

基于 QuaDRiGa 的无人机非平稳信道模型

倪浩然¹, 华博宇¹, 王满喜², 朱秋明¹, 周彤彤¹, 鲍军委³

(1. 南京航空航天大学电磁频谱空间认知动态系统工业和信息化部重点实验室, 南京 211106; 2. 电子信息系统复杂电磁环境效应国家重点实验室, 洛阳 471003; 3. 南京航空航天大学物理学院, 南京 211106)

摘要: 为了解决无人机信道模型非平稳参数空时不连续的问题, 提出了一种支持三维运动及姿态旋转的无人机非平稳几何随机模型, 用于描述和模拟无人机对地多输入多输出通信信道的真实特性。该模型借鉴 QuaDRiGa 中的“准确定性”思想, 基于收发端拓扑关系更新时变信道参数, 考虑路径生灭概率改进信道功率计算方法, 引入姿态相位矩阵描述无人机姿态旋转, 以实现无人机非平稳信道参数的平滑演进。数值仿真结果表明, 本文提出模型能够保证功率和角度等参数的平滑演进, 输出信道的自相关函数具有非平稳性且受无人机姿态影响显著, 可用于无人机通信系统设计和算法优化等领域。

关键词: 无人机; 信道模型; 非平稳信道; 平滑演进; 姿态相位矩阵

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A

A Non-stationary UAV Channel Model Based on QuaDRiGa

NI Haoran¹, HUA Boyu¹, WANG Manxi², ZHU Qiuming¹, ZHOU Tongtong¹, BAO Junwei³

(1. Key Laboratory of Dynamic Cognitive System of Electromagnetic Spectrum Space, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China; 2. State Key Laboratory of Complex Electromagnetic Environment Effects on Electronics and Information System, Luoyang 471003, China; 3. College of Physics, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to solve the space-time discontinuity problem of unmanned aerial vehicle (UAV) non-stationary channel parameters, this paper proposes a non-stationary geometric stochastic model of UAV that supports three-dimensional motion and posture rotation, which is used to describe and simulate the real characteristics of UAV multiple-input multiple-output communication channel. Based on the concept of “accurate qualitative” in QuaDRiGa, the model update time-varying channel parameters based on the topological relation of receiver and transmitter, improve the channel power calculation method considering the probability of path birth and death, and introduce posture phase matrix to describe UAV posture rotation, so as to realize smooth evolution of UAV non-stationary channel parameters. The numerical simulation results show that the model proposed in this paper can ensure the smooth evolution of parameters such as power and angle, and the autocorrelation function of the output channel is non-stationary and significantly affected by UAV posture. The proposed model can be used in UAV communication system design and algorithm optimization.

基金项目: 国家重大科研仪器研制(61827801); 江苏省自然科学基金(BK20211182); 综合业务网理论与关键技术国家重点实验室基金(ISN22-11); 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金(2022D04)。

收稿日期: 2022-02-13; **修订日期:** 2022-06-14

Key words: unmanned aerial vehicle(UAV); channel model; non-stationary channel; smooth evolution; posture phase matrix

引 言

近年来,无人机凭借易操作、低成本、灵活性等优点,被应用于交通检测、军事侦察等领域^[1-2]。特别地,无人机作为未来通信网络系统的重要组成部分,承担着空中基站、移动中继等作用^[3-4]。无人机具有机身旋转、飞行速度快等特点,传统移动信道模型难以全面描述信道的全三维特性,也无法保证模型输出的连续性^[5]。因此,构建符合真实场景的连续非平稳信道模型对于无人机通信系统的设计和性能优化具有重要意义^[6]。

当无人机作为空中移动端与地面移动端进行通信时,信道将呈现明显的非平稳特性^[7-8]。基于几何的随机模型已被广泛应用在陆地场景的非平稳信道建模^[9-11]。例如,文献[10]假设散射体服从高斯分布,提出了一种半椭圆体车-车非平稳信道模型;文献[11]通过定义散射体影响的有效区域,更有效地描述了车-车信道的非平稳性。然而,传统车-车信道模型重点关注移动端的速率、轨迹及交通场景的变化,而无人机信道特性与飞行高度及飞行姿态密切相关^[12-13]。例如,文献[14]将无人机的飞行高度分层并使用不同的统计分布生成信道参数,提出了一种三维无人机非平稳信道模型;文献[15]针对无人机飞行过程滚转角变化导致的信道特性改变,提出了一种考虑三维姿态的无人机非平稳信道模型。为了保证信道参数的平滑过渡,文献[16]引入了积分运算解决相位突变的情况,并复现了更真实的多普勒频率;文献[17]提出了以确定性方法进行时延和角度参数连续更新的思想。在此基础上,德国弗劳恩霍夫研究院开发的 QuaDRiGa 模型通过定义距离矢量并结合几何拓扑关系,提供了改善非平稳信道参数空时连续性的方法,但该思想尚未应用于双移动信道模型^[18-19]。

为了建立更符合真实场景的无人机非平稳信道模型,并解决信道参数演进不平滑的问题,本文首先提出了一种支持三维运动及姿态旋转的无人机非平稳信道模型,将 QuaDRiGa 中“准确定性”思想应用于该模型并加以改进,同时引入姿态相位矩阵实现对无人机姿态的描述,实现无人机非平稳信道中功率、时延、角度等参数的平滑演进。最后给出该模型的统计特性表达式,仿真验证了模型正确性并比较分析了改进效果。

