地, 利用公式(8)的积分求得 $P_\xi(t, r)$ 代入公式(7), 可以得到 AFD 表达式

$$T(r, t) = \frac{1 - Q(\sqrt{2K(t)}, \sqrt{2(K(t)+1)r^2})}{N(r, t)} \quad (13)$$

3.2 ACF 的闭式解推导

由于 UAV 的快速运动, 导致 UAV、GS 和散射体的位置发生变化, 引起 UAV 信道呈现明显的非平稳性。鉴于此, 本文将非平稳信道划分为多个时间间隔, 并假设单个时间间隔内信道状态平稳, 故

ACF 可定义为

$$\begin{aligned} r_{\xi\xi}^{\bullet}(t, \Delta t) &= E\{h^*(t) \cdot h(t+\Delta t)\} \\ &= \iint \sqrt{p(\theta_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t+\Delta t), \phi_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t+\Delta t))} \\ &\quad \sqrt{p(\theta_{\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t), \phi_{\text{rx},n,m}^{\text{NLoS}}(t))} \\ &\quad e^{j\chi \int_0^t [V_{\text{tx}}(\tau) \cdot s_{\text{tx},n,m}(\tau) + V_{\text{rx}} \cdot s_{\text{rx},n,m}(\tau)] d\tau} d\theta_{n,m}^{\text{NLoS}}(t) d\phi_{n,m}^{\text{NLoS}}(t) \end{aligned} \quad (14)$$

其中 $(\cdot)^*$ 表示共轭。

假设 UAV 水平飞行,速度大小和移动方位角均服从线性变化,并将初始速度和加速度表示为 $\nu(t_0)$ 和 a ,初始移动方位角和方位角加速度表示为 $\omega_\phi(t_0)$ 和 ω 。实际中,UAV 移动速度较快,GS 速度可忽略不计。另外,考虑二维散射环境并将各散射支路的方位角 $\phi_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 建模为时变角度均值 $\bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 和随机角度偏移 δ 两部分,

$$\begin{aligned} M(t, \Delta t) &= \frac{2(\nu(t_0) + at) \sin[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega - k)\Delta t/2]}{\omega - k} \\ &\quad - \frac{a\Delta t \cos[(\omega - k)(t + \Delta t) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)]}{\omega - k} + \frac{2at \cos[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^2} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} N(t, \Delta t) &= \frac{2(\nu(t_0) + at) \cos[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega - k)\Delta t/2]}{\omega_\phi - k} \\ &\quad + \frac{a\Delta t \sin[(\omega - k)(t + \Delta t) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)]}{\omega - k} - \frac{2at \sin[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^2} \end{aligned} \quad (19)$$

进一步地,利用文献[20]中积分公式(3.338- 如式(21)所示。

4)将 $r_{\xi\xi}^{\bullet}(t, \Delta t)$ 简化后可得式(20),其中 $Q(t, \Delta t)$

$$r_{\xi\xi}^{\bullet}(t, \Delta t) = \frac{I_0(\sqrt{(j\chi M(t, \Delta t))^2 + (\kappa + j\chi N(t, \Delta t))^2})}{I_0(\kappa)} = \frac{I_0(\sqrt{Q(t, \Delta t)})}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} Q(t, \Delta t) &= \kappa^2 + j2\chi \left[\frac{2(\nu(t_0) + at) \cos[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega_\phi - k)\Delta t/2]}{\omega - k} \right. \\ &\quad \left. + \frac{a\Delta t \sin[(\omega - k)(t + \Delta t) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)]}{\omega - k} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2at \sin[(\omega - k)(t + \Delta t/2) + \omega_\phi(t_0) - \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0)] \sin[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^2} \right] \\ &\quad - \chi^2 \left[\frac{4(\nu(t_0) + at)^2 \sin^2[(\omega - k)\Delta t/2] + a^2 \Delta t^2 + 2(\nu(t_0) + at) \sin^2[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{2a^2 t \Delta t \sin[(\omega - k)\Delta t/2] \cos[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^3} + \frac{4a^2 t^2 \sin^2[(\omega - k)\Delta t/2]}{(\omega - k)^4} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$$\phi_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t) = \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t) + \delta \quad (15)$$

