

基于 MC 法的低空无线信道模型可信性验证

陈 强, 杨霄鹏, 杨 栋

(空军工程大学电讯工程学院, 西安 710077)

摘 要: 分析低空无线信道的多径时延、多普勒效应等传输特性, 利用广义平稳非相关散射模型, 根据信道在停车场、航行、近场、过顶 4 种不同场景下的特性, 分别建立相应的信道模型。采用蒙特卡罗法对模型的可信性进行验证, 结果表明, 该信道模型能真实地反映低空无线信道的特性。

关键词: 低空空域; 信道模型; 蒙特卡罗法; 广义平稳非相关散射; 多径分量

Credibility Validation of Low-altitude Wireless Channel Model Based on Monte Carlo Method

CHEN Qiang, YANG Xiao-peng, YANG Dong

(Institute of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

【Abstract】 This paper analyzes the multipath delay, Doppler effect and other transmission characteristics of the low-altitude wireless channel, uses Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering(WSSUS) model, according to the four different scenarios of parking, en-routing, arriving and over the top models are respectively set up. Simulation experiment of this model is carried out by using the Monte Carlo(MC) method, and results show that the channel model to build a true reflection of the characteristics of low-altitude wireless channel.

【Key words】 low-altitude airspace; channel model; Monte Carlo(MC) method; Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering(WSSUS); multipath component

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3428.2012.09.021

1 概述

低空空域是指真高 1 000 m 以下的空域。随着军用、民用航空的飞速发展, 航空通信已逐渐向宽带、多媒体、大容量等方向发展, 特别是国家通用航空新举措^[1]的出台, 既是对通用航空业的有力促进, 也对如何保障低空空域航空通信提出了更高的要求。为此, 急需开展低空无线信道多径时延、多普勒频移等传输特性的研究, 并在此基础上, 研究适合低空无线信道的宽带调制解调、信道均衡等关键技术。

目前, 在相关文献中报道了有关航空信道建模的大量工作。文献[2]对航空信道特性进行分析, 文献[3]对飞机的航空信道仿真进行研究, 文献[4]针对无人机在途中飞行、任务区域盘旋和起飞/降落 3 种不同飞行状态, 提出了相应的信道统计模型, 文献[5]在临近空间进行了移动通信信道模型研究, 但上述文献仅仅给出了模型的简单数学公式, 对于不同场景下模型建立的正确与否都没有验证。基于此, 本文对低空空域各种飞行场景下的无线信道进行分析研究, 建立相应的数学模型, 并验证了模型的可信性。

2 低空无线信道的建立

信道是无线通信的传输媒体, 所有信息都在这个信道中传输。信道模型对于研究一个无线信道的调制、均衡以及编码性能也是非常重要的^[6]。因此, 为了高质量、高可靠性地实施无线传输, 就必须清楚地了解信道的特性。

低空无线信道示意图如图 1 所示, 当飞行器低空飞行时, 通常地面台站与空中飞行器之间视距仰角较低, 由于地物反射, 会形成多径时延扩展较大的多径效应, 尽管仍然存在直射(Line of Sight, LOS)路径^[7], 但是多径成分将大大增

加。同时, 由于空中飞行器运动速度较快, 还会产生较强的多普勒效应。因此, 相比中高空航空无线通信, 低空无线信道在时域、频域都将经历更复杂、严重的衰落。

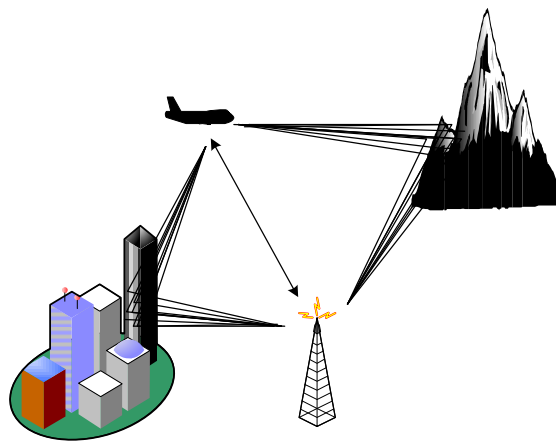


图 1 低空无线信道示意图

2.1 低空信道描述

对于低空空域航空通信, 充分借鉴地面移动通信信道研究成果以及有关航空通信信道的测量结果, 可以将其分为停

基金项目: 陕西省电子信息系统集成重点实验室基金资助项目(201104Y06)

