宽带频率选择性卫星移动信道仿真模型

张嘉铭，杨明川，郭 庆

（哈尔滨工业大学 通信技术研究所，150001 哈尔滨，mcyang@hit.edu.cn）

摘 要：针对国内外对宽带卫星移动信道特性的研究中，缺少实测数据验证可用于系统关键技术的信道仿真模型这一问题，在从频域和时域两方面对宽带卫星移动信道频率选择性衰落的成因进行深入分析的基础上，基于多点散射理论建立了宽带频率选择性卫星移动信道的仿真模型，并通过典型环境下实测数据的统计特性进行验证. 仿真结果表明建立的信道仿真模型能够准确地模拟真实传输环境下的宽带频率选择性卫星移动信道的衰落特性.

关键词：卫星移动信道；衰落特性；频率选择性；传播散射理论

中图分类号：TN92 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2011)07－0046－05

Wideband frequency selective satellite mobile channel simulation model

ZHANG Jia-ming, YANG Ming-chuan, GUO Qing

(Communication Research Center, Harbin Institute of Technology, 150001 Harbin, China, mcyang@hit.edu.cn)

Abstract: Without enough measured data of channel statistics, studies on broadband satellite mobile channel modeling are still in the phase of exploring both at home and abroad. This paper analyzed the reasons of selective fading along broadband satellite mobile channel in time domain and frequency domain, and created a phase variable simulation model of wideband satellite mobile channel according to the multiple-point scattering theory. Verified with the statistics of the measured data from German Aerospace Center (DLR), under three kinds of typical environments, the model is proved to simulate the real transmission environment well.

Key words: satellite mobile channel; fading characteristic; frequency selective; multiple-point scattering theory

到目前为止，卫星移动通信系统已发展到第三代. 一、二代称之为窄带系统，提供以话音和数据为主的业务. 尽管第三代卫星移动通信系统规范目前尚未形成，但有一点是肯定的，就是它要支持无线多媒体通信和高速宽带 Internet 接入，因此也称为宽带卫星移动通信系统.

在宽带卫星移动信道中，随着数据速率的提高，系统的频谱带宽不断增大，信号带宽不再远小于信道相干带宽，接收信号多径分量中不同频率的分量具有不同的增益和相位. 多径时延不能被忽略，或被简单当成相等的值，必须考虑不同散射波之间的时延差值[1－2]，所以宽带卫星移动信道的衰落特性比窄带信道更复杂，必须对每条多径信道进行建模.

文献[3]中介绍了一种对频率选择性信道衰落机理进行建模的简单方法，提出的广义平稳非相关散射(WSSUS, Wide Sense Stationary Uncorrelated Scattering)模型认为具有不同时延的到达信号是非相关的. 文献[4]则将 WSSUS 信道模型用于宽带移动无线通信系统中分析系统的性能. 文献[5－6]在分析卫星移动信道特点的基础上，对宽带卫星移动信道的频率选择性衰落特性进行了计算机仿真. 文献[7]从多径衰落、阴影效应和多普勒效应 3 个方面研究了宽带卫星移动信道的频率色散特性和多普勒功率谱非对称特性.

信道模型准确性最有效的验证方法是将模型的统计特性与真实环境中测试数据的统计特性进

收稿日期：2010－01－24.
基金项目：国家自然科学基金资助项目(60532030).
作者简介：张嘉铭(1987—)，男，硕士研究生；
郭 庆(1964—)，男，教授，博士生导师.

行对比. 尽管文献[6－7]对宽带频率选择性卫星移动信道的衰落特性进行了研究，但其研究结果并没有通过实测数据进行验证. 因此，本文在深入分析宽带卫星移动信道频率选择性衰落成因及其特性的基础上，利用多点散射理论建立宽带频率选择性卫星移动信道衰落特性的相位变化仿真模型，并通过德国航空研究中心[8]（German Aerospace Center，DLR）在不同典型环境下的实测数据统计特性对其进行验证，证明该仿真模型可用于未来宽带卫星移动通信系统理论分析和关键技术研究.