进一步地,假设角度均值线性变化,形如 $\bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t) = \bar{\phi}_{\text{tx},n,m}^{\text{NLoS}}(t_0) + kt$, k 表示变化速率; δ 则采用如下 Von Mises(VM)分布模型随机产生,

$$f_{\Delta\delta}(\delta) = \frac{e^{\kappa \cos(\delta)}}{2\pi I_0(\kappa)} \quad (16)$$

其中, κ 为形状因子,表示 VM 分布的集中程度; $I_0(\cdot)$ 表示第一类零阶修正贝塞尔函数。利用(14)~(16),并将 UAV 信道冲激响应代入化简可得

$$\begin{aligned} r_{\xi\xi}^{\bullet}(t, \Delta t) &= \frac{1}{2\pi I_0(\kappa)} \int_{-\pi}^{+\pi} e^{j\chi M(t, \Delta t) \sin\delta + (\kappa + j\chi N(t, \Delta t)) \cos\delta} d\delta \end{aligned} \quad (17)$$

其中, $M(t, \Delta t)$ 、 $N(t, \Delta t)$ 分别表示为

4 数值仿真与验证

为验证本文推导的 UAV 信道衰落包络 LCR 和 AFD 理论结果的准确性,下文将利用数值仿真和实测数据进行验证。仿真参数如下:载波频率 2.4 GHz,UAV 与 GS 的初始距离为 150 m,UAV 向远离 GS 的方向飞行。VM 分布形状因子为 2.5,莱斯因子服从高斯分布 $K(t) \sim N(1,3)$ 。其他仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Tab.1 Simulation parameters

参数	UAV
$\nu(t_0)/(m/s)$	30
$a/(m/s^2)$	0.5
$\omega_\phi(t_0)/(^\circ)$	15
$\omega/(^\circ/s)$	1
$\bar{\phi}_{1x,n,m}^{NLoS}(t_0)/(^\circ/s)$	30
$k/(^\circ/s)$	2

图 2 和图 3 分别给出了 UAV 在三维飞行轨迹场景下 LCR 和 AFD 理论值的时间演进的情况,其中 x 轴表示包络电平, y 轴表示时间, z 轴分别表示 LCR 和 AFD。从图中可以看出,随着包络电平的增加,信号包络的电平通过率逐渐降低,而平均衰落持续时间则逐渐上升。进一步地,图 4 和图 5 给出了在 0.5 s、1 s、1.5 s 时刻 LCR 和 AFD 理论值与仿真值的比较,从图中看出,理论值与仿真值趋于一致,通过数值计算后发现理论值和仿真值的最大误差在 0.15% 以内,进一步验证了文中推导的 LCR 和 AFD 理论值的准确性。另外,在 0.5 s 至 1.5 s 之间,UAV 和 GS 相对背向飞行,两者间的距离逐渐增大,LCR