作者简介: 陈 强(1987—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 航空通信, 信号处理; 杨霄鹏, 副教授; 杨 栋, 硕士研究生

收稿日期: 2011-08-01 **E-mail:** sdchairman@163.com

场、航行、近场、过顶等场景,此时通信信道特点各有不同。

一般地,可以把飞行器在停机坪、机库内或者在以较缓慢的速度下滑行,甚至是当飞行器的飞行高度较低,周围建筑物密集的情况下,没有视距传播成分,信道全部由散射成分组成的情形定义为停车场场景,此时信道场景可对应于 COST207 的城市模型,是一种典型的瑞利信道。当飞行器处于途中飞行状态,通信发生在飞行器与飞行器、飞行器与地面之间,即所谓的空-空、空-地通信,存在视距传播成分和散射成分,是一种莱斯信道。在近场时,飞行器与地面用户距离较近,周围环境较为开阔,存在视距传播成分,是一种莱斯信道。过顶飞行状态是指飞行器飞过航空或地面用户上方的状态,此时,由于仰角高、多径分量很少且很弱,可以认为只有一个视距传播分量。

2.2 低空信道的多普勒频移和多径时延

2.2.1 停车场状态

在停车场状态下,飞行器与地面塔台之间不存在视距路径,莱斯因子 $K=0$,是最严重的瑞利衰落形式。

(1) 多普勒功率谱

飞行器在停车场状态时,飞行器静止或者以较小的速度 ($v \leq 5.5 \text{ m/s}$) 运动,多普勒频偏较小,多径分量全向分布,天线波束宽度为 360° ,此时的多普勒功率谱为 Jakes 功率谱,如图 2 所示,由于不存在视距路径^[8],此种场景下的信道是多种场景下最差信道。

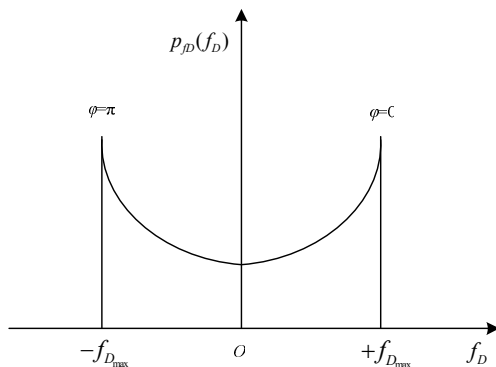


图 2 Jakes 功率谱

(2) 多径时延分布

借鉴 COST207 城市模型,信道的时延值服从指数分布,最大多径时延 $\tau_{\max} = 7 \mu\text{s}$,对应路程差为 $\Delta d = 2100 \text{ m}$,时延功率谱的斜率 $\tau_{\text{slope}} = 1 \mu\text{s}$ 。

2.2.2 航行状态

航行状态下,飞行器既要与飞行器之间通信,又要与地面进行通信,可以用两径模型来建模,视距路径是一常数,散射路径符合瑞利衰落,结合起来是一莱斯衰落,莱斯因子在 $K = 2 \text{ dB} \sim 20 \text{ dB}$ 范围内变化,其中, $K = 2 \text{ dB}$ 是信道最差的情况。

