

文章编号:1007-5321(2021)05-0061-06

DOI:10.13190/j.jbupt.2021-013

A2G 场景下三维宽带非平稳信道建模与分析

孙晶晶, 张治中, 邓炳光
(重庆邮电大学 通信与信息工程学院, 重庆 400065)

摘要: 提出了一种基于三维几何的适用于宽带非平稳多输入多输出空对地(A2G)信道的随机模型. 该模型使用单个同心圆柱模拟地面端散射体分布情况, 将非视距分量进一步细分为一次散射分量和地面反射分量. 引入时变的角度和时变的速度来模拟无人机到地信道的非平稳性. 推导了空-时-频相关函数和空间多普勒功率谱密度函数. 此外, 还分析了包络电平交叉率和平均衰落持续时间等统计特性. 结果表明, 无人机的飞行方向、高度、仰角等参数对信道统计特性和非平稳性有重要影响. 仿真值与实测数据的较高逼近程度表明所提信道模型的正确性和适用性.

关键词: 无人机; 信道建模; 统计特性分析; 多输入多输出

中图分类号: TN929.5

文献标志码: A

Modeling and Analysis of A2G 3D Wideband Nonstationary Channel

SUN Jing-jing, ZHANG Zhi-zhong, DENG Bing-guang

(School of Communication and Information Engineering, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: A stochastic model based on three-dimensional geometry for wideband non-stationary multi-input multi-output air to ground (A2G) channel is proposed. The model uses a single concentric cylindrical to simulate the distribution of the ground end scatterers, and further subdivides the non-line-of-sight component into the single-bounce scattering component and the ground reflection component. Time-varying angle and time-varying speed are introduced to simulate the non-stationarity of A2G channel. The space-time-frequency correlation function and space Doppler power spectral density function are derived. In addition, statistical characteristics such as envelope level crossing rate and average fading duration are also analyzed. The results show that the flight direction, altitude, elevation angle and other parameters of unmanned aerial vehicle can significantly affect the channel statistics and non-stationarity. The simulated values and the measured data match well, which indicates the correctness and applicability of the proposed channel model.

Key words: unmanned aerial vehicle; channel model; statistical characteristic analysis; multi-input multi-output

近年来,空对地(A2G, air to ground)通信作为第5代移动通信系统(5G, the fifth generation of mobile communications system)中智能交通系统最重要的部

分之一,已经引起学术界和工业界的极大关注^[1]. 与传统的无线通信相比,A2G通信具有一些独特的传播特性,如无人机(UAV, unmanned aerial vehicle)可以

收稿日期: 2021-01-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB2100200)

作者简介: 孙晶晶(1996—),女,硕士生.

通信作者: 张治中(1972—),男,教授, E-mail: zhangzz@nuist.edu.cn.

在三维(3D, three dimensional)空间中任意运动,在建模过程中要考虑 UAV 的仰角和飞行高度对信道统计特性的影响^[2]. 同时,UAV 的快速运动导致多普勒频率快速变化,信道的非平稳性显著增强. 因此,为 A2G 通信环境提供一个准确可靠的信道模型对研究信道的统计特性具有重要意义.

现有文献中的 UAV 信道模型可以分为确定性模型和随机模型. 确定性模型由于需要具有特定轨迹的详细数字地图,导致高度的复杂性和有限的通用性. 随机模型中的几何随机模型(GBSMs, geometry-based stochastic models)能够很好地捕获信道的几何特征,并且在复杂性、通用性和准确性之间有很好的平衡^[3]. Zeng 等^[3]首次将 GBSMs 引入到 A2G 信道建模中,提出了一种 3D 单圆柱多输入多输出(MIMO, multi-input multi-output)信道模型. Cheng 等^[4]提出了基于双圆柱的通用窄带 UAV 信道模型,首次在双圆柱模型中考虑了地面反射(GR, ground reflection)分量,但该模型是窄带模型,没有考虑多径引起的时延. Cheng 等^[5]提出了 A2G 场景下的 3D 圆柱宽带非平稳信道模型,但是该模型假设 UAV 端和地面终端的速度都是恒定的,不符合真实场景. Jia 等^[6]提出了 A2G 场景下的单球窄带模型,并研究了信道的时变统计特性. Jiang 等^[7]考虑了 UAV 和地面终端的 3D 任意轨迹和 3D 天线阵列,提出了一种 3D 半球非平稳信道模型. 但是以上的半球和单球模型只能适用于特定场景,缺乏通用性. Jiang 等^[8]提出了基于椭圆柱的 3D 非平稳 UAV 信道模型,但是模型的计算复杂度较高.

针对以上问题,提出了一种新的基于 3D 几何的宽带非平稳 A2G 信道模型. 所提模型适用于农村、郊区和平原等建筑物密度较低,无人机飞行高度高于建筑物的地区来提供无线覆盖. 可用在由于自然灾害(如地震、洪涝)导致的基础设施部分或全部损坏后的快速恢复. 所提模型将信号分为视距(LoS, line-of-sight)分量和非视距分量,并将后者细分为一次散射(SB, single-bounce ray)分量和 GR 分量,并引入了时变角度和时变速度来模拟信道的非平稳性. 除了推导一些常规的统计特性,还推导了 2 个重要的二阶统计属性. 仿真分析了无人机相关参数对信道的统计特性和非平稳性的影响.

1 系统模型

提出的模型如图 1 所示. 在农村和郊区环境

中,UAV 飞得比较高,假设 UAV 周围没有散射体,地面终端周围有散射体. 地面终端周围的散射体分布在一个半径 R 可变的同心圆柱环内,其中 $R_{\min} \leq R \leq R_{\max}$, R 的分布是 $f(R) = 2R/(R_{\max}^2 - R_{\min}^2)$. 该同心圆柱环由 L 个不同半径的同心圆柱叠加,第 l 个圆柱的半径为 R_l ,SB 分量发生在同心圆柱环的圆柱表面上. 假设地面终端周围有 N_1 个有效散射体分布在同心圆柱环内,在第 l 个圆柱表面有 $N(l)$ 个有效散射体,第 l 个圆柱表面的第 n 个有效散射体用 $s_{(n,l)}$ 表示. 地面反射发生在同心圆柱环的底面上,在同心圆柱环的底面上分布 N_2 个有效散射体,第 m 个有效散射体用 $s_{(m,l)}$ 表示. UAV 和地面终端之间的垂直和水平距离分别表示为 H 和 D ,满足 $D \gg R$; 地面终端的高度为 H_0 . 参数 M^t 和 M^r 表示 UAV 端(发送端)和地面终端(接收端)的天线数目,大小为 2×2 . 参数 δ^t 和 δ^r 分别为 UAV 端和地面终端的天线间隔. UAV 端和地面终端的天线阵列与 x 轴之间的夹角分别为 θ^t 和 θ^r ,为了简单起见,不考虑天线阵列的仰角. UAV 和地面终端的速度分别为 $v^t = v_0^t + a^t t$ 和 $v^r = v_0^r + a^r t$. 将向量 v^t 分解为 xOy 平面上的投影 v_{xOy}^t 和 z 轴上的投影 v_z^t ,定义 $[v_{xOy}^t, v^t] = \xi$, $[v_{xOy}^t, x] = \gamma^t$,其中 $[\cdot, \cdot]$ 表示两条射线间的夹角. 角度对 ξ 和 γ^t 表示 UAV 在 3D 空间中的 3D 运动. 地面终端在 xOy 平面中沿 γ^r 方向运动. SB 分量中,从有效散射体 $s_{(n,l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 出发,到达地面终端的角度定义为到达角,到达角的方位角和仰角分别表示为 $\alpha_{(n,l)}^t$ 和 $\beta_{(n,l)}^t$. 从 UAV 出发,撞击在有效散射体 $s_{(n,l)}$ ($l=1, 2, \dots, L$) 上的角度定义为离开角,离开角的方位角和仰角分别表示为 $\alpha_{(n,l)}^r$ 和 $\beta_{(n,l)}^r$. 同理,GR 分量的离开角和到达角分别表示为

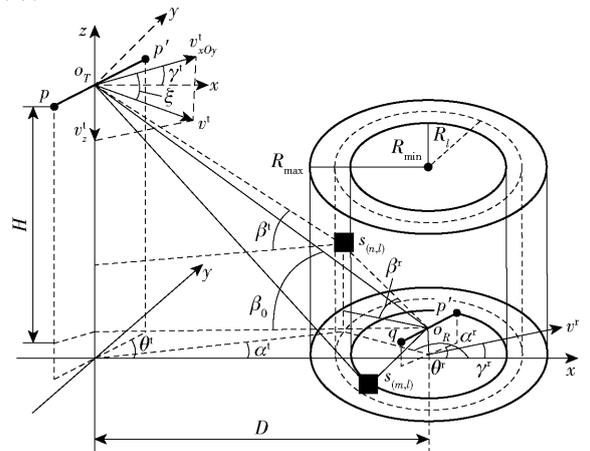


图1 宽带非平稳信道的3D模型

$\alpha_{(m,l)}^l, \beta_{(m,l)}^l$ 和 $\alpha_{(m,l)}^r, \beta_{(m,n)}^r$; LoS 分量的离开角和到达角分别表示为 $\alpha_{\text{LoS}}^l, \beta_{\text{LoS}}^l$ 和 $\alpha_{\text{LoS}}^r, \beta_{\text{LoS}}^r$.

所提模型的物理特性可以用矩阵形式表示为 $\mathbf{H}(t, \tau) = [h^{p-q}(t, \tau)]_{M^l \times M^r}$, 其中 $h^{p-q}(t, \tau)$ 为 UAV 端第 p ($p = 1, 2, \dots, M^l$) 根天线与地面终端的第 q ($q = 1, 2, \dots, M^r$) 根天线之间的复冲激响应. 记为

$$h^{p-q}(t, \tau) = h_{\text{LoS}}^{p-q}(t, \tau) + h_{\text{SB}}^{p-q}(t, \tau) + h_{\text{GR}}^{p-q}(t, \tau) \quad (1)$$

$$h_{\text{LoS}}^{p-q}(t, \tau) = \sqrt{\frac{K\Omega^{p-q}}{K+1}} e^{-j2\pi d(p,q)/\lambda} \times e^{j2\pi f_{\text{D,LoS}}(\tau - \tau_{\text{LoS}})} \quad (2)$$

$$h_{\text{SB}}^{p-q}(t, \tau) = \sqrt{\frac{\eta_{\text{SB}}\Omega^{p-q}}{K+1}} \lim_{N_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N_1}} \sum_{l=1}^L \sum_{n=1}^{N(l)} e^{j\phi(n,l)} \times e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(p,s_{(n,l)},q)} e^{j2\pi f_{\text{D,(n,l)}}(\tau - \tau_{(n,l)})} \quad (3)$$

$$h_{\text{GR}}^{p-q}(t, \tau) = \sqrt{\frac{\eta_{\text{GR}}\Omega^{p-q}}{K+1}} \lim_{N_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N_2}} \sum_{l=1}^L \sum_{m=1}^{N(l)} e^{j\phi(m,l)} \times e^{-j\frac{2\pi}{\lambda}d(p,s_{(m,l)},q)} e^{j2\pi f_{\text{D,(m,l)}}(\tau - \tau_{(m,l)})} \quad (4)$$

其中: η_{SB} 和 η_{GR} 分别为 SB 分量和 GR 分量与总散射体功率的比率, 并满足 $\eta_{\text{SB}} + \eta_{\text{GR}} = 1$; K 和 Ω^{p-q} 分别为莱斯系数和 $p-q$ 链路的接收信号总功率; λ 为载波波长; $d(p, q)$ 为 UAV 端第 p 根天线到地面终端第 q 根天线之间的距离; $d(p, s_{(n,l)}, q)$ 为 UAV 端第 p 根天线经过有效散射体 $s_{(n,l)}$ 到地面终端第 q 根天线之间的距离; 相位 $\phi(n, l)$ 和 $\phi(m, l)$ 是独立的随机变量, 均匀分布在 $[-\pi, \pi]$ 之间; $\delta(\cdot)$ 为单位冲激函数; τ 为时间间隔; $\tau_{\text{LoS}}, \tau_{(n,l)}, \tau_{(m,l)}$ 分别为 LoS 分量, SB 分量和 GR 分量的传播时延; $f_{\text{D,LoS}}, f_{\text{D,(n,l)}}$ 和 $f_{\text{D,(m,l)}}$ 为收发端相对运动引起的多普勒项, 表示为

$$f_{\text{D},i} = \frac{v^l}{\lambda} (\cos(\alpha_i^l - \gamma^l) \cos \beta_i^l \cos \xi + \sin \beta_i^l \sin \xi) + \frac{v^r}{\lambda} (\cos(\alpha_i^r - \gamma^r) \cos \beta_i^r) \quad (5)$$

其中 $i \in \{\text{LoS}, (n, l), (m, l)\}$. 收发天线与散射体之间的距离可由空间距离公式求得:

$$d(p, s_{(n,l)}) \approx$$

$$\sqrt{(D_{x,(p,s_{(n,l)})})^2 + (D_{y,(p,s_{(n,l)})})^2 + (D_{z,(p,s_{(n,l)})})^2} \quad (6)$$

$$d(s_{(n,l)}, q) \approx$$

$$\sqrt{(D_{x,(s_{(n,l)},q)})^2 + (D_{y,(s_{(n,l)},q)})^2 + (D_{z,(s_{(n,l)},q)})^2} \quad (7)$$