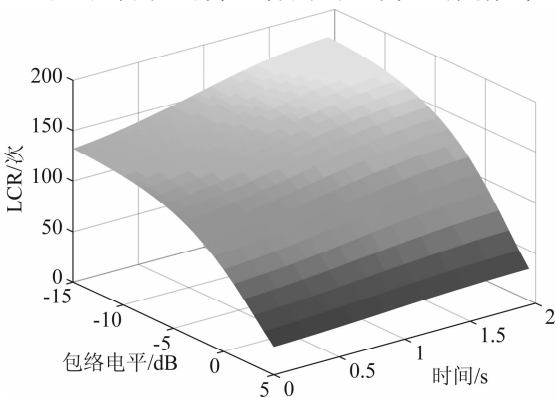


图 2 无人机三维飞行场景下的 LCR

Fig.2 LCRs under UAV 3D flight trajectories

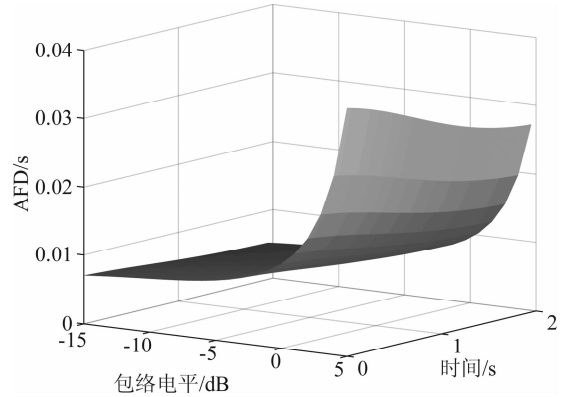


图 3 无人机三维飞行场景下的 AFD

Fig.3 AFDs under UAV 3D flight trajectories

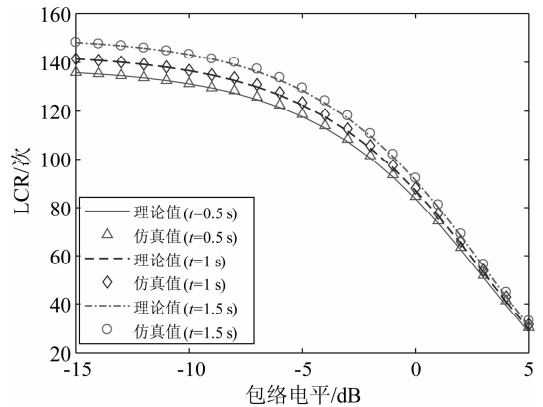


图 4 不同时刻 LCR 的理论值和仿真值

Fig.4 Theoretical and simulated LCRs at different instants

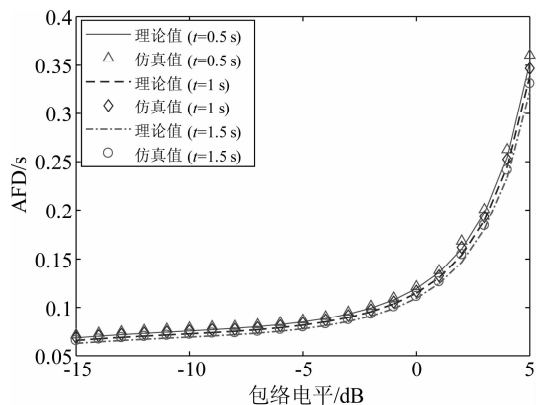


图 5 不同时刻 AFD 的理论值和仿真值

Fig.5 Theoretical and simulated AFDs at different instants

随之增大,AFD 随之减小。原因在于距离增大降低了由于 UAV 运动导致的信道衰落包络的震荡起伏。

文献[13]和[21]通过信道探测器获得了 UAV 城市场景下 LCR 和 AFD 的实测数据曲线,参数设置如下:UAV 平飞速度为 8 m/s,UAV 和基站的距

离为 1000 m, 莱斯因子 K 为 0.03, 本模型其余仿真参数设置如下: 初始速度方位角 $\omega_\phi(t_0)$ 为 12° , 方位角角速度 ω 为 $0^\circ/\text{s}$ 。初始信号方位角 $\bar{\phi}_{l_x, n, m}^{\text{NLoS}}(t_0)$ 为 120° , 信号方位角加速度 k 为 $0.3^\circ/\text{s}$ 。本文基于上述的参数进行仿真, 将文中推导的 LCR 和 AFD 理论值随包络电平变化的结果与实测值进行比较。从图 4 和图 5 中可以看出, 本文所推导的 LCR 和 AFD 理论值与实测结果基本一致, 进一步验证了推导结果的准确性。