(1) 多普勒功率谱

飞行器在航行状态时,飞行器速度远远大于地面移动车辆速度,会产生较大的多普勒频移,此时信道为快衰落信道,若飞行器之间的相对速度为 $v_{\max} = 620 \text{ m/s}$, $v_{\min} = 17 \text{ m/s}$,飞行器与地面之间相对速度为 $v_{\max} = 440 \text{ m/s}$,多径分量一般不是全向分布的,天线波束宽度小于 360° ,通常假设有一个 3.5° 的散射成分。当散射是各向异性时, Jakes 推出的多普勒“U”型功率谱变成:

$$p_f(f_D) = \frac{1}{(\varphi_{aH} - \varphi_{aL}) f_{D_{\max}} \sqrt{1 - (f_D / f_{D_{\max}})^2}}$$

$$f_{D_{\max}} \cos \varphi_{aL} < f_D < f_{D_{\max}} \cos \varphi_{aH}$$

其中, φ_{aL} 是天线波束到达的最小角度; φ_{aH} 是天线波束到达的最大角度。

在信道最差的情况下,视距路径与飞行器飞行方向一致,造成视距路径电波的多普勒频偏为 $f_{D_{\min}} = f_{D_{\max}}$ 。

(2) 多径时延分布

在信道最差的情况下,地空链路的延迟约为 $200 \mu\text{s}$ ($\Delta d = 60 \text{ km}$),空空链路的延迟约为 1 ms ($\Delta d = 300 \text{ km}$),甚至更大。假定典型的最大高度为 10 km ,那么地空链路的最大延迟 $\tau_{\max} \approx 33 \mu\text{s}$,空空链路的最大延迟 $\tau_{\max} \approx 66 \mu\text{s}$ 。在这里,可以认为飞行场景下的延迟功率谱是由 2 条谱线组成的,一条为直射路径,另一条即为反射延迟路径。

2.2.3 近场状态

近场状态下,由于距离近了,视距分量变得更强,相应的信道的莱斯因子变得更大,取 $K = 18 \text{ dB}$ 。

(1) 多普勒功率谱

飞行器在近场状态下的信道也为快衰落信道,多径分量也不是全向分布的,天线波束宽度大于航行状态而小于停车场状态,多普勒功率谱是典型功率谱的一半,此时视距路径上的多普勒频偏也为 $f_{D_{\min}} = f_{D_{\max}}$ 。

(2) 多径时延分布

$$p_\tau(\tau) = \frac{1}{\tau_{\text{slope}} (1 - e^{-\tau_{\text{slope}} / \tau_{\max}})} e^{-\tau / \tau_{\text{slope}}}, 0 < \tau < \tau_{\max}$$

参数选择与停车场状态相同。

2.2.4 过顶状态

过顶状态可以看做只有视距分量,过顶状态的多普勒频移是随时间变化的状态,因为过顶时飞机相对于地面站的仰角变化快,可以用简单的乘性信道来建模。

3 理想瑞利信道和莱斯信道的特性分析

在瑞利(Rayleigh)信道中,由于接收信号的多径分量为随机二次反射波并不存在强支配路径,且这些多径分量的入射角在 $(0 \sim 2\pi)$ 范围上均匀分布,因此接收信号遵守瑞利分布:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right] \quad (1)$$

其中, σ^2 为信号平均功率; r 为信号包络。

在莱斯(Rice)信道中,存在强支配分量,信号的功率谱密度的分布为:

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left[-\frac{r^2 + A^2}{2\sigma^2}\right] I_0\left(\frac{Ar}{\sigma^2}\right) \quad (2)$$

其中,参数 A 是较强支配路径中的信号最大幅度; $I_0(x)$ 是零阶修正贝塞尔函数。莱斯分布特性通常可用下述 K 所定义参数进行描述:

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (3)$$

其中, K 表示强支配路径信号能量与多径分量信号能量之比。参数 K 称为莱斯因子。当 $A \rightarrow 0$,即强支配路径幅度变小直到消失时,莱斯分布也就趋近于瑞利分布。

4 低空信道的模拟系统

低空信道是无线信道的一种,目前常用的无线信道类型包括基于测量的模型、统计模型、Markov 信道模型、确定性

模型, 而这些模型的基础都是基于小尺度衰落的广义平稳非相关(Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering, WSSUS)模型^[9-10], 主要有以下特点:

- (1)在时延域上和 Doppler 频移域上具有非相关特性;
- (2)在时域上和频域上具有广义平稳特性。

4.1 信道的冲击响应

根据前面的分析, 对低空信道建模如下: 信道信号由视距分量、多径分量组成, 其中多径分量的分析基于 WSSUS 信道, 可得信道的冲击响应:

$$h(\tau, t) = \underbrace{a \cdot e^{j2\pi f_{D_{LOS}} \tau}}_{\text{LOS}} \delta(t) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \underbrace{e^{j\theta_n}}_{\text{phase}} \cdot \underbrace{e^{j2\pi f_{D_n} t}}_{\text{doppler}} \cdot \underbrace{\delta(\tau - \tau_n)}_{\text{delay}} \quad (4)$$

其中, t 、 τ 是特定的时刻和时间的增量; N 为仿真所需要的回波个数; θ_n 、 f_{D_n} 、 τ_n 分别表示第 $n(n=1, 2, \dots, N)$ 个回波的随机相位、多普勒频移和多径时延。

可以看出, $h(\tau, t)$ 是由 N 个不相关的回波组成, $1/\sqrt{N}$ 为归一化因子, 确保信道的总平均功率为 1, 并且这个因子对于所有频谱和回波都是相同的。由中心极限定理(当 $N \rightarrow \infty$ 时)可知, $h(\tau, t)$ 的第 2 部分是一个复高斯过程, 它的幅度服从瑞利分布。 $a \in R$ 是视距路径的幅度, $f_{D_{LOS}}$ 是视距路径的多普勒频移, $c^2 \in R$ 是散射部分的方差。莱斯衰减因子被定义为 $K = a^2/c^2$ 。由 $E[|h(t)|^2] = a^2 + c^2 = 1$ 得到 $a = \sqrt{K/(K+1)}$ 和 $c = \sqrt{1/(K+1)}$ 。特别的, 对于停车场状态, 信道冲击响应只有多径分量, 过顶状态只有视距分量。

4.2 信道参数的选择

在对信道模型进行仿真时, 最重要的是信道参数的选择, 在此主要考虑的是随机相位 θ_n 、多普勒频移 f_{D_n} 、多径时延 τ_n 的选择。根据蒙特卡罗(Monte Carlo, MC)仿真方法, 产生一个在 (0,1) 区间均匀分布的随机数 u_n , 得到:

$$v_n = g_v(u_n) = p_v^{-1}(u_n), 1 \leq n \leq N \quad (5)$$

其中, v_n 可以是 θ_n 、 f_{D_n} 、 τ_n , $g_v(u_n)$ 是累积概率分布函数 $p_v(u_n)$ 的反函数, 则:

$$\begin{cases} \theta_n = 2\pi \cdot u_n \\ f_{D_n} = f_{D_{\max}} \cdot \cos(\varphi_{aL} + (\varphi_{aH} - \varphi_{aL}) \cdot u_n) \\ \tau_n = -\tau_{\text{slope}} \cdot \ln(1 - u_n(1 - e^{-\tau_{\max}/\tau_{\text{slope}}})) \approx \\ \quad -\tau_{\text{slope}} \cdot \ln(1 - u_n), \tau_{\max} \geq \tau_{\text{slope}} \end{cases} \quad (6)$$

5 仿真分析

以上文的分析和建立的模型为基础, 本文对低空信道下 4 种不同的场景进行了建模, 并在 Matlab 下对所建立的信道进行了仿真。仿真中载波频率为 $f_c = 118 \text{ MHz}$, 数据传输速率为 $f_s = 1 \text{ MHz}$, 调制方式为 QPSK, 仿真所需的回波个数是 $N=20$ 。