其中: $D_{x,(p,s_{(n,l)})}, D_{y,(p,s_{(n,l)})}, D_{z,(p,s_{(n,l)})}$ 分别为第 p 根天线与有效散射体 $s_{(n,l)}$ 之间的距离在 3D 坐标中的 x, y, z

分量, 记 $D_{x,(p,s_{(n,l)})} = D + R_l \cos \alpha_{(n,l)}^r - \Delta T \cos \theta^l$, $D_{y,(p,s_{(n,l)})} = R_l \sin \alpha_{(n,l)}^r - \Delta T \sin \theta^l$, $D_{z,(p,s_{(n,l)})} = D \tan \beta_0 - R_l \tan \beta_{(n,l)}^r$, β_0 为 UAV 端与地面终端之间的仰角; 同理, $D_{x,(s_{(n,l)},q)}, D_{y,(s_{(n,l)},q)}, D_{z,(s_{(n,l)},q)}$ 可表示为 $D_{x,(s_{(n,l)},q)} = R_l \cos \alpha_{(n,l)}^r - \Delta R \cos \theta^r$, $D_{y,(s_{(n,l)},q)} = R_l \sin \alpha_{(n,l)}^r - \Delta R \sin \theta^r$, $D_{z,(s_{(n,l)},q)} = R_l \tan \beta_{(n,l)}^r$; ΔT 为 UAV 端的第 p 根天线与 UAV 端天线阵列中心的距离; ΔR 为地面终端的第 q 根天线与其天线阵列中心的距离, 其公式为

$$\Delta T = (M^l + 1 - 2p) \delta^l / 2 \quad (8)$$

$$\Delta R = (M^r + 1 - 2q) \delta^r / 2 \quad (9)$$

另外, 宽带信道的传播时延为

$$\tau_{\text{LoS}} = D / (c \cdot \cos \beta_0) \quad (10)$$

$$\tau_{(n,l)} = d(p, s_{(n,l)}, q) / c \quad (11)$$

$$\tau_{(m,l)} = d(p, s_{(m,l)}, q) / c \quad (12)$$

为了捕获非平稳性对信道统计特性的影响, 所提模型考虑用时变的角度参数和时变的 UAV 和地面终端的运动速度来描述信道的非平稳性. 时变角度的推导如下.

假设初始时刻 UAV 端天线阵列中心和地面终端天线阵列中心在 xOy 平面上的初始位置分别为 $(0, 0)$ 和 $(D, 0)$, 那么在 t 时刻, 它们的位置分别为 $(v^l t \cos \xi \cos \gamma^l, v^l t \cos \xi \sin \gamma^l)$, $(D + v^r t \cos \gamma^r, v^r t \sin \gamma^r)$. 基于几何关系和余弦定理, 时变到达角与初始到达角的关系可以进行如下推导^[5].

对于 SB 分量和 GR 分量, 有:

$$\alpha_i^r(t) = \pi + \gamma^r - \arcsin \left(\frac{R_l \sin(\alpha_i^r - \gamma^r)}{Y_1} \right) \quad (13)$$

$$\beta_i^r(t) = \arctan \left(\frac{R_l \tan \beta_i^r}{Y_1} \right) \quad (14)$$

其中 $Y_1 = \sqrt{(R_l)^2 + (v^l t)^2 - 2R_l v^l t \cos(\alpha_i^r - \gamma^r)}$, $i \in \{(n, l), (m, l)\}$.

根据到达角与离开角之间的几何关系, 可以由时变到达角推导出时变离开角.

对于 SB 分量和 GR 分量, 有:

$$\cos \alpha_i^l(t) \approx 1 \quad (15)$$

$$\sin \alpha_i^l(t) \approx \frac{R_l \sin \alpha_i^r(t)}{D + R_l \cos \alpha_i^r(t)} \quad (16)$$

其中 $i \in \{(n, l), (m, l)\}$.

在 SB 分量中, 有:

$$\cos \beta_{(n,l)}^l(t) \approx \cos \beta_0 + \frac{R_l \sin \beta_0 \cos \beta_0 A}{D} \quad (17)$$

$$\sin \beta_{(n,l)}^l(t) \approx \sin \beta_0 - \frac{R_l \cos^2 \beta_0 A}{D} \quad (18)$$

其中 $A = \tan \beta_{(n,l)}^r(t) \cos \beta_0 + \cos \alpha_{(n,l)}^r(t) \sin \beta_0$.

