

## 航空信道仿真研究

杨霄鹏<sup>1,2</sup>, 姚 昆<sup>2</sup>, 史浩山<sup>1</sup>

(1. 西北工业大学电子信息学院, 陕西西安 710077; 2. 空军工程大学电讯工程学院, 陕西西安 710077)

摘要: 在对航空信道物理特性分析的基础上, 提出了一个适用于空-空、地-空无线链路的宽带频率选择性衰落频域信道仿真器。选择合适的仿真参数, 该仿真器可以模拟航空器在停车场、滑行、飞行等状态的无线衰落信道。宽带频率选择性信道仿真器由多个并行子信道仿真器在频域构成, 每个子信道为一个简单结构的平坦衰落模型, 执行独立的瑞利衰落, 这样的多个并行子信道构成了一个宽带频率选择性信道的仿真结构, 非常适合正交频分复用或者多载波码分多址系统信道的计算机仿真。

关键词: 航空通信; 频域信道模型; 频率选择性信道

中图分类号: TN913 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2006)03-0016-04

为了在未来的航空通信网中传输宽带的多媒体信号, 人们已经考虑使用包括多载波技术在内的宽带技术来提高航空通信的系统容量<sup>[1-3]</sup>。基于正交频分复用(OFDN)的多载波码分多址(MC-CDMA)技术是一种适合在衰落信道中宽带高速应用的多址技术, 已经被应用于许多无线系统中。对该技术在航空通信中的应用进行研究, 首先要寻找和建立一个适合宽带信号的信道模型及其仿真器。同时, 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<sup>[4]</sup>。在无线通信中, 由于收信机和发信机之间的多条传播路径造成的多径效应是一个普遍存在的问题<sup>[5]</sup>。通常, 航空信道被认为是由一个视距传播(LOS)成分和一个多径散射成分组成<sup>[6]</sup>, 称为莱斯(Rice)衰落信道。其中多径散射成分是由传播环境中物体对电磁波的反射和散射产生的。在航空通信中, 飞行器不同的状态会导致不同的信道衰落形式, 比如飞行器在飞行途中、跑道滑行以及停车场状态导致的信道衰落是不同的<sup>[7-8]</sup>。一般来说, 在停车场状态下, 由于停机坪、机库的影响, 通常视距成分是不存在的, 这导致了所谓瑞利(Rayleigh)衰落, 是最严重的衰落形式。而在另外的状态下, 接收信号通常包含 LOS 成分和散射成分, 这会导致莱斯衰落。航空信道中不同参数的莱斯衰落模型已经被提出并经过了信道探测数据的验证<sup>[9]</sup>。

通常, 当信号带宽大于信道相干带宽时, 应该使用宽带的频率选择性信道模型研究多径衰落信道, 这时信号是可以被分解为多个路径成分的。在航空信道中, 飞行器在停车场状态时, 一个多载波信号一般是大于信道的相干带宽的, 这时就需要一个宽带的信道模型对该信道进行建模。特别的, 由于 MC-CDMA 信号的频域扩展特性, 建立一个频域的宽带信道模型对于研究多载波系统在航空信道中的性能是十分方便和必要的。

## 1 航空信道介绍

### 1.1 信道描述

前已提及, 飞行器不同的状态会导致不同的信道特征, 并且由不同的衰落类型、多普勒(Doppler)谱以及延迟扩展等特性决定。这里, 散射的多径成分特性由多普勒以及延迟功率扩展决定, 而 LOS 成分应与散射成分分开单独考虑。为了建立准确的信道模型, 航空信道通常被分为“停车场”、“飞行”、“滑行”等 3 种状态, 如图 1 所示。其中停车场和滑行状态的信道特性可以由 COST-207 报告来描述<sup>[8]</sup>。一般地, 当飞行器在停机

收稿日期: 2005-09-23

基金项目: 教育部博士点基金资助项目(20050699037)