1 非平稳信道模型

无人机空地通信场景如图 1 所示,无人机作为发射端,配置 Q 根发射天线,移动接收端配置 P 根接收天线。以无人机和移动接收端的中心为原点分别建立两个独立的坐标系 $\tilde{x}-\tilde{y}-\tilde{z}$ 和 $x-y-z$,其中, \tilde{x} 轴和 x 轴的方向分别指向无人机和移动接收端的初始速度方向, $V^{\text{Tx}}(t)$ 和 $V^{\text{Rx}}(t)$ 分别表示无人机和移动接收端的速度矢量。在无人机信道中,信号传播分为非视距(Non line of sight, NLoS)路径分量和视距(Line-of-sight, LoS)路径分量。图中, $\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 、 $\beta_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$ 、 $\beta_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$ 分别表示 t 时刻 LoS 径的离开角的方位角(Azimuth angle of departure, AAoD)、离开角的俯仰角(Elevation angle of departure, EAoD)、到达角的方位角 Azimuth angle of arrival, AAoA)和到达角的俯仰角(Elevation angle of arrival, EAoA)。 $\alpha_{n,m}^{\text{Tx}}(t)$ 、 $\beta_{n,m}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\alpha_{n,m}^{\text{Rx}}(t)$ 、 $\beta_{n,m}^{\text{Rx}}(t)$ 分别表示 t 时刻 NLoS 径中第 n 条 NLoS 径中第 m 条子径的 AAoD、EAoD、AAoA 和 EAoA。此外,在机身坐标系 $\tilde{x}-\tilde{y}-\tilde{z}$ 中定义了 3 种姿态角来描述无人机的时变姿态,即俯仰角、滚转角和航向角,分别记为 γ 、 ω 和 φ 。

无人机对地多输入多输出(Multiple-input multiple-output, miMO)信道可以表示为一个 $Q \times P$ 的复矩阵

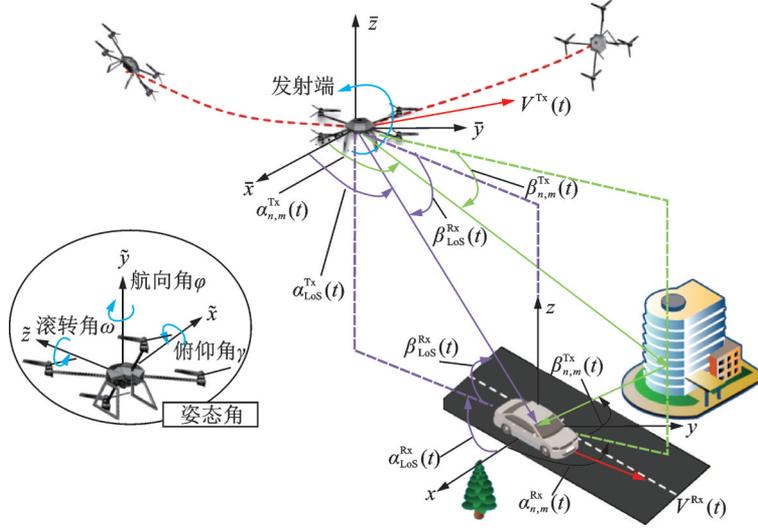


图1 无人机空地通信场景

Fig.1 Air-to-ground communication scenario of UAV

$$H(t, \tau) = [h_{qp}(t, \tau)]_{Q \times P} \quad (1)$$

式中: Q 为发射天线总数; P 为接收天线总数。第 q 根发射天线和第 p 根接收天线之间的单位冲激响应 $h_{qp}(t, \tau)$ 可以表示为若干 NLoS 径和 LoS 径的叠加, 即

$$h_{qp}(t, \tau) = \sqrt{\frac{1}{K(t)+1}} \sum_{n=1}^{N(t)} h_{qp,n}^{\text{NLoS}}(t) \delta(\tau - \tau_n^{\text{NLoS}}(t)) + \sqrt{\frac{K(t)}{K(t)+1}} h_{qp}^{\text{LoS}}(t) \delta(\tau - \tau^{\text{LoS}}(t)) \quad (2)$$

式中: $K(t)$ 表示时变的莱斯因子; $N(t)$ 表示时变的 NLoS 径数目; $h_{qp,n}^{\text{NLoS}}(t)$ 和 $\tau_n^{\text{NLoS}}(t)$ 分别表示第 n 条 NLoS 径的时变信道衰落因子和路径时延; $h_{qp}^{\text{LoS}}(t)$ 和 $\tau^{\text{LoS}}(t)$ 分别表示 LoS 径的时变信道衰落因子和路径时延。

NLoS 径信道衰落因子 $h_{qp,n}^{\text{NLoS}}(t)$ 可以进一步表示为

$$h_{qp,n}^{\text{NLoS}}(t) = \sqrt{\frac{P_n(t)}{M}} \lim_{M \rightarrow \infty} \sum_{m=1}^M \begin{bmatrix} F_{p,V}^{\text{Tx}}(\alpha_{n,m}^{\text{Tx}}(t), \beta_{n,m}^{\text{Tx}}(t)) \\ F_{p,H}^{\text{Tx}}(\alpha_{n,m}^{\text{Tx}}(t), \beta_{n,m}^{\text{Tx}}(t)) \end{bmatrix}^T C_{n,m} \begin{bmatrix} F_{q,V}^{\text{Rx}}(\alpha_{n,m}^{\text{Rx}}(t), \beta_{n,m}^{\text{Rx}}(t)) \\ F_{q,H}^{\text{Rx}}(\alpha_{n,m}^{\text{Rx}}(t), \beta_{n,m}^{\text{Rx}}(t)) \end{bmatrix} e^{j\Phi_{qp,n,m}^{\text{NLoS}}(t)} \quad (3)$$