在 GR 分量中,有:

$$\cos \beta_{(m,l)}^l(t) \approx \cos \beta_0 - \frac{R_l \sin \beta_0 \cos \beta_0 B}{D} \quad (19)$$

$$\sin \beta_{(m,l)}^l(t) \approx \sin \beta_0 + \frac{R_l \cos^2 \beta_0 B}{D} \quad (20)$$

其中 $B = \tan \beta_{(m,l)}^r(t) \cos \beta_0 - \cos \alpha_{(m,l)}^r(t) \sin \beta_0$.

对于 LoS 分量,有:

$$\alpha_{\text{LoS}}^l(t) \approx 0, \alpha_{\text{LoS}}^r(t) \approx \pi, \beta_{\text{LoS}}^l(t) \approx \beta_{\text{LoS}}^r(t) \approx \beta_0 \quad (21)$$

所提模型中,有效散射体的数量是有限的. 因此,可以用连续随机变量形式 $\alpha^l, \beta^l, \alpha^r, \beta^r$ 代替离散随机变量形式 $\alpha_i^l, \beta_i^l, \alpha_i^r, \beta_i^r, i \in \{(n,l), (m,l)\}$ 来表示离开角和到达角. 方位角用冯·米塞斯分布来表征:

$$f(\alpha) = \frac{e^{k \cos(\alpha - \alpha_\mu)}}{2 \pi I_0(k)}, -\pi \leq \alpha \leq \pi \quad (22)$$

其中: $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正的贝塞尔函数, $\alpha_\mu \in [-\pi, \pi]$ 是角度 α 的平均值, 参数 k 用来控制平均角度的扩展. 仰角服从余弦分布:

$$f(\beta) = \frac{\pi}{4\beta_m} \cos\left(\frac{\pi}{2} \frac{\beta - \beta_\mu}{\beta_m}\right) \quad (23)$$

其中: $\beta \in [\beta_\mu - \beta_m, \beta_\mu + \beta_m]$, 且 $|\beta - \beta_\mu| \leq \beta_m \leq \pi/2$. 参数 β_μ 和 β_m 分别为角度 β 的平均角和方差.

2 统计特性分析

2.1 空-时-频相关函数

空-时-频相关函数可以用信道冲激响应函数的傅里叶变换来表示. 信道冲激响应函数的傅里叶变换为 $H^{p-q}(t, f) = F[h^{p-q}(t, \tau)]$. 链路 $p-q$ 和 $p'-q'$ 之间的归一化相关函数表示为

$$\frac{R^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) = E\{[H^{p-q}(t, f)]^* H^{p'-q'}(t + \Delta t, f + \Delta f)\}}{\sqrt{\Omega^{p-q} \Omega^{p'-q'}}} \quad (24)$$

其中: $E\{\cdot\}$ 和 $[\cdot]^*$ 分别为期望和共轭操作, Δf 为频率间隔. 将式(24)代入式(1)可以得到:

$$\begin{aligned} R^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) &= R_{\text{LoS}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) + \\ &R_{\text{SB}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) + R_{\text{GR}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) \end{aligned} \quad (25)$$

经过整理,公式可进一步推导为

$$R_{\text{LoS}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) =$$

$$\frac{K}{K+1} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[d(p', q') - d(p, q)]} e^{j2\pi \Delta f D, \text{LoS}(t)} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{SB}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) &= \frac{\eta_{\text{SB}}}{K+1} \times \\ &\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j2\pi \Delta f D, (n,l)(t)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[d(p', s(n,l), q') - d(p, s(n,l), q)]} \times \\ &e^{-j2\pi \Delta f \tau(n,l)} f(\alpha^r) f(\beta^r) f(R) d\alpha^r d\beta^r dR \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} R_{\text{GR}}^{p-q, p'-q'}(\delta^l, \delta^r, \Delta t, \Delta f, t) &= \frac{\eta_{\text{GR}}}{K+1} \times \\ &\int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} e^{j2\pi \Delta f D, (m,l)(t)} e^{j\frac{2\pi}{\lambda}[d(p', s(m,l), q') - d(p, s(m,l), q)]} \times \\ &e^{-j2\pi \Delta f \tau(m,l)} f(\alpha^r) f(R) d\alpha^r dR \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} f_{D,i}(t) &= \frac{v^l}{\lambda} [\cos(\alpha_i^l(t) - \gamma^l) \cos \beta_i^l(t) \cos \xi + \sin \beta_i^l(t) \times \\ &\sin \xi] + \frac{v^r}{\lambda} \cos(\alpha_i^r(t) - \gamma^r) \cos \beta_i^r(t) \end{aligned} \quad (29)$$

其中 $i \in \{\text{LoS}, (n,l), (m,l)\}$.

2.2 空间多普勒功率谱密度

所提模型的多普勒功率谱密度定义为空-时-频相关函数的傅里叶变换. 表达式为

$$S^{p-q, p'-q'}(f_D) = \int_{-\infty}^{+\infty} R^{p-q, p'-q'}(\Delta t, \Delta f = 0) e^{-j2\pi f_D \tau} d\tau \quad (30)$$

其中 f_D 为多普勒频率.

2.3 电平交叉率和平均衰落持续时间

包络电平交叉率 (LCR, level crossing rate) 定义为衰落信号包络在单位时间内以正负斜率超过给定阈值电平 r 的速率^[9]:

$$\begin{aligned} L(r) &= \frac{2r \sqrt{K+1}}{\pi^{3/2}} \frac{\sqrt{b_2 - b_1^2}}{\sqrt{b_0 - b_0^2}} e^{-K - (K+1)r^2} \times \\ &\int_0^{\pi/2} \cosh(2 \sqrt{K(K+1)} r \cos \theta) \times \\ &[e^{-\chi \sin \theta} + \sqrt{\pi} \chi \sin \theta \text{erf}(\chi \sin \theta)] d\theta \end{aligned} \quad (31)$$

其中 $\cosh(\cdot)$ 和 $\text{erf}(\cdot)$ 分别为双曲余弦函数和误差函数. $\chi = \sqrt{K b_1^2 / (b_0 b_2 - b_1^2)}$, 参数 b_u 为

$$b_u = b_{u, \text{SB}} + b_{u, \text{GR}}, \quad u = 0, 1, 2 \quad (32)$$

$$b_{u, \text{SB}} = \frac{\eta_{\text{SB}}}{2(K+1)} (2\pi)^u \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{\beta_1}^{\beta_2} \int_{-\pi}^{\pi} (f_{D, (n,l)}(t))^u \times f(\alpha^r) f(\beta^r) f(R) d\alpha^r d\beta^r dR \quad (33)$$

$$b_{u, \text{GR}} = \frac{\eta_{\text{GR}}}{2(K+1)} (2\pi)^u \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} \int_{-\pi}^{\pi} (f_{D, (m,l)}(t))^u \times f(\alpha^r) f(R) d\alpha^r dR \quad (34)$$

平均衰落持续时间 (AFD, average fading duration) 定义为衰落信号包络低于给定阈值的平均

持续时间^[10]. 平均衰落时间的表达式为

$$T(r) = \frac{1 - Q(\sqrt{2K}, \sqrt{2(K+1)r^2})}{L(r)} \quad (35)$$

其中: $Q(\cdot, \cdot)$ 为马坎 Q 函数.

3 数值结果与仿真

本节对上节所描述的统计特性进行仿真, 研究了 UAV 的飞行方向、飞行速度以及飞行高度对信道统计特性和信道非平稳性的影响. 部分仿真参数设置如下: $H_0 = 5 \text{ m}$, $D = 1000 \text{ m}$, $R_{\min} = 1 \text{ m}$, $R_{\max} = 20 \text{ m}$, $v^l = 10 + 3t$, $v^r = 0.1 + 0.2t$, $\alpha_\mu = 0$, $\beta_\mu = \pi/4$, $\beta_m = \pi/6$, $\xi = \pi/4$, $\gamma^l = \pi/4$, $\gamma^r = \pi/3$, $\theta^l = \theta^r = \pi/2$, $K = 0.01$, $k = 3$, $\eta_{\text{SB}} = 0.6$, $\eta_{\text{CR}} = 0.4$, $\lambda = 0.1 \text{ m}$, 有效散射体数目 $N_1 = N_2 = 40$, 仿真次数为 50 次.

图 2 所示为不同 UAV 飞行方向和不同时刻的时间相关函数, 即 $R^{p-q, p'-q'}$ ($\delta^l = 0, \delta^r = 0, \Delta t, \Delta f = 0, t$), UAV 仰角设置为 $\beta_0 = \pi/6$. 由图 2 可知, 当 UAV 飞行方向与视距方向一致, 即 $\xi = \beta_0, \gamma^l = 0$ 时, 时间相关性最高. 这是因为沿着视距方向移动时, 电波传播时受到的干扰最小, 此时信道比较平稳, 相关性高. 当 t 增加时, UAV 和地面终端的速度都变大, 信道的非平稳性增加, 相关性减小.