1　卫星移动信道频率选择性衰落成因分析

卫星移动通信环境中总是存在散射和反射体，使得信道总是处于不停变化的环境中，从而影响信号的幅度、相位、时延以及入射角，造成接收信号的起伏很大. 频率选择性衰落是指不同频率信号在散射信道中传输时，会经历不同随机起伏的现象，其本质是信道冲激响应函数随输入信号频率的变化而变化，和信号经历的各径时延有关. 如果发送信号的速率较小，那么它在频域中的带宽很窄. 此时，发送信号中所有频率分量经历相同的衰落，信号经过信道后将不会产生失真，这时的衰落是平坦性衰落. 相反，随着发送信号的速率不断提高，信号带宽在继续增加的同时，信号频谱中边缘频率的分量将会逐渐失真. 这样，信道就对信号产生了滤波作用，即不同频率的分量有不同的衰减系数，频率上很接近的分量衰落也很接近，而频率上相隔很远的分量衰落相差也很大.

在数字通信中，多径传播条件下的接收信号会产生时延扩展，时延扩展值的大小将决定信号是否经历频率选择性衰落. 如果发送脉冲的持续时间为 T，信道的多径时延扩展为 T_m，则到达接收端脉冲就会扩展成 $T + T_m$. 如果多径时延扩展 $T_m \ll T$，则信号的多径分量在时间上大致重叠在一起. 这些重叠的多径分量相互干涉能造成窄带衰落，但脉冲在时间上没有明显扩展，因此对后续脉冲的干扰很小. 而当多径时延扩展 $T_m \geqslant T$ 时，经历了多个可分辨径衰落的信号在通过信道后，由于多径时延扩展会产生严重的波形失真衰落，导致前后相邻的数字码元之间相互重叠，出现码间干扰，使系统误码率增加.

2　宽带频率选择性卫星移动信道的冲激响应模型

描述频率选择性衰落信道的最常用的概率统计模型是广义平稳非相关散射模型[3]. 所谓广义平稳，是指信道的冲激响应是广义平稳的，具有不同多普勒频率的多径之间是不相关的；所谓非相关散射是指具有不同传播时延的多径之间是不相关的. 冲激响应函数包含了用于分析无线信道传播特性的信息，可用于比较不同移动通信系统的性能，能够表征宽带信道的衰落特征.

定义 $h(t,\tau)$ 为时变频率选择性卫星移动信道在 $t-\tau$ 时刻施加的冲激在 t 时刻的信道响应，其表达式为

$$h(t,\tau) = \sum_{l=1}^{N} a_l(t,\tau)\exp[\mathrm{j}\theta_l(t,\tau)]\delta(\tau-\tau_l(t)).$$

式中：l 是信道指数；N 为多径分量的数目；$\{a_l(t,\tau)\}_{l=1}^{N}$、$\{\theta_l(t,\tau)\}_{l=1}^{N}$ 和 $\{\tau_l(t)\}_{l=1}^{N}$ 分别是随机信道的幅度、相位和时延（通常设第一径为直射径，也为参考径，$\tau_1 = 0$）分量.

如果在给定 1 个冲激响应的前提下，多径是由于不同散射源产生的，则这些径之间是相互独立的，因而可认为 $\{a_l(t,\tau)\}_{l=1}^{N}$ 是统计独立的随机过程. 对于随机时变的无线移动信道，要求信道冲激响应的多维概率密度函数是非常困难的. 在实际应用中，通常用冲激响应的自相关函数或它的其中 1 个傅里叶变换来表征宽带频率选择性卫星移动信道.

以冲激响应为基础可以得到一系列表征频率选择性卫星移动信道的特性函数，如散射函数、频率间隔－时间间隔相关函数、功率时延谱和多普勒功率谱等[9].

在 WSSUS 的假设下，$h(t;\tau)$ 的自相关函数 $\phi_h(t_1,t_2;\tau_1,\tau_2)$ 为

$$\phi_h(t_1,t_2;\tau_1,\tau_2) = 0.5E[h^*(t_1;\tau_1)h(t_2;\tau_2)] = \phi_h(\Delta t;\tau_1,\tau_2) = \phi_h(\Delta t;\tau_1)\delta(\tau_1-\tau_2).$$

当 $\Delta t = 0$ 时，$\phi_h(\tau) = \phi_h(\tau,0)$ 为信道的功率时延谱，描述了信道平均接收功率随多径时延 τ 的变化关系.

$$\phi_h(\tau) = \phi_h(\tau;0) = 0.5E[h^*(\tau;t)h(\tau;t)].$$

通常，功率时延谱呈指数形式衰减，其数学表达式为

$$\phi_h(\tau) = (2\tau_{\mathrm{rms}})^{-1}\exp(-\tau/\tau_{\mathrm{rms}}),\ \tau \geqslant 0. \quad (1)$$

式中：τ_{rms} 为信道的均方根时延扩展.

将 $h(\tau,t)$ 对 τ 进行傅立叶变换，得到信道的时变转移函数 $H(f,t)$ 为

$$H(f,t) = \int_0^{\infty} h(\tau,t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f\tau}\mathrm{d}\tau.$$

如果 $h(\tau,t)$ 为 WSSUS 高斯随机过程，则 $H(f,t)$ 也是 WSSUS 高斯随机过程，因此它关于 f

和 t 的自相关函数 $\phi_H(\Delta f,\Delta t)$ 为

$$\phi_H(\Delta f,\Delta t) = 0.5E[H^*(f;t)H(f+\Delta f;t+\Delta t)].$$

对 $\phi_H(\Delta f,\Delta t)$ 关于 Δf 和 Δt 进行二维傅里叶变换可以得到信道的散射函数 $S(\tau,f_d)$ 为

$$S(\tau,f_d) = \iint \phi_H(\Delta f;\Delta t)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi\tau\Delta f}\mathrm{e}^{-\mathrm{j}2\pi f_d\Delta t}\mathrm{d}\Delta f\mathrm{d}\Delta t .$$

散射函数也称为时延 - 多普勒功率谱,是二维函数,作为时域变量(时延 τ) 及频域变量(多普勒频率 f_d) 的函数,显式地表征了信道的时域和频域色散性质. 通过散射函数也可以描述出多径色散移动信道中存在的两类扩展,即多径效应引起的在时域上的时延扩展和多普勒效应引起的在频域上的多普勒扩展.

3 基于多点散射理论的频率选择性卫星移动信道仿真模型

在许多文献中,WSSUS 模型被认为是能够表征频率选择性信道的时延扩展和多普勒扩展的最简单随机过程. 当信道中不相关的路径数目足够大时,信道冲激响应的二次分量可以表示为高斯广义平稳非相关散射. 所以实际仿真时常用高斯广义平稳非相关散射模型来模拟各种实际的宽带无线多径信道. 本文将采用基于多点散射理论的方法,建立宽带频率选择性卫星移动信道的相位变化仿真模型.

在宽带频率选择性卫星移动信道中,由于建筑物和树木等的反射、散射及衍射作用,载荷信息的无线电波会经由多条路径到达移动终端. 模型设计时认为:

1) 接收信号主要由直射分量和散射分量组成;

2) 多径分量的多普勒功率谱满足经典的 Jakes 模型;

3) 多径分量的多普勒功率谱与功率时延谱互相独立.

这样基于 WSSUS 假设的宽带卫星移动信道相位变化仿真模型的冲激响应 $h(\tau,t)$ 可以表示为

$$h(\tau,t) = \mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi f_d t}\delta(\tau) + \lim_{N\to\infty}\frac{1}{\sqrt{N}}\sum_{m=1}^{N}\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\theta_m+2\pi f_{d_m}t)}\delta(\tau-\tau_m).$$

其中: N 为到达移动台的散射分量数目; f_d 为直射分量的多普勒频移; θ_m 表示第 m 个散射分量到达移动台的初始相位, θ_m 相互独立且在 $[0,2\pi]$ 范围内均匀分布; τ_m 独立同分布,为第 m 个散射分量到达移动台的多径时延,其概率密度函数 $f(\tau) \triangleq f(\tau_m)$ 由信道的功率时延谱确定[10],表达式如下:

$$f(\tau) = \phi_h(\tau)/\int_{-\infty}^{+\infty}\phi_h(\tau')\mathrm{d}\tau'. \quad (2)$$

f_{d_m} 独立同分布,为第 m 个散射信号到达移动台的多普勒频移,其概率密度函数 $f(f_d) \triangleq f(f_{d_m})$ 可通过信道的多普勒功率谱得到,如下所示:

$$f(f_d) = S(f_d)/\int_{-\infty}^{\infty}S(f'_d)\mathrm{d}f'_d. \quad (3)$$

将式(1)和经典 Jakes 功率谱密度分别代入式(2)和(3),得到散射信号的路径时延 τ 和多普勒频移 f_d 的概率密度函数为

$$f(\tau) = \tau_{\mathrm{rms}}^{-1}\exp(-\tau/\tau_{\mathrm{rms}}),\ \tau \geqslant 0 ,$$

$$f(f_d) = \left(\pi f_{d_{\max}}\sqrt{1-((f_d-f_c)/f_{d_{\max}})^2}\right)^{-1}.$$

如果已知最大多径时延 $\tau_{\max}$,则 τ 的概率密度函数可以表示为[11]

$$f(\tau) = \begin{cases}\dfrac{\alpha}{1-\mathrm{e}^{-\alpha\tau_{\max}}}\mathrm{e}^{-\alpha\tau}, & 0\leqslant\tau\leqslant\tau_{\max},\ \alpha=\dfrac{3\ln 10}{\tau_{\max}};\\ 0, & \text{其他.}\end{cases}$$

4 仿真模型验证

信道模型准确性最有效的验证方法,就是将模型的统计特性与真实环境中测试数据的统计特性进行对比. 尽管文献[6-7]对宽带频率选择性卫星移动信道的衰落特性进行了研究,然而其研究结果并没有通过实测数据进行验证. 下面本文将利用德国航空研究中心(DLR)在山区、公路、城区 3 种典型环境下实测数据的统计特性,验证本文仿真模型的正确性.

首先从理论上进行验证. 依据最小均方误差准则,定义 DLR 通过实测数据得出的信道功率时延谱 $\phi_h(\tau)$ 与仿真模型得出的信道功率时延谱 $\tilde{\phi}_h(\tau)$ 之间的均方误差为

$$\min_N e_{\phi_h} = \tau_{\max}^{-1}\int_0^{\tau_{\max}}[\phi_h(\tau)-\tilde{\phi}_h(\tau)]^2\mathrm{d}\tau. \quad (4)$$

其中 $\tau_{\max}$ 是 1 个适当的时间间隔,在 $[0,\tau_{\max}]$ 内分析 $\tilde{\phi}_h(\tau)$ 的性能. 最小均方误差法的出发点就是选择适当的多径散射分量数目 N 使式(4) 最小. 通过仿真得出信道功率时延谱的最小均方误差 ε_{ϕ_h} 与 N 之间的关系,即当 N 逐渐增大时, $\tilde{\phi}_h(\tau)\to\phi_h(\tau)$,并且当 $N\geqslant 128$ 时可以得到 1 个好的吻合 $\tilde{\phi}_h(\tau)\approx\phi_h(\tau)$,表 1 是仿真模型参数.

通过信道功率时延谱验证仿真模型的正确性. 散射分量数目 N 选择为 128,其它参数根据德国航空研究中心的测试结果[8] 如表 1 所示时,采用Monte Carlo 仿真得到的基于多点散射理论的城市环境的宽带卫星移动信道功率时延谱如图 1 所示. 其中,图2是DLR通过测试得到的城市环

表 1　仿真模型参数

参数	卫星轨道高度/km	通信仰角/(°)	载波频率/GHz	带宽/MHz	移动台的移动速度/(km · h)	山区环境下的最大多径时延/ns	公路环境下的最大多径时延/ns	城区环境下的最大多径时延/ns
数值	35 786	25	1.82	30	40	400	400	600

境的信道功率时延谱. 通过比较图 2 和图 1 可以看出两者基本吻合. 在城区环境,直射分量状态在 25 s 后变成阻挡状态,信号衰减约 15 ~ 30 dB. 图 3 为 DLR 通过测试得到的山区环境信道功率时延谱. 图 4 为仿真得到的山区环境的信道功率时延谱. 通过比较图 4 和图 3 可以看出两者基本吻合. 图 5 为 DLR 通过测试得到的公路环境信道功率时延谱. 图 6 为仿真得到的公路环境的信道功率时延谱. 通过比较图 6 和图 5 可以看出两者基本吻合. 在高速公路环境下,由于电磁波被移动台金属良好反射,会出现多次反射.

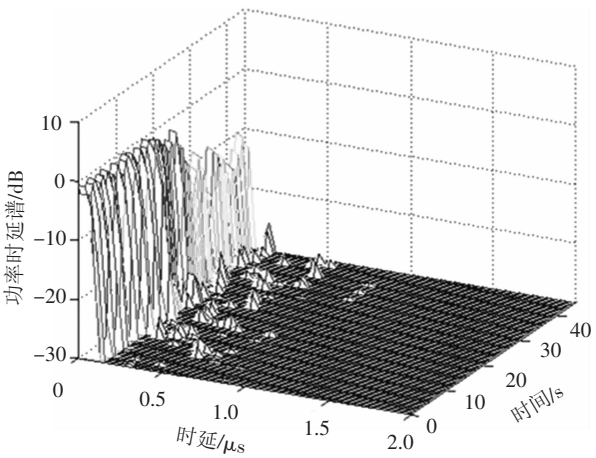


图 1　仿真的城区环境功率时延谱

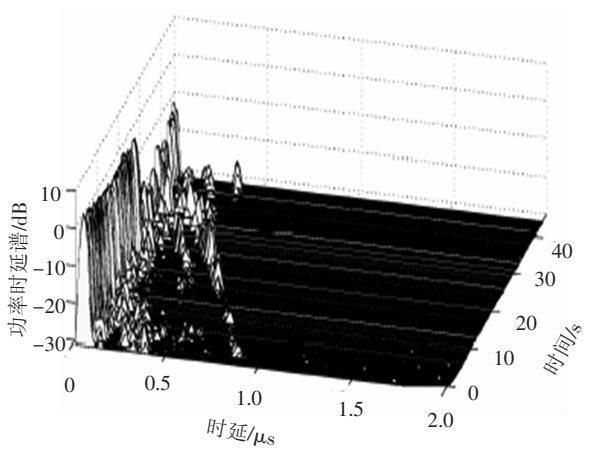


图 2　DLR 实测的城区环境功率时延谱

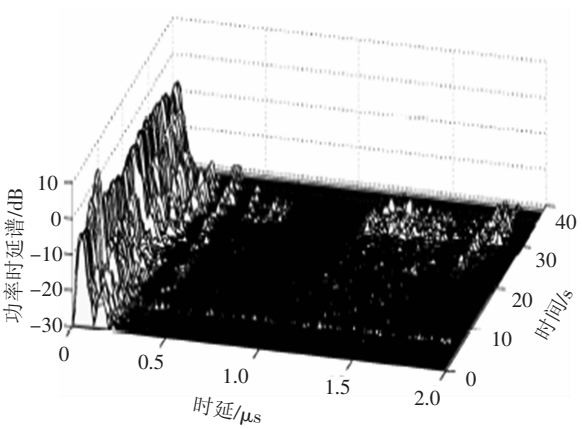


图 3　DLR 实测的山区环境功率时延谱

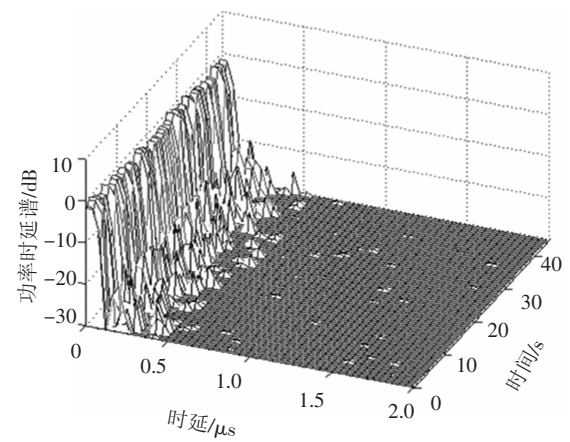


图 4　仿真的山区环境功率时延谱

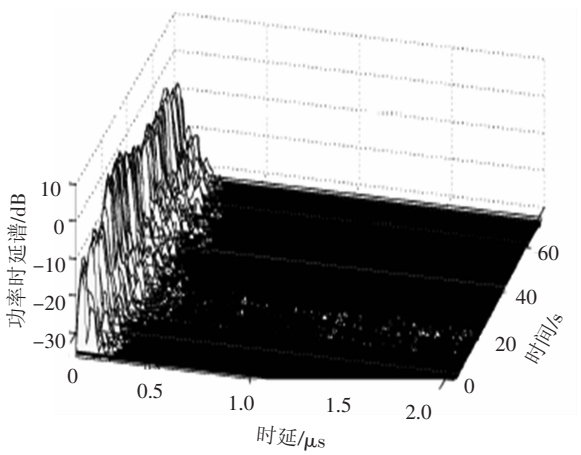


图 5　DLR 实测的公路环境功率时延谱

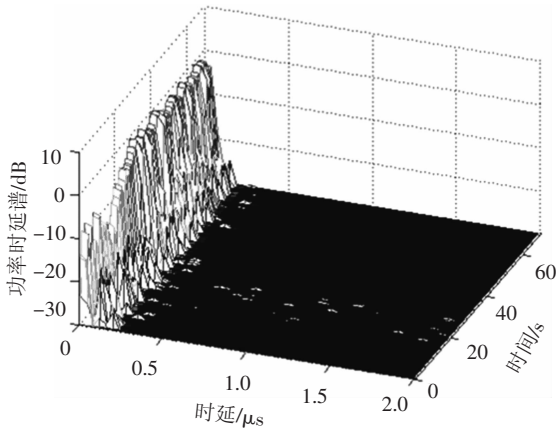


图 6 仿真的公路环境功率时延谱

综上所述,通过与德国航空研究中心实测数据的统计特性进行比较,可以看出本文建立的基于多点散射理论的相位变化仿真模型能很好地模拟真实传输环境的宽带频率选择性卫星移动信道的衰落特性. 相位变化仿真基于传播散射原理,需要对大量的散射波(128 条)进行统计,因而更能直观、真实的描述宽带频率选择性卫星移动衰落信道的多径传播特性.

5 结 论

基于多点散射理论建立的宽带频率选择性卫星移动信道衰落特性的相位变化仿真模型,通过与德国航空研究中心在山区、公路、城区 3 种典型环境的实测数据统计特性进行比较验证,证明该模型能很好地模拟真实环境的信道特性,可用于未来宽带卫星移动通信系统理论分析及其关键技术的研究.

参考文献:

[1] IPPOLITO L J. Satellite communications systems engineering, atmospheric effects, satellite link design and system performance[M]. West Sussex: John Wiley and Sons, Ltd, 2008.

[2] 郝学坤, 马文锋, 张更新, 等. 准同步宽带 CDMA 卫星移动通信分析[J]. 电子科技大学学报, 2004, 33(4): 378 – 382.

[3] BELLO P A. Characterization of randomly time-variant linear channels[J]. IEEE Trans on Commuications Systems, 1963, 11(4): 360 – 393.