式中: $P_n(t)$ 表示第 n 条 NLoS 径信号功率; M 表示每条 NLoS 径的子径数量; $F_{q/p,V}^{\text{Tx}}$ 和 $F_{q/p,H}^{\text{Tx}}$ 分别表示垂直极化和水平极化下第 q 根和第 p 根天线阵元的方向函数; $\Phi_{qp,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 表示第 n 条 NLoS 径中的第 m 条子径的最终相位; $C_{n,m}$ 表示 NLoS 径信号传播过程中的随机极化矩阵, 具体表示为

$$C_{n,m} = \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{n,m}^{\text{VV}}} & \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} e^{j\Phi_{n,m}^{\text{VH}}} \\ \sqrt{\kappa_{n,m}^{-1}} e^{j\Phi_{n,m}^{\text{HV}}} & e^{j\Phi_{n,m}^{\text{HH}}} \end{bmatrix} \quad (4)$$

值得注意的是, LoS 径可视为 NLoS 径的一种特殊情况, $h_{qp}^{\text{LoS}}(t)$ 可以进一步表示为

$$h_{qp}^{\text{LoS}}(t) = \begin{bmatrix} F_{p,V}^{\text{Tx}}(\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t), \beta_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)) \\ F_{p,H}^{\text{Tx}}(\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t), \beta_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)) \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} e^{j\Phi_{\text{LoS}}^{\text{VV}}} & 0 \\ 0 & e^{j\Phi_{\text{LoS}}^{\text{HH}}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{q,V}^{\text{Rx}}(\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t), \beta_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)) \\ F_{q,H}^{\text{Rx}}(\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t), \beta_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)) \end{bmatrix} e^{j\Phi_{qp}^{\text{LoS}}(t)} \quad (5)$$

2 非平稳参数计算及平滑演进

2.1 信道模型时域演进

本文将收发端的运动轨迹分割为成对的准平稳段,在相邻两个准平稳段之间构建重叠区域用来描述段间信道参数的平滑过程,如图 2 所示。该模型引入了 QuaDRiGa 的“准确定性”参数演进思想,以改善信道模型的空时连续性。值得注意的是,参数演进的初始值取决于信道测量提取的时延扩展、角度扩展等统计特性。

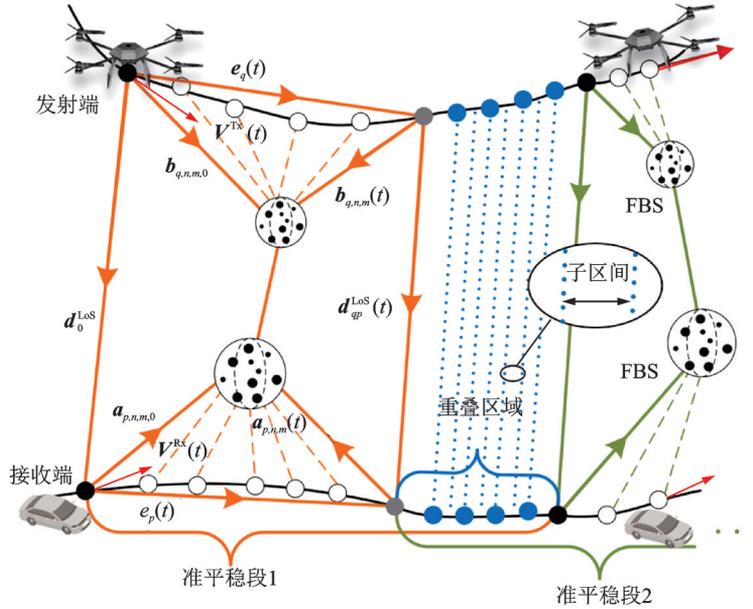


图 2 信道参数演进模型

Fig.2 Channel parameter evolution model

为了使收发端的准平稳段保持一致,本文只定义接收端轨迹的准平稳段,发射端依据运动时间与之相配对。收发端在每一个准平稳段内移动时,散射体的位置固定不变,结合收发端运动轨迹利用拓扑关系来更新每个时刻的信道参数。注意,NLoS 径的子径具有相同的时延和不同的离开及到达角。当收发端从上一个准平稳段进入新段时,散射体位置的改变会引起 NLoS 径的生灭,这一过程存在于两段之间的重叠区域。为了解决新旧准平稳段交替过程中信道参数的突变,重叠区域被进一步划分为若干子区间,通过定义连续函数来平滑子区间之间参数的连续性。

2.2 信道功率动态生灭

在无人机对地通信过程中,散射体的变化导致了信号功率的动态生灭,每条路径功率的大小主要取决于该路径的相对时延。由于无人机的高速运动,传播路径的数目随时会发生变化即生灭过程。路径的生灭过程与新生概率 λ_B 和消亡概率 λ_D 有关,无人机与移动接收端的天线阵列间距分别定义为 Δr_q 和 Δr_p ,则路径的存活概率可以表示为^[14]

$$B_{q/p}(t) = \exp \left[-\lambda_B \left(\frac{\delta_d t}{d_\lambda^s} + \frac{\Delta r_{q/p}}{d_\lambda^a} \right) \right] \quad (6)$$

式中: δ_d 表示由准平稳段确定的时间系数; d_λ^s 和 d_λ^a 分别表示时域和天线阵列下的场景相关系数。对于 MIMO 而言,至少一个发射天线和一个接收天线存在可观测散射体才构成完整的路径,因此,路径的联