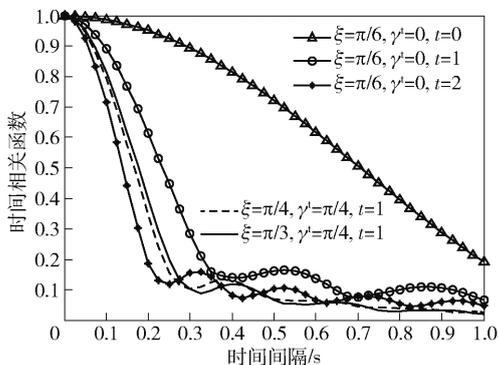


图 2 不同 UAV 飞行方向和不同时刻的时间相关函数

图 3 所示为不同 UAV 仰角下的空间相关函数, 即 $R^{p-q, p'-q'}$ ($\delta^l, \delta^r = 0, \Delta t = 0, \Delta f = 0, t$). 由图 3 可知, 空间相关性随着 UAV 仰角 β_0 的增大而增大. 这是因为 $d = D/\cos\beta_0$, d 为 UAV 与地面终端之间的距离, 当 β_0 增大时, d 增大, UAV 端的天线间隔对空间相关性的影响变小, 空间相关性变高.

图 4 所示为不同 UAV 飞行方向和不同时刻下的空间多普勒功率谱密度曲线, UAV 仰角 $\beta_0 = \pi/6$. 由图 4 可知, 在同一个 UAV 飞行方向下, 随着 t 增加, 多普勒功率谱密度曲线变平滑; 当 $t = 0$ 时, 多

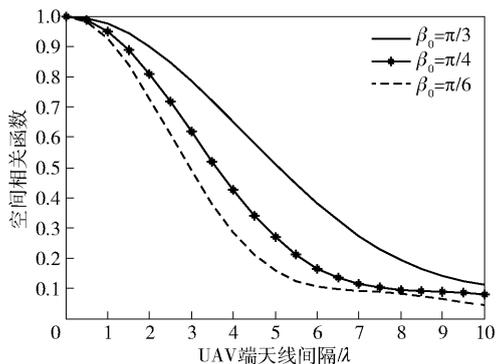


图 3 不同 UAV 仰角 β_0 下的 UAV 端的空间相关函数

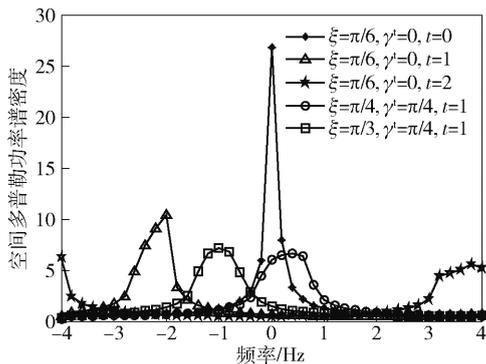
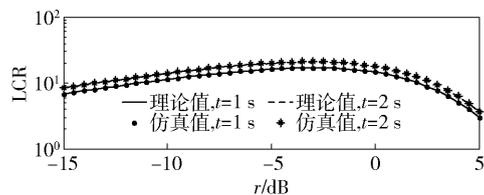


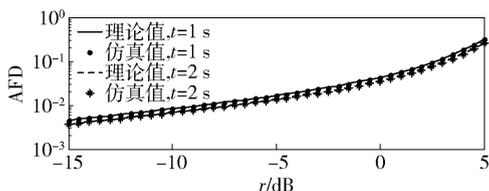
图 4 多普勒功率谱密度

普勒功率谱密度曲线最集中最尖锐. 同一时刻, 当 UAV 沿视距方向飞行时, 空间多普勒功率谱密度曲线最高. 因为当 UAV 沿视距方向移动时, 有效散射体分布最集中, 在某些频率下的接收功率最集中.

图 5 所示为所提模型在 $t = 1 \text{ s}$ 和 $t = 2 \text{ s}$ 的二阶统计特性 LCR 和 AFD 的仿真值与理论值对比. 仿真值与理论值的一致性表明了推导的正确性. 同时, LCR 和 AFD 随时间变化的趋势也体现了 A2G



(a) 不同时刻下的 LCR 的理论值和仿真值对比

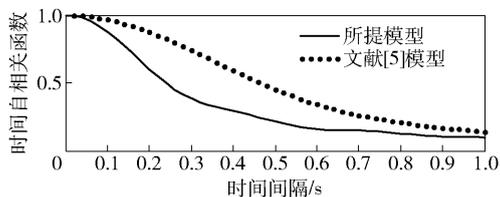


(b) 不同时刻下的 AFD 的理论值和仿真值对比

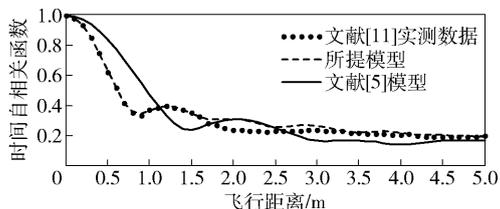
图 5 不同时刻下的 LCR 和 AFD 理论值与仿真值对比

信道的非平稳性.