图 3~图 6 为不同场景下信道包络的概率密度函数与理论瑞利分布、莱斯分布的比较。从图 3 可以看出, 停车场场景下的信道包络概率密度函数服从瑞利分布, 在图 4、图 5 中, 航行场景下的信道包络概率密度函数服从莱斯分布, 在图 6 中, 近场场景下的信道包络概率密度函数服从莱斯分布, 并且分别与瑞利分布和莱斯分布的概率密度曲线的理论值基本吻合, 这与前面的分析是一致对应的, 满足了不同场景下信道模型的要求, 通过验证得出所建立的信道模型是正确的、科学合理的。

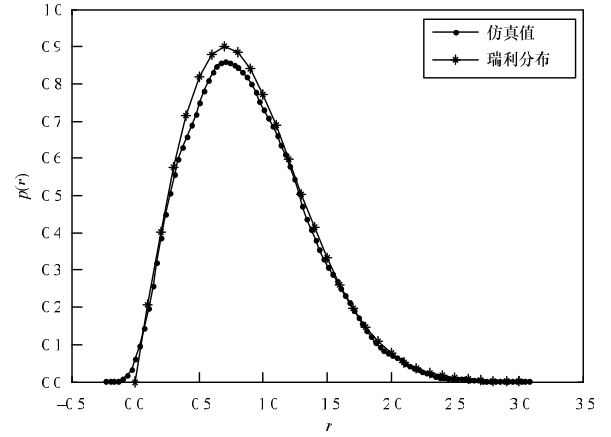


图 3 停车场信道包络的概率密度函数

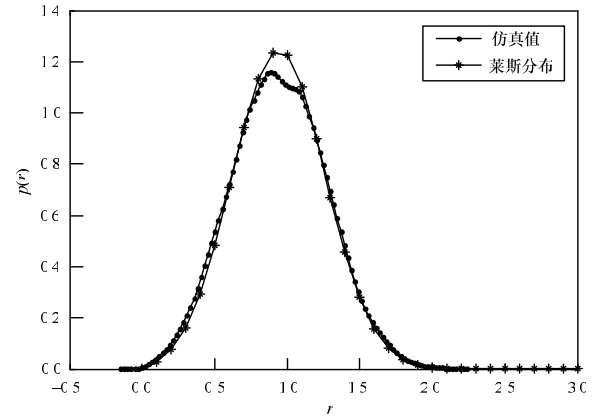


图 4 地空信道包络的概率密度函数

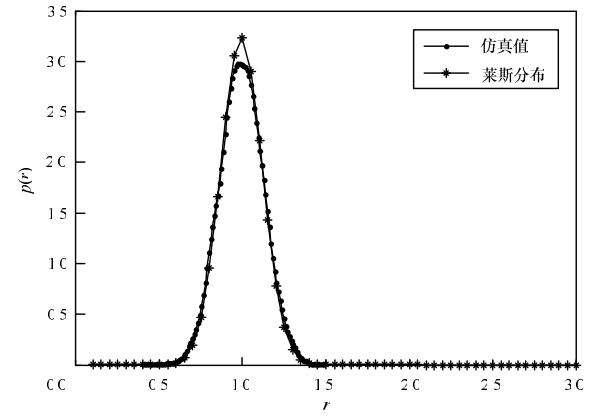


图 5 空空信道包络的概率密度函数

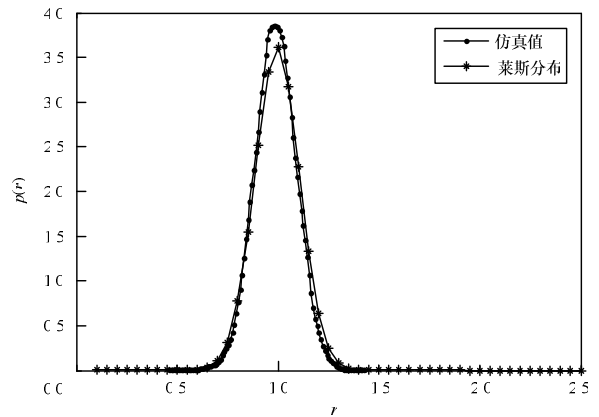


图 6 近场信道包络的概率密度函数