作者简介: 杨霄鹏(1973-), 男, 甘肃天水人, 讲师, 博士生, 主要从事宽带无线通信及信号处理技术研究。

坪、机库内停留或者以极其缓慢的速度滑行时被认为是  
 停车场状态,由于周围建筑的影响,飞行器与地面基站之间  
 可能不存在视距传播路径,这时信道全部由散射成分组  
 成,对应于典型的 COST-207 城市衰落环境。当飞行器  
 为起飞前的滑行状态时,飞行器周围环境相对开阔,此时  
 信道由视距传播成分和散射成分组成,对应于典型的  
 COST-207 农村衰落环境。当飞行器升空后被称为飞行  
 状态,这时通信可能发生在地面基站和飞行器,或者飞行  
 器和飞行器之间,即所谓地-空、空-空通信。这种状态的信道由视距传播成分和散射成分组成,并且视距  
 成分占主导地位。

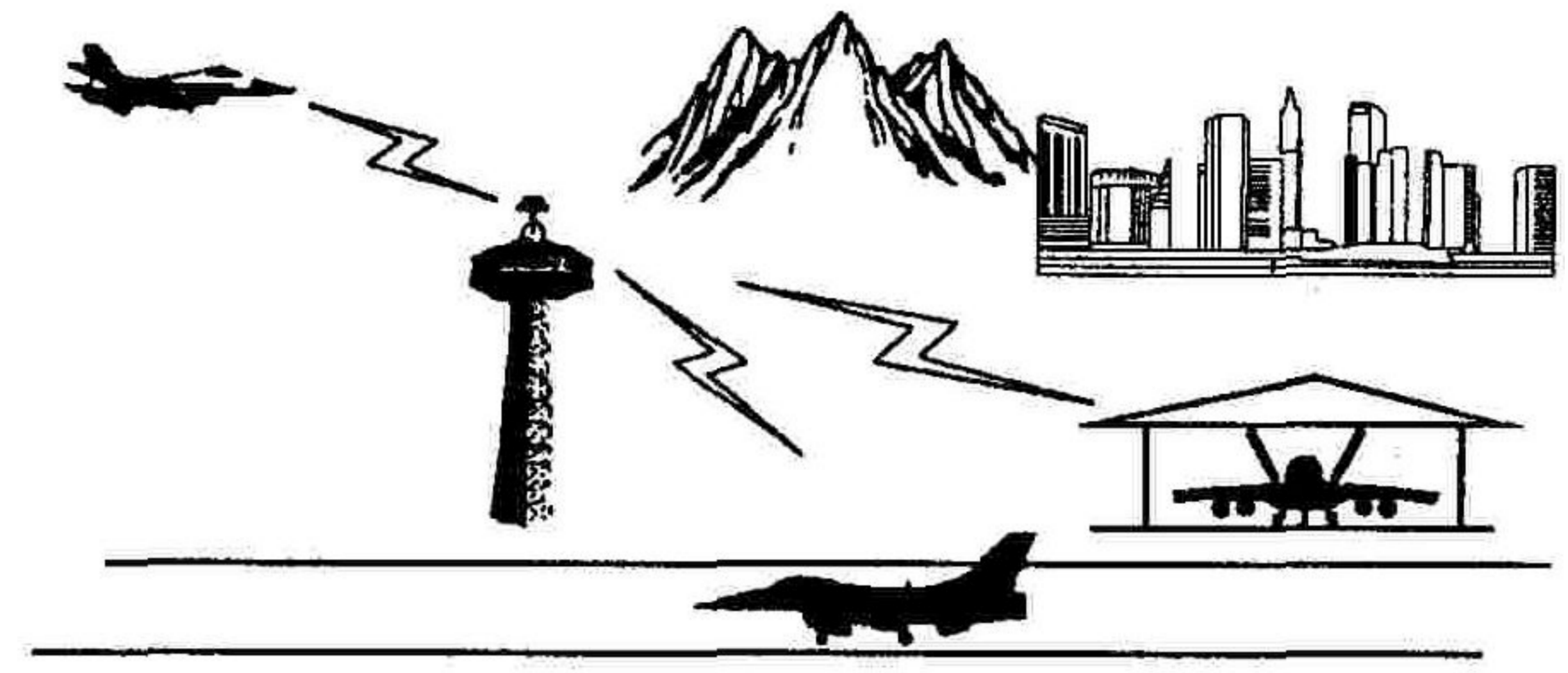


图1 航空信道不同状态图

1.2 信道的多普勒分析

无线通信中的多普勒效应是由于通信双方的相对位置移动造成的,在航空通信中,飞行器不同状态下收发双方的相对速度相差很大,所以多普勒谱必须分别进行分析和描述。在滑行状态,飞行器通常的移动速度小于 15 m/s,即使在最恶劣的情况下,飞行器速度也超不过 50 m/s。这时,各种反射波的入射角度被假设为围绕飞行器均匀分布。如图 2 所示,散射成分的波束宽度被假设为为 360°且均匀分布。并且假设直射波从飞行器正前方到达,导致直射波的载波频率的正向最大偏移<sup>[7-8]</sup>。

当飞行器在停车场状态时,通常直射波是不存在的<sup>[8]</sup>,从而导致瑞利衰落,这是最严重的假设。这时,飞行器静止或者移动速度小于 5.5 m/s,所以载波的最大多普勒偏移通常很小,如图 3 所示<sup>[8]</sup>。

当飞行器在飞行状态时,信道可以被假设为一个两径模型,即一条路径为直射波,另一条路径为瑞利衰落的散射波<sup>[10]</sup>,这时收发双方的相对位移速度通常会很高。同时散射成分被视为非均匀分布,也就是说,散射波的波束宽度小于 360°,计算时通常假设一个 3.5°宽度的散射成分<sup>[10]</sup>。图 4 所示该状态的多普勒分布是一个典型的部分二维多普勒谱。

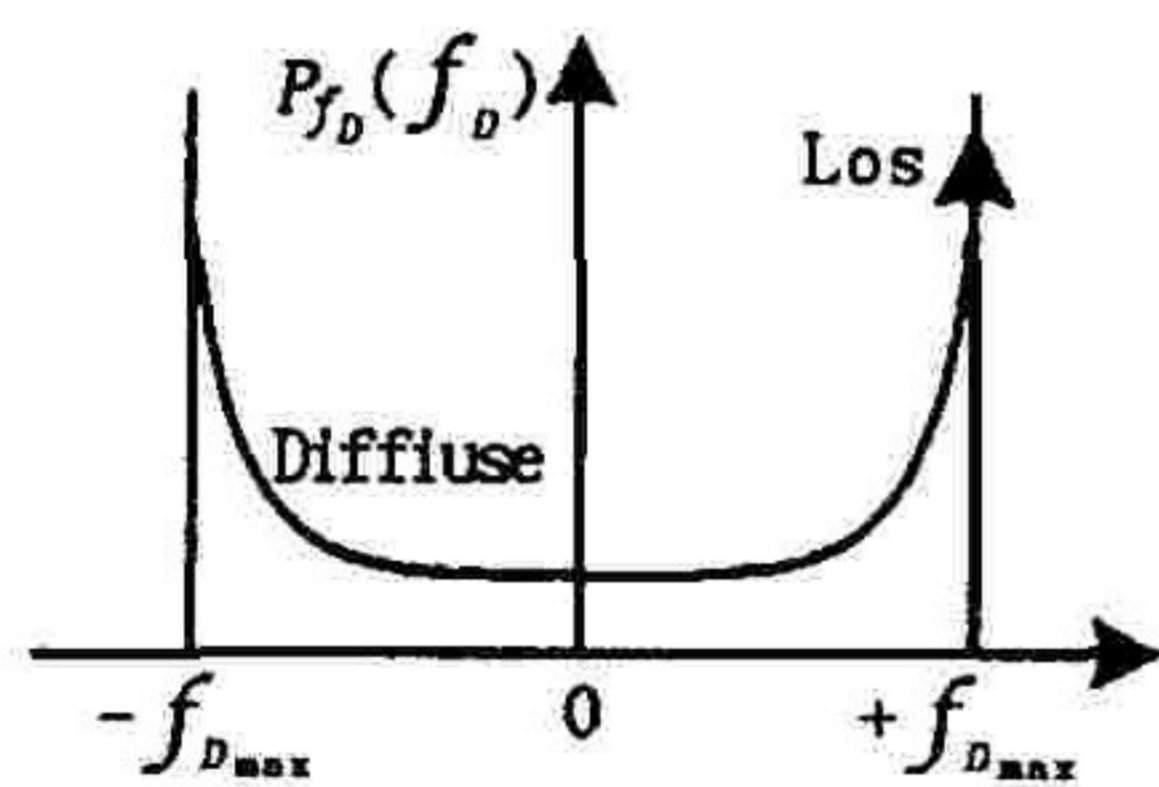


图2 滑行状态时的多普勒分布图

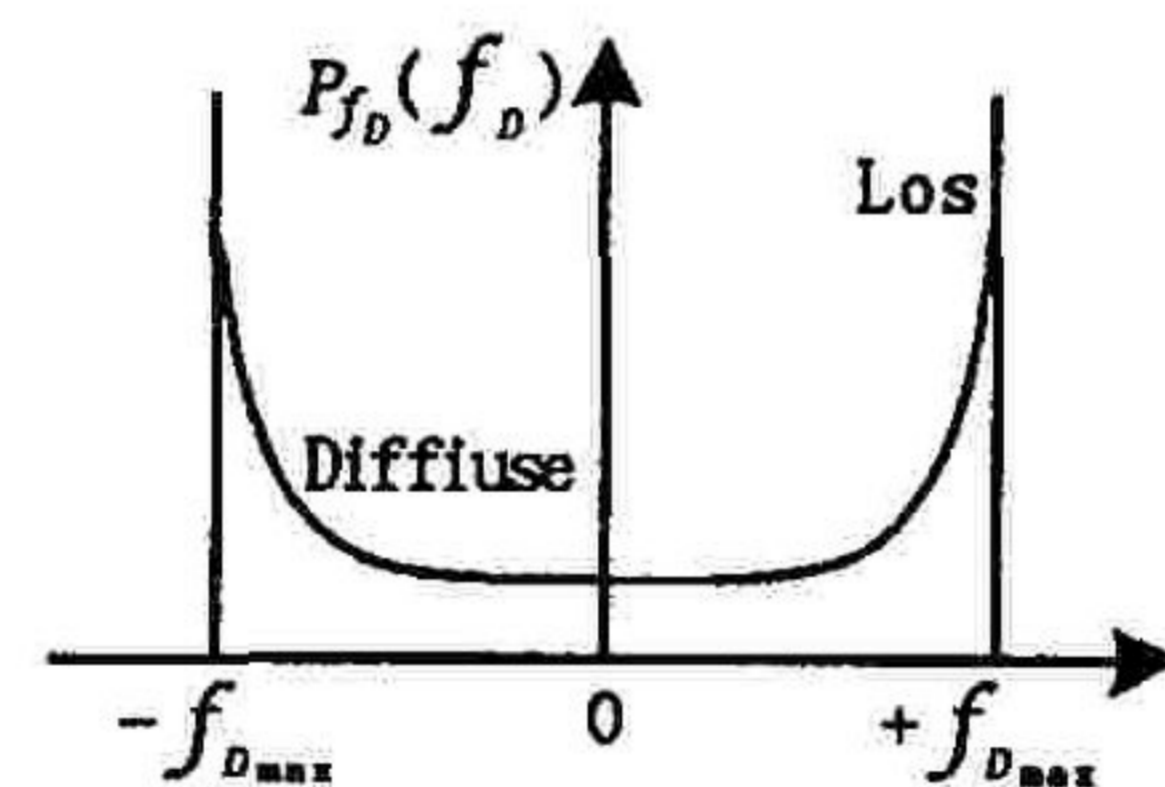


图3 停车场状态时的多普勒分布图

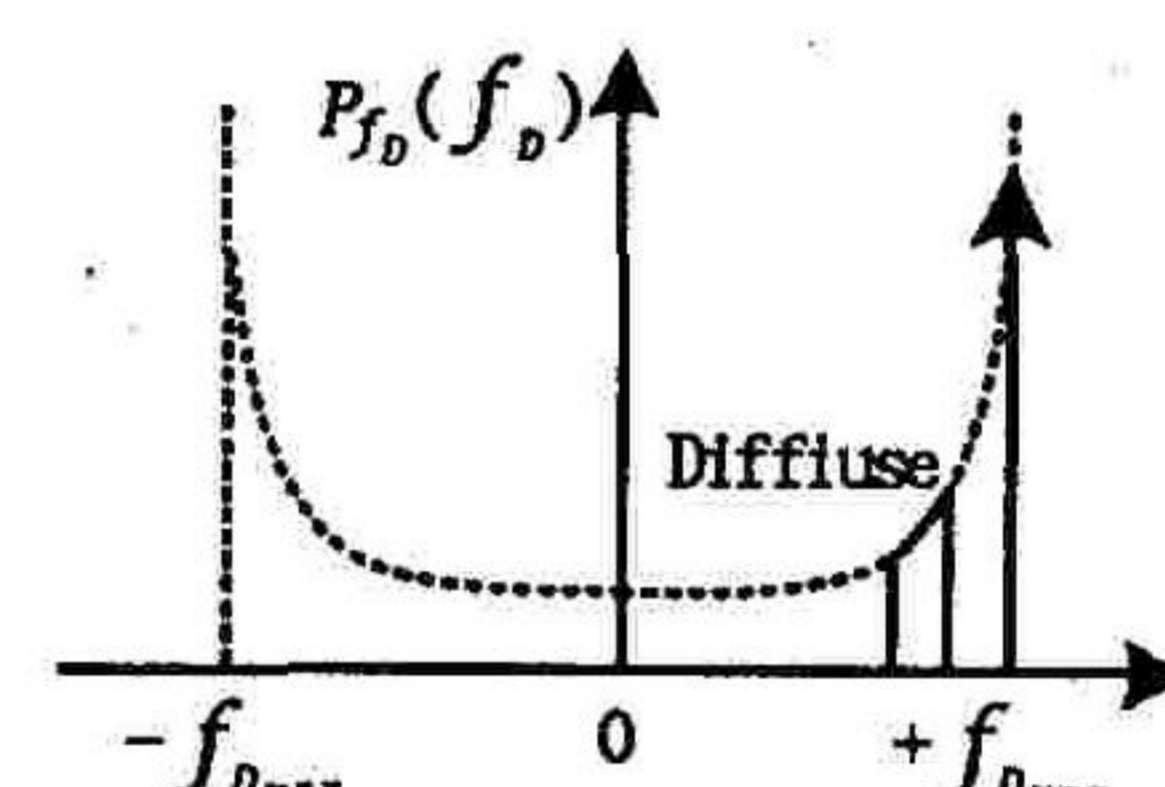


图4 飞行状态时的多普勒分布图

1.3 信道的多径时延分布

飞行器在不同的状态下,信道中直射波和散射波的时延分布是不同的,这方面可以借鉴比较成熟的理论结果。当飞行器在停车场状态时,可以借鉴 COST-207 中的市区环境参数,此时最大多径时延为  $\tau_{max} = 7 \mu s$ ,对应路径差为  $\Delta d = 2100 \text{ m}$ ,多径时延分布按照时间斜率  $\tau_{slope} = 1 \mu s$  减少。当飞行器在滑行状态时,可以借鉴 COST-207 中的农村环境参数,这时最大多径时延为  $\tau_{max} = 0.7 \mu s$ ,对应路径差为  $\Delta d = 210 \text{ m}$ ,并且按照时间斜率  $\tau_{slope} = 1/1.927 \mu s$  减少。

2 频域仿真

前已提及,正交频分复用和码分复用以及码分多址技术已经被应用在许多高速无线衰落信道的传输中。同时由于非常适合于宽带应用,MC-CDMA 已经被建议应用于高速航空数据链路中<sup>[1]</sup>。为了研究多载波传输技术在航空信道中的性能,建立一个频域的航空信道模型以及仿真器对 MC-CDMA 在航空通信中的应用是非常有意义的。

2.1 WSSUS 信道模型

航空无线信道可视为一个直射波成分和一个散射波成分的叠加,即 Rice 信道模型。其中散射成分通常被建模为广义非相关散射(WSSUS)模型,一般的,其时变脉冲响应为<sup>[11]</sup>

$$h(\tau, t) = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \exp(j\theta_n) \exp(j2\pi f_{D_n} t) \delta(\tau - \tau_n) \quad (1)$$

上式中,  $\tau_n$  是扩展时延, 随机变量  $\theta_n (0 \leq \theta_n < 2\pi)$ 、 $f_{D_n} (-f_{D_{max}} \leq f_{D_n} < +f_{D_{max}})$ 、 $\tau_n (0 \leq \tau_n < \tau_{max})$  分别是随机相位、多普勒频移和多径时延。该式表明多个散射波的不相关叠加构成了一个 WSSUS 信道。每一个散射路径的特征由各自的随机相位  $\theta_n$ 、多普勒频移  $f_{D_n}$  和多径时延  $\tau_n$  所描述。 $\sqrt{1/N}$  为归一化因子, 确保总平均功率为单位功率。由中心极限定理(当  $N$  很大时)可知,  $h(\tau, t)$  是一个幅度为瑞利衰落的复高斯过程。

2.2 频域信道模型及仿真器

根据前面的分析, 飞行器不同状态下的信道建模可以用一个变 Rice 衰减因子的 Rice 衰落模型来表述。这样, 从公式(1) 可得到一个衰落模型:

$$h(\tau, t) = a \exp(j2\pi f_{D_{LOS}} t) \delta(\tau) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \exp(j\theta_n) \exp(j2\pi f_{D_n} t) \delta(\tau) \quad (2)$$

式中, 信道的脉冲响应由直射波 LOS 和散射波两部分构成。 $a \in \mathbf{R}$  是直射波的幅度,  $f_{D_{LOS}}$  是直射波的多普勒频移,  $c^2 \in \mathbf{R}$  是散射部分的方差。Rice 衰减因子被定义为  $K_{Rice} = a^2/c^2$ 。一般地, 我们要求  $E[|h(t)|^2] = a^2 + c^2 = 1$ , 所以可以得到  $a = \sqrt{\frac{K_{Rice}}{K_{Rice} + 1}}$  和  $c = \sqrt{\frac{1}{K_{Rice} + 1}}$ 。为了研究信道衰落的频域特征, 将时变信道脉冲响应  $h(\tau, t)$  对  $\tau$  进行付里叶变换得到:

$$T(t) = a \exp(j2\pi f_{LOS} t) + \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{c}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \exp(j\theta_n) \exp(j2\pi f_{D_n} t) \quad (3)$$

这里  $N$  是反射波的数量, 一般取  $N = 25$  即可<sup>[7]</sup>。

为了表示不同飞行器状态下的航空信道特征, 应该选择不同的衰减因子  $K_{Rice}$ 。当飞行器停场状态时, 一般不存在直射波成分, 所以取  $K_{Rice} = 0$ , 也就是说  $a = 0, c = 1$ 。同时 Erik Haas 在文献[7] 中建议飞行器滑行状态时信道设置为  $K_{Rice} = 6.9 \text{ dB}$ , 飞行状态时信道设置为  $K_{Rice} = 15 \text{ dB}$ 。这样, 选择不同的衰减因子就可以得到不同状态的信道模型。

在 OFDM 及 MC - CDMA 系统中, 发射信号从串行传输变换为并行传输, 同时并行信号被调制到互相正交的一组子载波上。由于传统的单载波信道仿真器不能针对每一个子载波进行独立衰落仿真, 所以可采用并行的仿真模型对所有子载波进行独立的衰落仿真, 从而灵活的得到一个宽带的信道衰落效果。图 5 为一个频域信道仿真结构, 输入码字首先被串并转换为并行的码字, 然后对每个并行码字进行不同的衰落处理, 包括幅度, 相位衰落, 叠加噪声等, 从而灵活的仿真多载波传输系统。

在图 5 所示仿真结构中, 每一个子载波(信道)的衰落由两部分组成, 一个是直射波成分, 另一个是散射波成分, 分别有各自的幅度和相位衰落系数, 同时假设每一个多载波符号时间中信道衰落是保持恒定的, 即慢衰落特性。可令:

$$T_{1l} = \exp(j2\pi f_{D_{LOS}} kT_s) \quad (4)$$

为直射波成分第  $l$  个子载波第  $k$  个符号的的衰落系数, 式中  $T_s$  是符号时间。

$$T_{2l} = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{n=1}^N \exp(j\theta_n) \exp(j2\pi f_{D_n} kT_s) \quad (5)$$

是散射成分的第  $l$  个子载波第  $k$  个符号的的衰落系数, 式中, 每一个反射波都有各自的随机相位  $\theta_n$  和随机的多普勒频偏  $f_{D_n}$ ,  $N_l$  是每个子载波上的加性噪声。

在计算机仿真中, 信道对信号的所有的衰落效应, 包括幅度、相位的变化均由衰落系数来确定。系数中的随机相位  $\theta_n$  和多普勒频移  $f_{D_n}$  生成方法参见文献[11], 每一个子载波中的反射波数量可选择为 10。为了仿真时变信道, 衰落系数在仿真过程中依次独立生成, 并且为了模拟不同子载波之间衰落的独立性, 每个子载波的衰落系数由不同的过程独立完成。该仿真器能够被方便的用于 OFDM 或者 MC - CDMA 系统性能仿真。

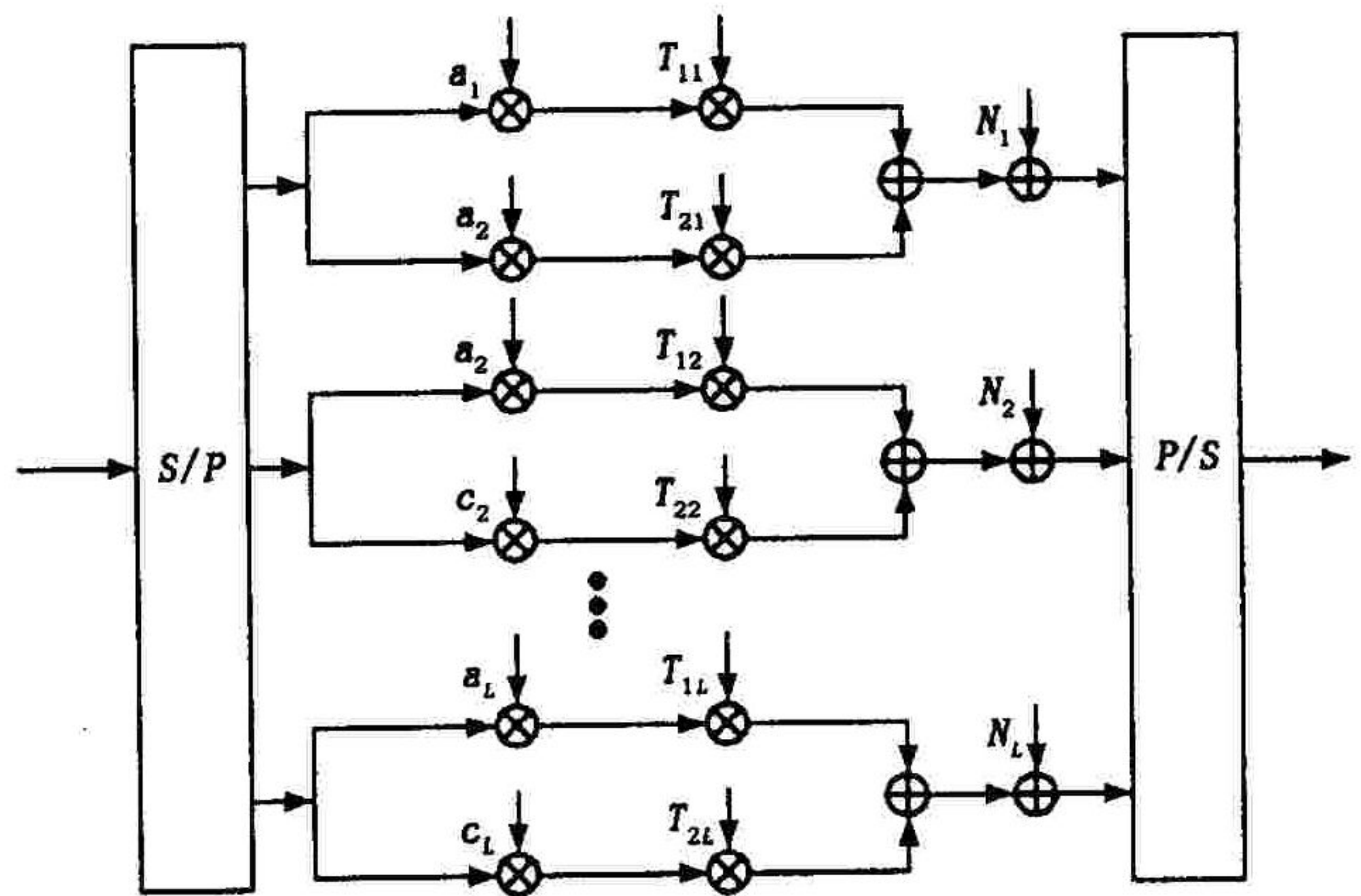


图 5 频域仿真器结构图

### 3 结束语

本文设计了一个用于宽带频率选择性衰落的航空信道频域仿真模拟器,航空通信中飞行器各种状态下的信道均可通过其进行仿真。该仿真器由多个并行的信道模型在频域构成,子信道之间的衰落相互独立。在宽带传输的条件下,每个子信道由一个直射成分和一个散射成分组成,散射成分的幅度衰落服从瑞利衰落。基于这样的设计,我们得到了一个频域的具有频率选择性特性的仿真模型。该模型的系数在相同的概率分布条件下生成,能够方便的应用于多载波的 OFDM 和 MC - CDMA 系统的性能仿真。

#### 参考文献:

- [1] Haas E, Lang H, Schell M. Development and Implementation of an Advanced Airport Data Link Based on Multi - Carrier Communications[A]. IEEE 7th Int. Symp. on Spread - Spectrum Tech. & Appl[C]. Prague: Czech Republic, 2002. 373 - 379.
- [2] Frank Box, Philip I, Long. In - Band Transition of a Nationwide Air/Ground Radio System From an Analog to a Digital Architecture[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2003, 52(3): 701 - 707.
- [3] Jaouhar Ayadi, Yan Brand, John Faeserotu. On the Use of UMTS for Air - Ground Links[A]. 12th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC 2001)[C]. San Diego: 2001. 127 - 132.
- [4] Michael Rice, Adam Davis, Christian Bettweiser. Wideband Channel Model for Aeronautical Telemetry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 40(1): 57 - 69.
- [5] J G Proakis. Digital Communications[M]. Third Edition; McGraw - Hill, 1995.
- [6] Painter J, Gupta S C, Wilson L R. Multipath Modeling for Aeronautical Communications[J]. IEEE Transactions on Communication, 1973, 21: 658 - 662.
- [7] Erik. Haas. Aeronautical Channel Modeling[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2002, 51(2): 254 - 264.
- [8] Peter Hoehner, Erik Haas. Aeronautical Channel Modeling at VHF - Band[A]. Proceedings of the 1999 VTC - Fall IEEE VTS 50th Vehicular Technology Conference[C]. Amsterdam: 1999. 1961 - 1966.