合存活概率表示为

$$B_s(t) = B_q(t) \cdot B_p(t) \quad (7)$$

而新生路径平均数目可表示为

$$E\{N(t)\} = \frac{\lambda_D}{\lambda_B} (1 - B_s(t)) \quad (8)$$

例如,当 $B_s(t) = 1$ 时,路径不会发生生灭,故新生路径数目为0。进一步,每条路径功率可表示为

$$\tilde{P}_n(t) = \left[\exp\left(-\tau_n^{\text{NLoS}}(t) \frac{r_\tau - 1}{r_\tau \sigma_\tau}\right) 10^{-\frac{G_n}{10}} \right] \quad (9)$$

式中: r_τ 表示时延放缩系数; G_n 服从 $(0, 3)$ 的高斯分布; σ_τ 表示随机的时延扩展; τ_n^{NLoS} 表示不同路径的时延^[20]。然后,通过归一化得到最终的路径功率

$$P_n(t) = \tilde{P}_n(t) / \sum_{n=1}^{N(t)} \tilde{P}_n(t) \cdot w^{[\text{sin}]} \quad (10)$$

值得注意的是,路径的生灭现象存在于准平稳段间的重叠区域。传统模型中,路径生灭导致功率输出存在不连续的现象,为了解决这个问题,本文在重叠区域的子区间之间将信道功率突变过程建模为平方正弦函数

$$w^{[\text{sin}]} = \sin^2\left(\frac{\pi}{2} \cdot w^{[\text{lin}]}\right) \quad (11)$$

式中: $w^{[\text{lin}]}$ 表示由0到1的线性斜坡; $w^{[\text{sin}]}$ 为相应的正弦斜坡,在开始和结束处具有恒定斜率,以此来防止子区间边缘的不一致。基于此方法,路径功率在旧准平稳段逐渐降低,在新段逐渐增加,达到功率平滑的目的。

2.3 路径时延动态演进

路径时延与收发信号的传播距离有关,定义收发端初始距离为 d_0^{LoS} , $d^{\text{LoS}}(t)$ 为 t 时刻由无人机天线 q 指向接收端天线 p 的距离矢量,由拓扑关系可得

$$d^{\text{LoS}}(t) = d_0^{\text{LoS}} - e_q(t) + e_p(t) \quad (12)$$

式中: $e_q(t)$ 及 $e_p(t)$ 表示自初始时刻天线单元位置指向 t 时刻天线单元位置的矢量。 t 时刻LoS径的时延 $\tau^{\text{LoS}}(t)$ 可直接由距离矢量 $d^{\text{LoS}}(t)$ 与光速 c 的比值表示

$$\tau^{\text{LoS}}(t) = \frac{|d^{\text{LoS}}(t)|}{c} \quad (13)$$

为了适应复杂的无人机通信场景,本文将NLoS径的传播过程建立为多跳模型,即NLoS径的时延由首个散射体(First-bounce scatterer, FBS)和最终散射体(Last-bounce scatterer, LBS)的位置决定。注意,单跳模型可视作多跳模型的一种特殊情况。在初始时刻,第 n 条NLoS径的传播总距离 $d_{n,m,0}^{\text{NLoS}}$ 可以表示为

$$d_{n,m,0}^{\text{NLoS}} = \tau_n \cdot c + |d_0^{\text{LoS}}| \quad (14)$$

式中: τ_n 为第 n 条NLoS径相对于LoS径的附加时延。NLoS径由发射端、FBS、LBS及接收端之间的3段路径组成,如图2所示,NLoS径初始距离也可以表示为

$$d_{n,m,0}^{\text{NLoS}} = |b_{q,n,m,0}| + |c_{n,m,0}| + |a_{p,n,m,0}| \quad (15)$$

式中: $b_{q,n,m,0}$ 和 $a_{p,n,m,0}$ 分别为初始时刻收发端指向FBS和LBS的距离矢量, $c_{n,m,0}$ 表示初始时刻FBS指向LBS的距离矢量。在 t 时刻,距离矢量 $a_{p,n,m}(t)$ 和 $b_{q,n,m}(t)$ 由拓扑关系更新得出

$$\mathbf{a}_{p,n,m}(t) = \mathbf{a}_{p,n,m}(t) - \mathbf{e}_p(t) \quad (16)$$

$$\mathbf{b}_{q,n,m}(t) = \mathbf{d}_0^{\text{LoS}} + \mathbf{a}_{p,n,m}(t) - \mathbf{e}_q(t) \quad (17)$$

由此可得到 NLoS 径总长度

$$\mathbf{d}_{n,m}^{\text{NLoS}}(t) = \left| \mathbf{b}_{q,n,m}(t) \right| + \left| \mathbf{c}_{n,m}(t) \right| + \left| \mathbf{a}_{p,n,m}(t) \right| \quad (18)$$

同时,根据角度分布将 NLoS 径分解为 M 条到达方向略微不同的子径^[21],则每一条 NLoS 径的时延为

$$\tau_n^{\text{NLoS}}(t) = \frac{1}{M \cdot c} \sum_{m=1}^M \mathbf{d}_{n,m}^{\text{NLoS}}(t) \quad (19)$$

2.4 信道相位平滑演进

无人机对地通信过程中,三维飞行轨迹及姿态变化导致信号相位的改变。本文将相位建模为 3 个独立的分量,通过引入空间相位项描述无人机的全三维运动。NLoS 径和 LoS 径的最终相位 $\Phi_{qp,n,m}^{\text{NLoS}}(t)$ 和 $\Phi_{qp}^{\text{LoS}}(t)$ 可表示为

$$\Phi_{qp,n,m}^{\text{NLoS/LoS}}(t) = \Phi_{1_{n,m}/1}^{\text{NLoS/LoS}}(t) + \Phi_{D_{n,m}/D}^{\text{NLoS/LoS}}(t) + \Phi_{A_{qp,n,m}/A_{qp}}^{\text{NLoS/LoS}}(t) \quad (20)$$

式中: $\Phi_{1_{n,m}/1}^{\text{NLoS/LoS}}$ 表示服从 $(0, 2\pi]$ 高斯分布的初始相位; $\Phi_{D_{n,m}/D}^{\text{NLoS/LoS}}(t)$ 表示由于收发端相对距离变化产生的多普勒相位,可进一步表示为

$$\Phi_{D_{n,m}/D}^{\text{NLoS/LoS}}(t) = \frac{2\pi}{\lambda} \left(\mathbf{d}_{n,m}^{\text{NLoS/LoS}}(t) \bmod \lambda \right) \quad (21)$$

其中 λ 表示信号波长; $\Phi_{A_{qp,n,m}/A_{qp}}^{\text{NLoS/LoS}}(t)$ 表示 MIMO 天线阵列和无人机姿态旋转引起的空间相位,可进一步表示为

$$\Phi_{A_{qp,n,m}/A_{qp}}^{\text{NLoS/LoS}}(t) = \frac{2\pi f}{c} \left(\mathbf{r}_q^{\text{Tx}} \cdot \mathbf{R}^{\text{Tx}}(t) \cdot \mathbf{R}^{\text{P}}(t) \cdot \mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t) + \mathbf{r}_p^{\text{Rx}} \cdot \mathbf{R}^{\text{Rx}}(t) \cdot \mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t) \right) \quad (22)$$

式中: f 表示载频频率; \mathbf{r}_q^{Tx} 和 \mathbf{r}_p^{Rx} 分别表示第 q 根发射天线和第 p 根接收天线的位置矢量; $\mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$ 分别表示 NLoS 径和 LoS 径的离开角及到达角的球面单位向量^[15]。此外,旋转矩阵 $\mathbf{R}^{\text{Tx/Rx}}(t)$ 用于修正天线阵列旋转引起的相位变化,可表示为

$$\mathbf{R}^{\text{Tx/Rx}}(t) = \begin{bmatrix} \cos \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) \cos \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) & -\sin \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) & -\sin \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) \cos \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) \\ \cos \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) \sin \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) & \cos \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) & -\sin \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) \sin \phi^{\text{Tx/Rx}}(t) \\ \sin \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) & 0 & \cos \theta^{\text{Tx/Rx}}(t) \end{bmatrix} \quad (23)$$

式中 $\theta^{\text{Tx/Rx}}(t)$ 、 $\phi^{\text{Tx/Rx}}(t)$ 分别表示收发端时变速度矢量的方位角和俯仰角。

特别地,考虑到真实场景中无人机机身旋转的特性,本文引入了姿态相位矩阵 $\mathbf{R}^{\text{P}}(t)$ 来描述无人机的姿态变化。为了简化公式,将时变欧拉角 $\{\omega(t), \varphi(t), \gamma(t)\}$ 表示为 $\{\omega, \varphi, \gamma\}$, 其中 $\omega \in [-\pi, \pi]$, $\varphi \in [0, 2\pi)$, $\gamma \in [-\pi/2, \pi/2]$, 可得

$$\mathbf{R}^{\text{P}}(t) = \begin{bmatrix} \cos \omega \cos \varphi & \cos \omega \sin \varphi \sin \gamma - \sin \omega \cos \gamma & \cos \omega \sin \varphi \cos \gamma + \sin \omega \sin \gamma \\ \sin \omega \cos \varphi & \sin \omega \sin \varphi \sin \gamma + \cos \omega \cos \gamma & \sin \omega \sin \varphi \cos \gamma - \cos \omega \sin \gamma \\ -\sin \varphi & \cos \varphi \sin \gamma & \cos \varphi \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (24)$$

为了实时更新 $\mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\mathbf{s}_{n,m/\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$, 根据实际中收发信号传播的角度与距离矢量, 第 n 条 NLoS 径的 AAoA 和 EAoA 角度均值 $\alpha_{n,m}^{\text{Rx}}(t)$ 和 $\beta_{n,m}^{\text{Rx}}(t)$ 可定义为

$$\begin{cases} \alpha_{n,m}^{\text{Rx}}(t) = \arctan_2 \frac{e_y \cdot \mathbf{a}_{p,n,m}(t)}{e_x \cdot \mathbf{a}_{p,n,m}(t)} \\ \beta_{n,m}^{\text{Rx}}(t) = \arcsin \frac{e_z \cdot \mathbf{a}_{p,n,m}(t)}{a_{p,n,m}(t)} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\arctan_2\{\cdot\}$ 为四象限反正切函数, $\{e_x, e_y, e_z\}$ 为对应坐标系下的基向量。同理, 在散射环境固定的情况下, AoD 取决于无人机和 FBS 的位置, 第 n 条 NLoS 径的 AAoD 和 EAoD 角度均值 $\alpha_{n,m}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\beta_{n,m}^{\text{Tx}}(t)$ 由距离矢量 $\mathbf{b}_{q,n,m}(t)$ 确定地计算为

$$\begin{cases} \alpha_{n,m}^{\text{Tx}}(t) = \arctan_2 \frac{e_y \cdot \mathbf{b}_{q,n,m}(t)}{e_x \cdot \mathbf{b}_{q,n,m}(t)} \\ \beta_{n,m}^{\text{Tx}}(t) = \arcsin \frac{e_z \cdot \mathbf{b}_{q,n,m}(t)}{b_{q,n,m}(t)} \end{cases} \quad (26)$$

作为 NLoS 径的一种特殊情况, LoS 径的 AoA 和 AoD 仅与收发端相对位置有关, 结合距离矢量 $\mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)$, LoS 径的 AAoA 和 EAoA 的角度均值 $\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$ 和 $\beta_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t)$ 可以计算为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t) = \arctan_2 \frac{-e_y \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)}{-e_x \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)} \\ \beta_{\text{LoS}}^{\text{Rx}}(t) = \arctan_2 \frac{e_z \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)}{d^{\text{LoS}}(t)} \end{cases} \quad (27)$$

同理, LoS 径的 AAoD 和 EAoD 的角度均值 $\alpha_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 和 $\beta_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t)$ 可以计算为

$$\begin{cases} \alpha_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t) = \arctan_2 \frac{e_y \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)}{e_x \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)} \\ \beta_{\text{LoS}}^{\text{Tx}}(t) = \arctan_2 \frac{-e_z \cdot \mathbf{d}^{\text{LoS}}(t)}{d^{\text{LoS}}(t)} \end{cases} \quad (28)$$

值得注意的是, 上述方法通过引入旋转矩阵及姿态相位矩阵可以有效描述无人机全三维运动过程中发生的相位变化。此外, 依据收发端和散射体空间位置的连续变化, 对角度参数进行平滑演进, 从而保证输出的信道相位平滑演进。

3 数值仿真及验证

为了验证本文无人机非平稳信道模型及参数平滑演进方法的有效性, 本节利用数值仿真进行验证分析。仿真中, 载波频率 2.4 GHz, 无人机高度 150 m, 初始速度 30 m/s 并沿半径 100 m 的半圆曲线运动, 滚转角速度 $\omega = \frac{\pi}{4}$ rad/s, 地面移动端 20 m/s 做匀速直线运动, 二者运动轨迹如图 3 所示。

图 4 给出了本文模型第一条 NLoS 径的功率和角度参数平滑演进过程。由图可见, 收发端运动使得相对距离发生改变, 从而引起路径时延的变化, 导致路径功率呈现先衰减后增加的趋势。注意到, 3GPP 标准化信道模型在每个准平稳段内功率和角度保持不变, 但段间参数会

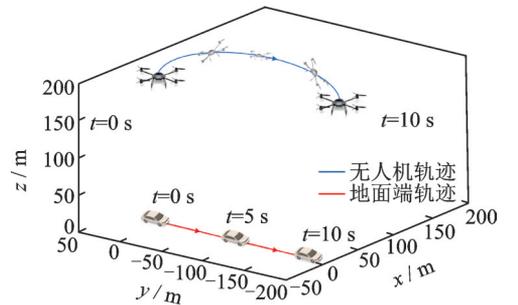


图3 无人机和地面端移动轨迹

Fig.3 Trajectory of two mobile terminals

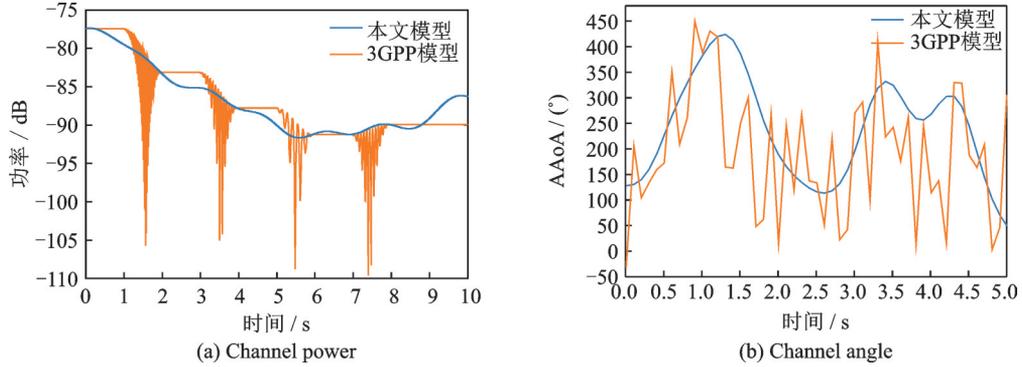


图4 无人机信道参数平滑演进

Fig.4 Smooth evolution of UAV channel parameters

出现剧烈跳变^[21]。本文方法能够保证功率和角度参数随时间的平滑演进,从而使得输出的信道特性具有更好的空时连续性。

无线信道的二阶统计特性能够更为全面地描述信道对通信系统的影响,也是评价信道模型有效性的重要指标。时域自相关函数用于描述天线阵列在不同时刻的信道相关性,也可以体现信道衰落的剧烈程度,根据定义可以得到本文模型的自相关函数为^[22]

$$\rho_{qp}^{LoS}(t; \Delta t) = \frac{K(t)}{K(t)+1} e^{j(\Phi_{qp}^{LoS}(t+\Delta t) - \Phi_{qp}^{LoS}(t))} e^{j2\pi f(\tau^{LoS}(t) - \tau^{LoS}(t+\Delta t))} \quad (29)$$

$$\rho_{qp}^{NLoS}(t; \Delta t) = \frac{P_n(t, \Delta t)}{M(K(t)+1)} E \left\{ \sum_{n=1}^{N(t) \cap N(t+\Delta t)} \sum_{m=1}^M e^{j(\Phi_{qp,n,m}^{NLoS}(t+\Delta t) - \Phi_{qp,n,m}^{NLoS}(t))} e^{j2\pi f(\tau_n^{NLoS}(t) - \tau_n^{NLoS}(t+\Delta t))} \right\} \quad (30)$$

式中 $N(t) \cap N(t + \Delta t)$ 表示 t 时刻与 $t + \Delta t$ 时刻同时存在的路径数目。图5给出了上述仿真场景下本文模型输出信道的自相关特性,图中理论结果可利用式(29,30)数值计算获得。由图可以直接观察到输出信道自相关函数随时间的变化,进一步说明了无人机信道具有非平稳特性。此外,仿真输出值和理论值吻合良好,也验证了本文无人机信道模型的正确性。为了验证无人机姿态变化对信道特性的影响,图6给出了文献[22]中传统模型以及本文模型不同滚转角下的自相关函数。值得注意的是,随着滚转角的增加,自相关函数呈现出规律的变化,当且仅当滚转角为0时(即无翻滚情况),本文模型与传统模型输出结果一致。

为了验证了收发端运动对信道多普勒特性的影响,图7给出了本文模型输出的多普勒功率谱。其

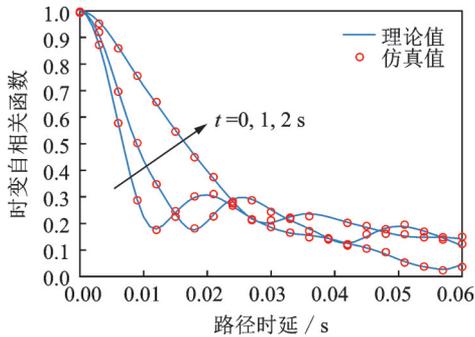


图5 不同时刻的自相关函数

Fig.5 Autocorrelation function at different time

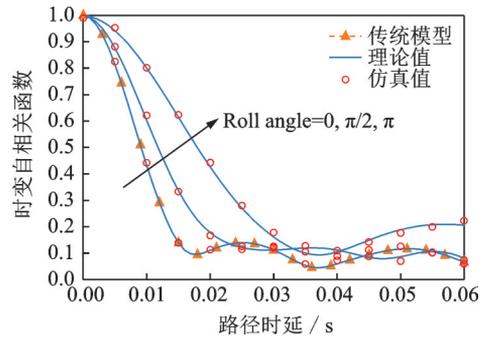


图6 不同滚转角的自相关函数

Fig.6 Autocorrelation function with different roll angles

中,多普勒功率谱为自相关函数的傅里叶变换,可以利用短时傅里叶变换获得

$$S_{qp}(t; f) = \int_{-\infty}^{\infty} \rho_{qp}(t; \Delta t) \cdot e^{-j2\pi f \Delta t} d\Delta t \quad (31)$$

由图可见,仿真过程中多普勒频率范围为 $-400 \sim 400$ Hz。LoS径功率随时间平滑过渡,多普勒频率先负后正,符合无人机沿半圆形轨迹先远离再靠近接收端的变化过程。白色虚线则圈出了NLoS径功率在相邻两个准平稳段之间的生灭现象。

时延功率谱表示不同时延多径分量的功率分布,本文模型输出的时延功率谱如图8所示。随着时间的演进,路径时延不断变化,其中最大路径时延约为 $240 \mu\text{s}$ 。此外,可以观察到各路径功率随时间平滑演进,NLoS径功率的生灭现象如图白色虚线圈所示。值得注意的是,在演进过程中LoS径时延先增大后减小,体现了收发端相对距离的变化趋势与仿真设定的场景吻合。

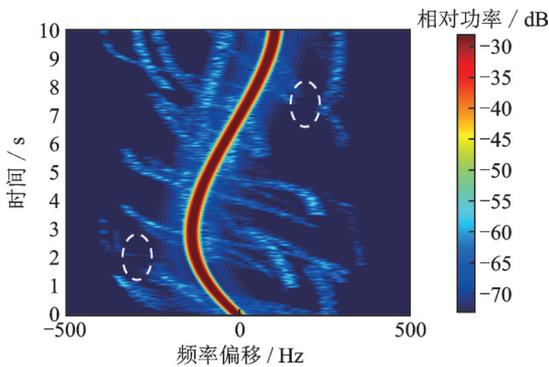


图7 无人机信道的多普勒功率谱

Fig.7 Doppler power spectrum density of UAV channel

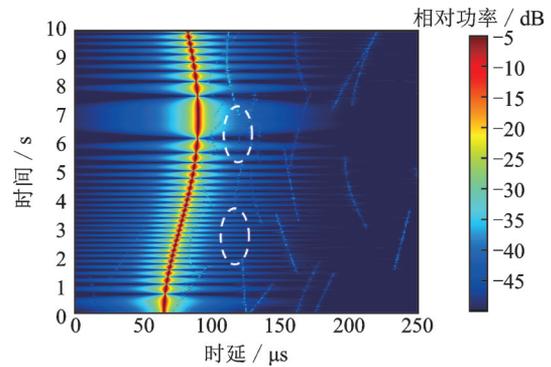


图8 无人机信道的时延功率谱

Fig.8 Power delay profile of UAV channel

4 结束语

本文提出了一种支持三维运动及姿态变化的无人机非平稳信道模型,能够更真实准确地模拟无人机对地的MIMO信道特性。该模型通过结合收发端拓扑关系,考虑路径生灭概率,引入姿态相位矩阵,改进了非平稳信道参数的演进方法,从而改善模型的输出空时连续性。在此基础上,对无人机信道功率和角度等参数以及信道二阶统计特性进行仿真验证分析。仿真结果表明,本文信道参数演进方法可以保证功率和角度等参数的平滑演进,解决传统模型参数的空时不连续问题。此外,输出信道的自相关函数等统计特性进一步体现了无人机信道的非平稳性以及三维姿态的影响。下一步将研究无人机机身遮挡及抖动等因素对信道特性的影响,提升无人机信道模型与真实场景的一致性。