[4] BUG S, WENGERTER C, GASPARD I, *et al*. WSSUS-channel models for broadband mobile communication systems[C]//Conference on IEEE 55th Vehicular Technology 2002. Piscataway: IEEE, 2002: 894 – 898.

[5] DOTTLING M, ERNST H, WIESBECK W. A new wideband model for the land mobile satellite propagation channel [C]//International Conference on Unibersal Personal Communications, ICUPC ' 98. Piscataway: IEEE,1998: 647 – 651.

[6] 郝学坤, 张更新. 宽带移动卫星通信信道的研究[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(6): 15 – 19.

[7] 雍明远, 梁俊, 袁小刚. 宽带移动卫星通信信道模型研究[J]. 通信技术, 2009, 42(1): 65 – 67.

[8] JAHN A. Propagation considerations and fading countermeasures for mobile multimedia services[J]. International Journal of Satellite Communications, 2001, 19(3): 223 – 250.

[9] 徐以涛, 王立军. WSSUS 时变多径信道的统计特性与仿真[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2003, 14(5): 22 – 25.

[10] YIP K W, NG T S. Efficient simulation of digital transmission over WSSUS channels[J]. IEEE Trans on Communications, 1995, 43(12): 2907 – 2913.

[11] HOEHER P. A statistical discrete-time model for the WSSUS multipath channel[J]. IEEE Trans on Vehicular Technology, 1992, 41(11): 461 – 468.

(编辑 张 宏)