

文章编号: 1000-6893(2004)01-0062-04

## 无人机通信信道的统计模型

金石, 张晓林, 周琪

(北京航空航天大学 电子信息工程学院, 北京 100083)

### A Statistical Model for the UAV Communication Channel

J IN Shi, ZHANG Xiao-lin, ZHOU Qi

(School of Electronic Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘要:** 讨论了一种无人机通信信道的统计模型, 分析了无人机通信信道的组成, 给出了冲激响应模型, 然后将信道按照无人机的实际飞行划分成为 3 个主要的状态, 即途中飞行状态、任务区域盘旋状态和起飞/降落状态, 根据部分理论计算和参考文献分析了每个状态下信道的参数, 最后给出了无人机在不同飞行状态下误码率性能的仿真结果。对于当前没有较完备的无人机通信系统实测数据时, 进行无人机通信信道的统计模型建立和仿真等方面的研究具有重要意义。

**关键词:** 无人机; 信道模型; WSSUS; 地面反射波; 多径分量

**中图分类号:** V243 **文献标识码:** A

**Abstract:** A statistical model for UAV (Unmanned Aircraft Vehicle) communication channel is derived. The components of UAV communication channel and the channel impulse response are discussed. The situation of flight is divided into three major scenarios: en-route, circled, taking off and landing. Numerical simulation has been done according to the parameters from theoretical calculations and references. The model built in this paper has great significance to performance simulation of the UAV communication channel when no measurement data are available.

**Key words:** UAV; channel model; WSSUS; specular reflection; multipath component

无人驾驶飞机(以下简称无人机)是一种以无线电遥控或由自身程序控制为主的无人驾驶飞行器。与有人驾驶飞机相比,它具有诸多的优点,在近期几场局部战争中,无人机以极强的作战能力,发挥着显著的作用。而无人机通信系统是设计无人机的一个关键问题。

### 1 无人机通信信道模型建立

本文对信道分析是基于统计模型<sup>[1]</sup>,描述了无人机通信信道的传播特性。和陆地移动通信不同,无人机地面站都使用定向高增益的测控天线。因此,无人机通信系统中必然存在较强的直视信号(LOS)分量和一定的高斯白噪声。在通信链路中,无人机通信系统中也存在由不同传播路径引起的多径分量,类似莱斯(Rice)信道。同时和微波通信信道类似,无人机通信信道中存在较强的地面反射波,构成两径信道模型。另外,由于无人机存在一定的飞行速度,还要考虑其造成的多普勒效应。

#### (1) 信道模型类型

信道模型的研究开始较早,Bello 提出了小尺度衰落信道的 WSSUS 模型(Wide-Sense Station-

ary Uncorrelated Scattering, 广义静态非相关散射)<sup>[2]</sup>。进一步假设无关的多径分量个数足够大,由中心极限定理得到信道冲激响应的同相和正交分量都满足高斯分布,WSSUS 信道则转化为 GWSSUS 信道(Gaussian WSSUS)<sup>[3]</sup>。Schulze 提出了 GWSSUS 信道的蒙特卡罗近似<sup>[3]</sup>。航空信道模型特征的分析可以参见文献[4],主要讨论地面反射波的特性。

本文主要在 GWSSUS 信道的蒙特卡罗近似下,讨论增加直视分量和地面反射波分量的无人机通信信道,并基于 Forney 的信道离散时间模型<sup>[5]</sup>分析信道特性。

#### (2) 地面反射波分量

地面反射波特性的讨论可以参见文献[4,6],它主要和地面环境、入射角和极化方向有关。地面反射波的强度可表示为直视能量和光滑地面反射系数、天线增益、非漫反射能量在总能量中的比重的乘积。地面反射波的反射系数为<sup>[6,7]</sup>

$$s = g G_0 \exp\left[-\frac{g^2}{2}\right], g = 4 \left(\frac{S_h}{\lambda}\right) \sin \theta$$

式中:  $s$  为粗糙地面的反射系数;  $g$  为理想光滑地面的反射系数<sup>[7]</sup>;  $g$  为地面粗糙度因子;  $S_h$  为第一菲涅耳区内地面高度的标准差;  $\lambda$  为波长;  $\theta$

为入射角;  $G_0$  为相对于直视方向,地面反射波方向上天线损失的增益。

选择中等粗糙地面得到  $g = 30^{[4]}$ , 根据不同的地形地貌特征也可以假设不同的数值。近似天线增益损失为 3dB, 因此得到地面反射波的反射系数为  $\rho_s = 0.145$ 。地面反射波在小入射角时, 相移约为  $180^\circ$ 。

地面反射波的多普勒频移近似认为和直视分量一致, 地面反射波的延迟取决于反射波和直视波的路径差。假设地面站天线高度 ( $h_t$ ) 4m, 无人机高度 ( $h_r$ ) 7000m, 距离 ( $d$ ) 200km, 得路径差为 0.3m, 反射波的延迟约  $1 \times 10^{-9}$ s, 约为 10MHz 码速率时的码元宽度的 1%, 可以忽略不计。

### (3) 多径分量

在 WSSUS 信道由多径分量导致的小尺度衰落模型中, 主要讨论其多普勒功率谱和延迟功率谱构成, 即信道的散射函数  $P_s(\nu, f_D)$ 。在文献[3]中, 说明了可以近似认为多普勒功率谱与延迟功率谱独立, 即  $P_s(\nu, f_D) = P_s(\nu) P_s(f_D)$ 。

在无人机信道中, 高增益天线形成了较强的直视分量。称直视分量(能量  $a_0^2$ ) 和地面反射分量的能量(能量  $a_1^2$ ) 之和与多径分量能量(能量  $a_2^2$ ) 的比值为莱斯因子  $K = (a_0^2 + a_1^2) / a_2^2$ , 根据参考文献[8]中的实际数据得到  $K$  的取值一般为 10 ~ 20dB。

### (4) 飞行状态分类

考虑到反射波能量、多普勒功率谱以及延迟功率谱都和飞行环境和飞行状态有很大的关系, 因此将无人机飞行的阶段分类, 分别进行信道的分析是更符合实际情况的。根据飞行过程中环境的不同, 可将无人机飞行过程划分为: 途中飞行状态、任务区域盘旋状态和起飞/降落状态。根据从实际飞行过程中和其他文献[8,9]中得到的一些参数, 本文分别讨论这些状态下无人机通信信道的特性。

#### A. 途中飞行状态

途中飞行状态主要是指无人机处于从地面站向任务区飞行, 或者反方向飞行返回的过程。

直视分量 近似认为飞行方向和电波传播方向处于一条直线上, 既认为直视分量对准机尾或者机头方向。文献[8]中的实际数据得到  $K$  的取值一般为 10 ~ 20dB 左右, 本文取 15dB。

地面反射分量 假设 60% 的能量构成地面反射波<sup>[8]</sup>, 相对于直视分量, 天线增益的损失约为 3dB, 由前一节的分析得到, 地面反射分量相

对于直视分量的反射系数  $\rho_s = 0.6 \times 0.145 = 0.087^{[4,8]}$ 。

多普勒功率谱 在途中飞行状态, 无人机飞行速度  $V = 50$ m/s, 此时得到最大的多普勒频偏。由于在途中飞行状态时, 多径分量不是全方向性的, 这种各向异性导致了多普勒功率谱不满足 Jakes 谱。参考文献[9], 认为多径分量到来的方向和直视分量方向相反, 其波束宽度为  $3.5^\circ$ , 并且认为在这个角度内均匀分布, 即认为多普勒功率谱在这个角度内非零, 且满足 Jakes 谱。

多径延迟功率谱 近似认为延迟功率谱满足指数分布<sup>[9]</sup>,  $p(\tau) = \frac{1}{\text{slope}} e^{-\tau / \text{slope}}$ , 其中  $\tau > 0$ , 延迟衰减率  $\text{slope} = 0.5\mu\text{s}$ 。

#### B. 任务区域盘旋飞行状态

任务区域盘旋飞行状态也是无人机飞行过程中的主要状态之一。相对于途中飞行状态, 任务区域盘旋状态距离更远, 因此在路径中, 存在更多反射物, 将造成更强的地面反射和多径分量。同时无人机在盘旋时, 运动速度和电波传播的夹角是周期性变化的, 造成直视分量的入射角和最大多普勒频偏都呈周期性变化。

直视分量 在任务区域盘旋飞行状态下, 取  $K = 10$ dB。同时本文主要计算电波传播和运动方向夹角分别为  $0^\circ, 90^\circ$  的情况, 简化直视分量的入射角周期性变化的问题, 其余条件下的性能介于它们两者之间。

地面反射分量 假设 90% 的能量构成地面反射波<sup>[8]</sup>, 得到地面反射分量相对于直视分量的反射系数  $\rho_s = 0.9 \times 0.145 = 0.13^{[4,6]}$ 。

多普勒功率谱 认为多径分量到来的方向和直视分量方向相反。讨论多普勒功率谱时, 设无人机的巡航速度为 40m/s, 其余的条件和途中飞行状态一致。

多径延迟功率谱的分布同上, 但式中延迟衰减率  $\text{slope} = 1\mu\text{s}$ 。

#### C. 起飞/降落状态

直视分量 在起飞/降落状态下, 考虑到地面站使用高增益的地面站天线, 因此假设  $K$  约为 20dB。

地面反射分量 起飞/降落状态信道环境属于高仰角通信信道, 地面反射波近似忽略不计。

多普勒功率谱 由于不存在明显的强多径分量, 认为多径分量的入射角度在  $0$  到  $360^\circ$  上满足均匀分布, 多普勒功率谱为标准的 Jakes 谱分布。

多径延迟功率谱分布同上,但由于距离比较近,其多径延迟也比较小,假设延迟衰减率  $\text{slope} = 0.1\mu\text{s}$ 。

### 2 无人机通信信道性能分析

在无人机通信信道性能分析时,首先根据前面的讨论,给出信道的冲激响应和频域传输函数。然后给出冲激响应中各个参数的意义,和时变参数的模拟方法。最后给出离散信道模型,可用于计算机仿真或使用 DSP 系统对信道进行硬件模拟。

#### (1) 信道的冲激响应

先分析信道的冲激响应,其主要由 3 个部分组成:直视分量、地面反射波分量、多径分量。其中前两者可以近似为恒参,而多径分量是时变的。因此使用 WSSUS 模型进行分析<sup>[3,7]</sup>,得到

$$h(\tau, t) = a_0 e^{j2\pi f_{D0} \tau} e^{j2\pi f_{D0} t} + a_1 e^{j\theta_0} e^{j2\pi f_{D0} \tau} e^{j2\pi f_{D0} t} + \lim_N \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\theta_n} e^{j2\pi f_{Dn} \tau} e^{j2\pi f_{Dn} t}$$

式中:  $t$ ,  $\tau$  表示特定的时刻和时间的增量;  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  分别为直视分量、地面反射波分量和多径分量的强度;  $\theta_0$ ,  $f_{D0}$ ,  $\theta_1$  分别为地面反射波分量的相位差、多普勒频偏和延迟;  $\theta_n$ ,  $f_{Dn}$ ,  $\tau_n$  分别为第  $n$  条路径的相位差、多普勒频偏和延迟; 系数  $1/\sqrt{N}$  是归一化因子,保证多径分量的能量之和为单位能量 1。

在多径分量中,  $\theta_n$ ,  $f_{Dn}$ ,  $\tau_n$  为随机变量,是时变的。 $\theta_n$  概率密度函数为  $p(\theta) = 1/(2\pi)$ , 满足 0 到  $2\pi$  均匀分布。本文中近似认为多普勒功率谱与延迟功率谱独立<sup>[3]</sup>, 延迟功率谱和多普勒功率谱分别服从独立的一维概率谱密度函数  $P(\tau)$  和  $P_{f_D}(f_D)$ 。

#### (2) 随机变量的模拟

由于变量  $\theta_n$ ,  $f_{Dn}$ ,  $\tau_n$  都是随机的, 它们分别满足各自的概率密度  $p(\theta)$ ,  $p(f_D)$ ,  $p_{f_D}(f_D)$  分布。根据蒙特卡罗仿真方法, 使用一个均匀分布的变量  $u_n$  (0, 1) 模拟一个概率分布的随机变量  $v_n$ , 即  $v_n = g_v(u_n) = P_v^{-1}(u_n)$ , 其中  $g_v(\cdot)$  为要模拟的变量的概率密度函数的反函数<sup>[3]</sup>。本文中的随机参数模拟方法如下:

$\theta$  满足均匀分布  $p(\theta) = 1/(2\pi)$ , 得到模拟的  $\theta = g_\theta(u_n) = 2\pi u_n$ ;

$f_{Dn}$  满足 Jakes 谱, 得到模拟的  $f_{Dn} = g_{f_D}(u_n) = \cos(\pi L + (\pi H - \pi L) u_n)$ ; 其中  $L$ ,  $H$

$H$  为多径分量的入射角度范围<sup>[9]</sup>。

$p(\tau)$  满足指数分布,  $p(\tau) = \frac{1}{\text{slope}} e^{-\tau/\text{slope}}$ , 得到模拟的  $\tau = g_\tau(u_n) = -\text{slope} \ln(1 - u_n)$ 。

#### (3) 等效离散时间模型

基于上述的论述, 分析蒙特卡罗近似下系统的等效离散时间模型。首先, 假设通信系统的框图见图 1。

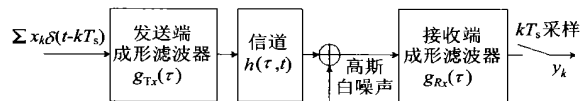


图 1 无人机通信系统框图<sup>[3]</sup>

Fig. 1 UAV communication system

考虑在第一节中分析的信道特性, 得到等效的离散时间模型见图 2。

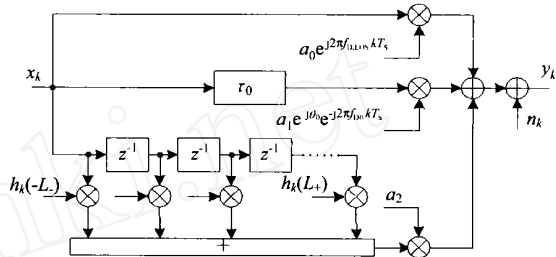


图 2 无人机通信系统等效离散时间模型

Fig. 2 The equivalent discrete model for UAV communication system

其中:  $x_k$  为离散输入;  $y_k$  为离散输出;  $n_k$  为离散噪声。从图 2 中可以看出, 信道分为 3 个部分: 直视分量、地面反射波分量和多径分量, 其中多径分量的分析是基于 WSSUS 模型的, 可参见文献[3, 9]。模型中抽头延迟线的系数为

$$h_k(i) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N a_n e^{j\theta_n} e^{j2\pi f_{Dn} kT_s} g_{\text{total}}(iT_s - \tau_n) \quad -L \leq i \leq L_+$$

式中:  $k$  为时标, 满足  $t = kT_s$ ;  $i$  为抽头号;  $g_{\text{total}}(\tau) = g_{T_x}(\tau) g_{R_x}(\tau)$  表示系统中发送成形滤波器和接收成形滤波器冲激响应的乘积。  $-L$  到  $L_+$  为  $g_{\text{total}}(\tau)$  冲激响应长度, 或者是近似长度<sup>[3]</sup>。

### 3 仿真结果

以前面的分析和模型为基础, 本文对途中飞行、任务区域盘旋和起飞/降落的状态进行了误码率的计算机数据仿真。仿真点数为 100000 点, 载波频率为 2.2 GHz, 数据速率为 10MHz, 系统调制方式为 QPSK, 同时假设接收时接收机和直视分量完全同步, 取 WSSUS 模型的路径个数  $N =$

20. 其余各个状态下的参数见表 1。误码率的仿真结果见图 3, 高斯白噪声信道和理想信道估计下瑞利衰落信道的误码率特性也表示在图 3 中, 作为比较。

表 1 无人机各飞行状态下的信道参数

Table 1 The parameters of UAV channel in situations of flight

	途中飞行	任务区域盘旋	起飞/降落
莱斯因子 $K/\text{dB}$	15	10	20
反射系数	0.087	0.13	0
飞行速度/ $(\text{m s}^{-1})$	50	40	40
多径分量波束角度/ $(^\circ)$	178.25 ~ 181.75	A:178.25 ~ 181.75 B:88.25 ~ 91.75	0 ~ 360
多径延迟 $\text{delay}/\mu\text{s}$	0.5	1	0.1