参考文献:

- [1] GUPTA L, JAIN R, VASZKUN G. Survey of important issues in UAV communication networks[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2016, 18(2): 1123-1152.
- [2] LI Bin, FEI Zesong, ZHANG Yan. UAV communications for 5G and beyond: Recent advances and future trends[J]. *IEEE Internet of Things Journal*, 2019, 6(2): 2241-2263.
- [3] KHAWAJA W, GUVENC I, MATOLAK D W, et al. A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles[J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2019, 21(3): 2361-2391.
- [4] ZENG Yong, LYU Jiangbin, ZHANG Rui. Cellular-connected UAV: Potential, challenges, and promising technologies [J]. *IEEE Wireless Communications*, 2019, 26(1): 120-127.
- [5] 朱秋明,华博宇,毛开,等. 无人机毫米波信道建模进展和挑战[J]. *数据采集与处理*, 2020, 35(6): 1049-1059.
ZHU Qiuming, HUA Boyu, MAO Kai, et al. Advances and challenges of UAV millimeter-wave channel modeling[J]. *Journal*

- of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(6): 1049-1059.
- [6] 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.
- [7] CHENG Xiang, LI Yiran. A 3-D geometry-based stochastic model for UAV-MIMO wideband nonstationary channels[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(2): 1654-1662.
- [8] ZHU Qiuming, ZHAO Zikun, MAO Kai, et al. A real-time hardware emulator for 3D non-stationary U2V channels[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Regular Papers, 2021, 68(9): 3951-3964.
- [9] ZHANG Yan, ZHAO Lei, HE Zunwen. A 3-D hybrid dynamic channel model for indoor THz communications[J]. China Communications, 2021, 18(5): 50-65.
- [10] JIANG Hao, ZHANG Zaichen, DANG Jian, et al. A novel 3-D massive MIMO channel model for vehicle-to-vehicle communication environments [J]. IEEE Transactions on Communications, 2017, 66(1): 79-90.
- [11] LI Yan, HE Ruiqi, LIN Siyu, et al. Cluster-based nonstationary channel modeling for vehicle-to-vehicle communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1419-1422.
- [12] MATOLAK D W. Unmanned aerial vehicles: Communications challenges and future aerial networking[C]//Proceeding of ICNC. Garden Grove: IEEE, 2015: 567-572.
- [13] MA Zhangfeng, AI Bo, HE Ruiqi, et al. Impact of UAV rotation on MIMO channel characterization for air-to-ground communication systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(11): 12418-12431.
- [14] CHANG Hengtai, WANG Chengxiang, LIU Yu, et al. A novel nonstationary 6G UAV-to-ground wireless channel model with 3-D arbitrary trajectory changes[J]. IEEE Internet of Things, 2021, 8(12): 9865-9877.
- [15] HUA Boyu, ZHU Qiuming, WANG Chengxiang, et al. Effects of fuselage scattering and posture on UAV channel[C]//Proceeding of CSPS2021. Singapore: Springer, 2021: 1192-1200.
- [16] ZHU Qiuming, LI Hao, FU Yu, et al. A novel 3D non-stationary wireless MIMO channel simulator and hardware emulator [J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(9): 3865-3878.
- [17] BAUM D S, HANSEN J, SALO J, et al. An Interim channel model for beyond-3G systems: Extending the 3GPP spatial channel model (SCM) [C]//Proceeding of IEEE 61st Vehicular Technology Conference. Stockholm: IEEE, 2005: 3132-3136.
- [18] JAECKEL S, RASCHKOWSKI L, BORNER K, et al. Quasi deterministic radio channel generator user manual and documentation[EB/OL]. (2021-07-12). <https://quadriga-channel-model.de>.
- [19] 李树,赵雄文,王琦. 5G毫米波 QuaDRiGa 平台信道仿真与验证研究[J].电波科学学报, 2017, 32(2): 176-183.
LI Shu, ZHAO Xiongwen, WANG Qi. Simulation and validation for 5G millimeter wave channels model through QuaDRiGa platform[J]. Chinese Journal of Radio Science, 2017, 32(2): 176-183.
- [20] WU Shangbin, WANG Chengxiang, AGGOUNE E M, et al. A general 3-D non-stationary 5G wireless channel model[J]. IEEE Transactions on Communications, 2018, 66(7): 3065-3078.
- [21] 3GPP. Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz: ETSI TR 138 901—2018[S]. Nice, France: ETSI, 2020.
- [22] 王亚文,朱秋明,陈小敏,等. 基于几何随机的无人机空地信道模型[J].数据采集与处理, 2020, 35(1): 118-127.
WANG Yawen, ZHU Qiuming, CHEN Xiaomin, et al. Novel geometry-based stochastic model for UAV-based air-to-ground channels[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2020, 35(1): 118-127.

作者简介:



倪浩然(1999-),男,硕士研究生,研究方向:无人机空地信道建模,E-mail: nihaoran@nuaa.edu.cn。



华博宇(1992-),男,实验师,研究方向:信道建模与仿真。



王满喜(1979-),男,研究员,研究方向:通信工程与无线信道建模。



朱秋明(1979-),通信作者,男,教授,研究方向:信道测量与建模、无人机通信,E-mail: zhuqiuming@nuaa.edu.cn。



周彤彤(1998-),女,硕士研究生,研究方向:无线信道建模。



鲍军委(1978-),男,讲师,研究方向:无线通信技术。