- [9] Michael Rice, Ricky Dye, Kenneth Welling. Narrowband Channel Model for Aeronautical Telemetry[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 36(4): 1371 - 1377.
- [10] Elnoubi S M. A simplified stochastic model for the aeronautical mobile radio channel[A]. IEEE Vehicular Technology Conference[C]. Denver: 1992. 960 - 963.
- [11] Hoehner P. A statistical discrete - time model for the WSSUS multipath channel[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1992, 41(4): 461 - 468.

(编辑:门向生)

#### Simulation Study of Aeronautical Channel

YANG Xiao - peng<sup>1,2</sup>, YAO Kun<sup>2</sup>, SHI Hao - shan<sup>1</sup>

(1. Electronic Information Institute, Northwestern Polytechnic University, Xi'an, Shaanxi 710072, China; 2. The Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710077, China)

Abstract: This paper proposes a simulation structure for aeronautical wideband frequency - selective channel, which features ground - air and air - air wireless links. With appropriate channel parameters, the channel emulators of the parking, taxi and en - route states can be modeled in frequency domain. The wideband frequency - selective channel consists of some parallel sub - channels in frequency domain, which are assumed to be independent to each other and have Rayleigh - distributed envelopes. The sub - channel models and emulators are based on a simple structure and characterized by flat fading. Through such decomposition approach, a frequency domain frequency - selective channel model can be achieved, which is suitable for an implementation of orthogonal frequency - division multiplexing (OFDM) or multi - carrier code - division multi - access channel emulator.

Key words: aeronautical communication; frequency domain channel model; frequency - selective channel