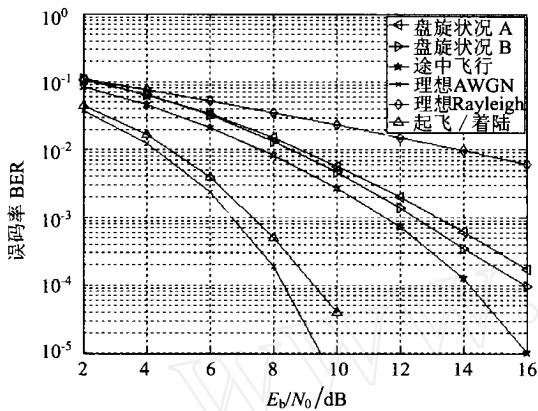


图 3 无人机通信信道的误码率曲线

Fig. 3 BER for UAV communication system

其中直射分量对系统的性能有比较大的影响,在任务区域盘旋、途中飞行、起飞/降落的状态中,随着直射分量越来越高,地面反射波分量和多径分量逐渐下降,因此信道的特性也有所提高。在任务区域盘旋状态,仿真了两种极端条件:状态 A 为运动方向和电波传播方向夹角  $0^\circ$ ,多普勒频偏相对最小;状态 B 为夹角  $90^\circ$ ,频偏相对最大。可以发现多普勒效应给信道的特性造成的不利影响。

#### 4 结 论

本文讨论了一种无人机通信信道的统计模型,分析了信道的组成,给出了冲激响应模型,并将无人机的飞行划分成为 3 个主要的状态,给出

误码率性能的仿真结果。在目前尚无信道模型的实测数据时,利用本文推导的信道模型和仿真的结果,可以进行无人机通信系统仿真和设计等方面的研究。

为了更加完善本文中提出的无人机通信信道的统计模型,可以通过实验的实测数据对模型进行修正和补充,如文献[8]中提出的参数估计的方法。

#### 参 考 文 献

- [1] 杨红, 卫何晨, 诸鸿文等. 平流层通信衰落信道的统计模型[J]. 上海交通大学学报, 2002, 36(3): 333. (Yang H, Wei H C, Zhu H W. Statistical model for the fading channel of the stratospheric communication[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2002, 36(3): 333.)
- [2] Bello P A. Characterization of randomly time-invariant linear channels[J]. IEEE Trans Commun Sys, 1963, CS-11(4): 360 - 393.
- [3] Hoehner P. A statistical discrete-time model for the WSSUS multipath channel[J]. IEEE Trans Veh Technol, 1992, 41(4): 461 - 468.
- [4] Bello P A. Aeronautical channel characterization[J]. IEEE Trans Commun, 1973, COM-21(5): 548 - 563.
- [5] Forney G D. Maximum-likelihood sequence estimation of digital sequences in the presence of intersymbol interference[J]. IEEE Trans Inform Theory, 1972, IT-18(3): 363 - 378.
- [6] 熊皓, 等. 无线电波传播[M]. 北京: 电子工业出版社, 1999. 432 - 437. (Xiong H, et al. Radio propagation[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 1999. 432 - 437.)
- [7] Rappaport T S. Wireless communications principles and practice[M]. New York: Prentice Hall. 1998. 78 - 90, 143 - 153.
- [8] Rice M, Dye R, Welling K. Narrowband channel model for aeronautical telemetry[J]. IEEE Trans On Aerospace and Electronic System, 2000, 36(4): 1371 - 1376.
- [9] Hass E. Aeronautical channel modeling[J]. IEEE Trans On Vehicular Technology, 2002, 51(2): 254 - 264.

#### 作者简介:

金 石(1981) 男,北京航空航天大学电子信息工程学院信息与通信工程专业博士研究生。  
 张晓林(1951) 男,北京航空航天大学电子信息工程学院教授,博士生导师。  
 周 琪(1979) 男,北京航空航天大学电子信息工程学院信息与通信工程专业硕士研究生。

(责任编辑:俞 敏)