为了验证所提模型的优越性,将所提模型与文献[5]模型进行时间自相关函数对比,如图6(a)所示.部分仿真参数设置为: $\beta_0 = \pi/6, \gamma^l = 0, \gamma^r = \pi/3, \xi = 0, \beta_\mu = \pi/6, \alpha_\mu = \pi/4, \beta_m = \pi/6$.由图可知,与文献[5]模型相比,所提模型的时间自相关函数更低,说明所提模型采用时变的收发端运动速度能更好的体现信道的非平稳性.为了进一步验证所提模型的正确性,对比了文献[11]中的实测数据、所提模型和文献[5]模型的时间自相关函数在不同飞行距离下的曲线如图6(b)所示.部分仿真参数设置为: $v^l = 1.5 \text{ m/s}, \beta_0 = \pi/30, \gamma^l = \pi/11, \xi = 0, \gamma^r = 0, \alpha_\mu = \pi/6, \beta_\mu = \pi/10, \beta_m = \pi/10, k = 0.5, K = 0.15, \lambda = 0.15 \text{ m}, R_{\max} = 100 \text{ m}$.由图可知,与文献[5]模型相比,所提模型的曲线更加逼近实测数据曲线,表明所提模型是能够正确反映信道特性的.



(a) 所提模型与对比模型在不同时间间隔下的对比



(b) 所提模型与对比模型在不同飞行距离下的对比

图6 所提模型与其他模型的对比

4 结束语

提出了一种用于 A2G 宽带非平稳信道的 3D 单圆柱环模型.仿真分析了 UAV 相关参数(如 UAV 的飞行方向等)对信道统计特性和信道非平稳性的影响.结果表明当无人机飞行方向与视距一致、飞行高度越高、速度越小、仰角越大时,信道越平稳.这些发现总结了一些规律来控制 UAV 的运动,使得 UAV 的运动更加平稳或者非平稳.最后,所提模型与其他模型以及实测数据的对比,验证了所提模型的优越性和正确性.

参考文献:

- [1] 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 and Tutorials, 2019, 21(3): 2361-2391.
- [2] Khuwaja A A, Chen Yunfei, Zhao Nan, et al. A survey of channel modeling for UAV communications [J]. IEEE Communications Surveys and Tutorials, 2018, 20(4): 2804-2821.
- [3] Zeng Linzhou, Cheng Xiang, Wang Chengxiang, et al. A 3D geometry-based stochastic channel model for UAV-MIMO channels[C]//IEEE Wireless Communications and Networking Conference. San Francisco: IEEE Press, 2017: 1-5.
- [4] Cheng Xiang, Li Yiran, Wang Chengxiang, et al. A 3-D geometry-based stochastic model for unmanned aerial vehicle MIMO rician fading channels [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2020, 7(9): 8674-8687.
- [5] 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.
- [6] Jia Rubing, Li Yiran, Cheng Xiang, et al. 3D geometry-based UAV-MIMO channel modeling and simulation[J]. China Communications, 2018, 15(12): 64-74.
- [7] Jiang Kaili, Chen Xiaomin, Zhu Qiuming, et al. A geometry-based 3D non-stationary UAV-MIMO channel model allowing 3D arbitrary trajectories[C]//International Conference on Wireless Communications and Signal Processing. Hangzhou: IEEE Press, 2018: 1-6.
- [8] Jiang Hao, Zhang Zaichen, Wu Liang, et al. Three-dimensional geometry-based UAV-MIMO channel modeling for A2G communication environments[J]. IEEE Communications Letters, 2018, 22(7): 1438-1441.
- [9] Ma Zhangfeng, Ai Bo, He Ruisi, et al. A wideband non-stationary air-to-air channel model for UAV communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(2): 1214-1226.
- [10] Zhu Qiuming, Cheng Neng, Cheng Xiaomin, et al. Envelope level crossing rate and average fade duration of a generic 3D non-stationary UAV channel model[J]. IEEE Access, 2020, 8: 143134-143143.
- [11] Simunek M, Fontón 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.