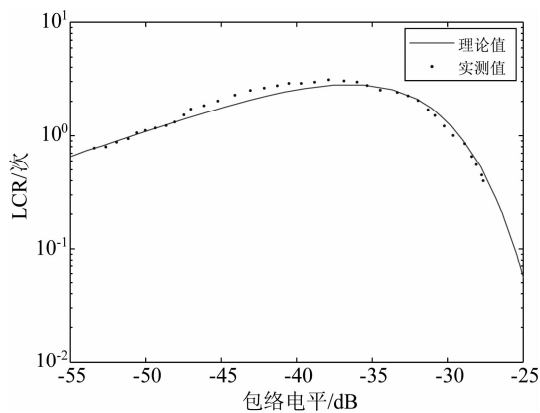


图 6 LCR 实测值与理论值

Fig. 6 Measured and simulated LCRs

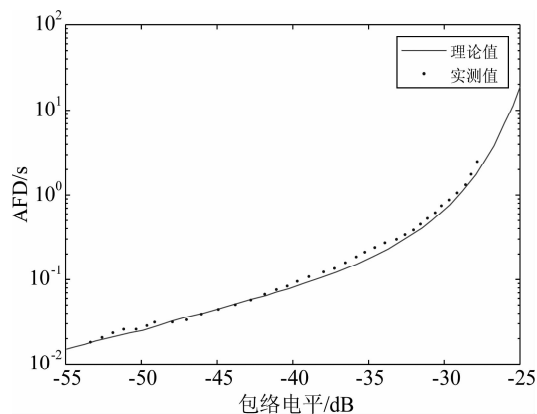


图 7 AFD 实测值与理论值

Fig. 7 Measured and simulated AFDs

5 结论

本文构建了一种支持三维任意飞行轨迹的 UAV 几何随机信道模型, 重点分析推导了 UAV 飞行场景下该模型输出信道衰落包络的 LCR 和 AFD 的理论表达式以及二维散射场景下的闭式解。数值仿真结果表明, LCR 和 AFD 理论值与仿真结果具

有良好的拟合度, 能极大地降低 UAV 信道衰落包络统计特性的评估复杂度。未来我们将进一步构建 UAV 信道测试系统, 基于不同飞行场景的实测数据研究信道衰落包络统计特性, 以及统计特性与飞行场景的内在联系。

参考文献

- [1] Ezequiel C A F, Cua M, Libatique N C, et al. UAV aerial imaging applications for post-disaster assessment, environmental management and infrastructure development [C] // 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems: IEEE, 2014: 274-283.
- [2] Zhong Weizhi, Xu Lei, Zhu Qiuming, et al. MmWave beamforming for UAV communications with unstable Beam Pointing[J]. China Communications, 2019, 16(1): 37-46.
- [3] 程乐乐, 朱秋明, 陆智俊, 等. 无人机毫米波信道建模及统计特性研究[J]. 信号处理, 2019, 35(8): 1385-1391.
Cheng Lele, Zhu Qiuming, Lu Zhijun, et al. Novel channel emulator for UAVs with high mobility[J]. Journal of Signal Processing, 2019, 35(8): 1385-1391. (in Chinese)
- [4] Wang Chengxiang, Bian Ji, Sun Jian, et al. A survey of 5G channel measurements and models[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2018, 20(4): 3142-3168.
- [5] Dosis F, Fantini R, Mondin M, et al. Small-scale fading for high-altitude platform (HAP) propagation channels [J]. IEEE Journal on Selected areas in Communications, 2002, 20(3): 641-647.
- [6] Gao Xijun, Chen Zili, Lv Junwei, et al. The correlation matrix model of capacity analysis in unmanned aerial vehicle MIMO channel[J]. WSEAS Transactions on Communications, 2012, 11(12): 476-485.
- [7] Gao Xijun, Chen Zili, Hu Yongjiang. Characteristic analysis on UAV-MIMO channel based on normalized correlation matrix[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 1-10.
- [8] Wentz M, Stojanovic M. A MIMO Radio Channel Model for Low-Altitude Air-to-Ground Communication Systems [C] // 2015 IEEE 82nd Vehicular Technology Conference: IEEE, 2015: 1-6.
- [9] Jin Kun, Cheng Xiang, Ge Xiaohu, et al. Three-dimensional modeling and space-time correlation for UAV channels [C] // Vehicular Technology Conference: IEEE, 2017:

- 1-5.
- [10] Zhu Qiuming, Jiang Kaili, Chen Xiaomin, et al. A novel 3D non-stationary UAV-MIMO channel model and its statistical properties[J]. *China Communications*, 2018, 12(12): 147-158.
- [11] Zhang Xi, Cheng Xiang. New deterministic and statistical simulation models for non-isotropic UAV-MIMO channels [C] // *Wireless Communications and Signal Processing, 2017 9th International Conference*: IEEE, 2017: 1-6.
- [12] Jameel F, Faisal, Haider M A A, et al. Second order fading statistics of UAV networks [C] // *2017 Fifth International Conference on Aerospace Science & Engineering*: IEEE, 2017: 1-6.
- [13] Zeng Linzhou, Cheng Xiang, Wang Chengxiang, et al. Second order statistics of non-isotropic UAV ricean fading channels [C] // *Vehicular Technology Conference*: IEEE, 2017: 1-5.
- [14] Jia Rubing, Li Yiran, Cheng Xiang. 3D geometry-based UAV-MIMO channel modeling and simulation [J]. *China Communications*, 2018, 15(12): 64-74.
- [15] Yao Bo, Li Xiaoping, Shi Lei, et al. A geometric-stochastic integrated channel model for hypersonic vehicle: a physical perspective [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019, 68(5): 4328-4341.
- [16] Gulfam S M, Nawaz S J, Ahmed A, et al. A novel 3D analytical scattering model for air-to-ground fading channels [J]. *Applied Sciences*, 2016, 6(8): 207-227.
- [17] Jiang Kaili, Chen Xiaomin, Zhu Qiuming, et al. A geometry-based 3D UAV-MIMO channel model allowing 3D arbitrary flight trajectories [C] // *10th International Conference on Wireless Communications and Signal Processing*: IEEE, 2018: 1-6.
- [18] Zhu Qiuming, Wang Yawen, Jiang Kaili, et al. 3D non-stationary geometry-based multi-input multi-output channel model for UAV-ground communication systems [J]. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 2019, 8(13): 1104-1112.
- [19] Pätzold M, Castillo J V, Gutiérrez C A, et al. An exact solution for the level-crossing rate and the average duration of fades of the envelope of sum-of-cisoids processes

[J]. *Procedia Technology*, 2012, 3: 30-40.

- [20] Jeffrey A. Table of integrals, series, and products [M]. Academic Press, 1980.
- [21] Simunek M, Fontán F P, Pechac P. The UAV low elevation propagation channel in urban areas: Statistical analysis and time-series generator [J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, 61(7): 3850-3858.

作者简介



王亚文 男, 1993 年生, 江苏泰州人。2017 年于吉林大学获学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为无人机信道建模与测量。

E-mail: wangyawenjlu@163.com



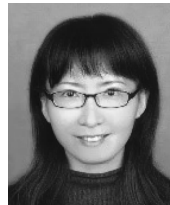
成能 男, 1995 年生, 湖北武汉人。2018 年于吉林大学获得学士学位, 现为南京航空航天大学硕士研究生, 研究方向为无人机信道建模与测量。

E-mail: chengn1208@nuaa.edu.cn



陈小敏 女, 1975 年生, 江苏盐城人。2010 年于南京航空航天大学获得博士学位, 现为南京航空航天大学副教授。主要研究方向为无线信道建模及仿真。

E-mail: chenxm402@nuaa.com



仲伟志 女, 1980 年生, 吉林长春人。2010 年毕业于哈尔滨工业大学获工学博士学位, 现为南京航空航天大学讲师, 主要研究方向为毫米波通信和大规模阵列天线技术。

E-mail: zhongwz@nuaa.edu.cn



朱秋明 男, 1979 年生, 江苏苏州人。2012 年获南京航空航天大学学士学位、硕士学位和博士学位, 现为南京航空航天大学副教授, 主要研究方向为无线信道勘测、建模及仿真模拟。

E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn