

doi: 10.7690/bgzdh.2018.10.019

美军 MUOS 系统通信链路无线信道特性分析

刘万洪, 杨志飞, 张涛涛

(中国洛阳电子装备试验中心, 河南 洛阳 471003)

摘要: 针对美军移动用户目标系统(mobile user objective system, MUOS)卫星通信无线信道传输特性分析问题, 运用统计模型分析策略对其进行研究。在分析美军 MUOS 系统(移动用户目标系统)的 UHF 频段(ultra high frequency band)和 Ka 频段(K-above band)2 种通信链无线信道传播损耗、多径衰落特性等的基础上, 研究 MUOS 系统 2 种通信链路无线信道传播特性。分析结果表明: UHF 频段无线信道具有复杂的时变衰落特性, 其传播特性受移动终端所处的物理环境、场景影响较大; Ka 波段与 UHF 频段相比干扰较小, 其传播特性主要受到大气效应的影响, 其中雨衰影响最为显著。该研究可为后续开展该系统链路干扰技术研究提供参考。

关键词: MUOS; 卫星通信; UHF 通信链路; Ka 通信链路; 无线信道特性

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Analysis of Wireless Channel Characteristics of Communication Link in US Army MUOS System

Liu Wanhong, Yang Zhifei, Zhang Taotao

(China Luoyang Electronic Equipment Test Center, Luoyang 471003, China)

Abstract: For the problem of analysis of transmission characteristics of satellite communication wireless channel for military mobile user objective system, this paper uses statistical model analysis method to study it. Based on the research of the UHF frequency band and the Ka frequency band communication links of MUOS system, the propagation characteristics of the channel propagation loss and multipath fading are analyzed. It shows that the UHF band wireless channel is a complex time-varying feature. Its propagation characteristics are greatly affected by the physical environment and scene of the mobile terminal. Ka band compared with the UHF band, its propagation characteristics are mainly affected by the atmospheric effects, and the rain attenuation effect is the most significant, these characteristics have an important influence on the transmission capacity of MUOS system.

Keywords: MUOS; satellite communication; UHF communication link; Ka communication link; wireless channel characteristics

0 引言

美军 MUOS 通信链路主要包括空间段、地面段和用户段 3 部分。用户终端和卫星之间的通信链路为 UHF 频段, 卫星与地面无线接入及交换设备之间的通信链路为 Ka 频段。作战使用时, 美军 MUOS 移动终端通过 UHF 上行链路向卫星发送信号, 卫星将接收到的信号数字化后, 通过 Ka 频段下行链路传送到无线接入设施(radio access facility, RAF)。RAF 将信号解调、译码后, 通过一系列交换及处理, 送到覆盖目标用户的 RAF, 再通过 Ka 频段上行通信链路发给卫星, 卫星将信号处理后变频到 UHF 频段, 最后通过 UHF 下行链路发给目标用户。

在美军 MUOS 系统通信中, 主要通信链路包含

了 2 条上行链路和 2 条下行链路。除了频段不同之外, 在 UHF 频段通信链路中, 二者的用户终端也存在位置变动情况, 而在 Ka 频段的链路中, 星地之间均处于相对静止状态, 所以二者传输特性有较大区别。笔者分析美军 MUOS 系统通信链路传输特性, 为研究系统性能、作战中采取应对措施等提供参考^[1-2]。

1 卫星通信链路无线信道模型^[2-3]

卫星通信链路传输特性主要考虑路径损耗、多径效应、阴影衰落和多普勒特性等因素。

1.1 路径损耗

路径损耗是指星地链路之间的信号能量衰减, 可用自由空间传播模型来反映:

收稿日期: 2018-07-18; 修回日期: 2018-08-25

作者简介: 刘万洪(1971—), 男, 陕西人, 硕士, 从事电子装备试验仿真技术研究。

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \quad (1)$$

其中： P_t 为星地链路发射端的发射信号功率； P_r 为接收端信号功率； G_t 为发射天线增益； G_r 为接收天线增益； d 为星地间距离，m； L 为损耗因子； λ 为信号波长，m。

发射与接收功率之差则为路径损耗，表示为(自由空间传播)：

$$L(\text{dB}) = 10 \lg \frac{P_t}{P_r} = -10 \lg \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2} \right] \quad (2)$$

1.2 多径效应

信号从星到地因产生折射、反射和散射等形成多条传播路径，到达地面接收天线端会相互干涉，从而造成接收信号幅度及相位的衰落变化，产生多径效应，依据各种情况则服从 Rayleigh、Rician、Loo、Corazza 及 Suzuki 分布。

1) Rayleigh 分布。

当信号被高山、大型建筑物等阻挡时，信号包络服从 Rayleigh 分布。其概率密度函数为

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3)$$

式中： σ 为包络检波之前所接收的电压信号的均方根值； σ^2 为包络检波之前接收信号包络的时间平均功率。

2) Rician 分布。

当地面接收端位于树木稀少的地区或者海上环境等开阔地时，信号包络服从 Rician 分布。其概率密度函数为

$$p(r) = \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2 + z^2}{2\sigma^2}\right) \cdot I_0\left(\frac{rZ}{\sigma^2}\right) \quad (4)$$

其中： σ^2 为平均多径功率； Z 为直视信号分量； $I_0(\cdot)$ 为第一类零阶修正贝塞尔函数，

$$I_0(x) = \int_0^{2\pi} \exp(x \cos \phi) d\phi / (2\pi)$$

直视信号分量 Z 的功率 Z^2 与平均多径功率 σ^2 的比值 K 因子为

$$K(\text{dB}) = 10 \log \frac{Z^2}{\sigma^2} (\text{dB}) \quad (5)$$

3) Loo 分布。

当接收端位于较高植被覆盖区域，直视信号因遮挡产生阴影效应，多径信号服从 Rayleigh 分布。此时接收信号服从 Loo 分布：

$$r \exp(j\phi) = z \exp(j\phi_0) + w \exp(j\phi_1) \quad (6)$$

其中， ϕ_0 、 ϕ_1 服从均匀分布， w 服从 Rayleigh 分布，直视分量 z 服从 Lognormal 分布：

$$p(z) = \frac{1}{z\sqrt{2\pi d_0}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln z - \mu_0)^2}{2d_0}\right] \quad (7)$$

式中 μ_0 和 d_0 分别为均值和标准方差。

4) Corazza 分布。

当信号直视分量和多径分量均受阴影效应作用，接收信号包络 r 可看成是 2 个独立随机过程(莱斯过程与对数正态过程)的乘积，即为 Corazza 分布：

$$p_r(r) = \int_0^\infty \frac{1}{S} p_R\left(\frac{r}{S}\right) p_S(S) dS = \int_0^\infty P(r|S) p_S(S) dS \quad (8)$$

其中：

$$P(r|S) = \frac{r}{S^2 \sigma_R^2} \cdot \exp\left[-\frac{1}{2} \left(\frac{r^2}{S^2 \sigma_R^2} + 2K\right)\right] \cdot I_0\left(\frac{r}{S \sigma_R} \sqrt{2K}\right) \quad (9)$$

$$p_S(S) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi d_0}} \cdot \exp\left(-\frac{(\ln S - \mu)^2}{2d_0}\right) \quad (10)$$

其中 $\sigma_R^2 = 1/2(K+1)$ ， K 为莱斯因子。

5) Suzuki 分布。

当在厚浓云层、阴雨连绵较差天气下，信号完全是阴影效应，接收信号服从 Suzuki 分布(由 Rayleigh 分布和 Lognormal 分布组成)：

$$p(r) = \int_0^\infty \frac{r}{\sigma_4^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_4^2}\right) \cdot \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_2\sigma_4}} \cdot \exp\left[-\frac{(\ln \sigma_4 - \mu_2)^2}{2\sigma_2^2}\right] d\sigma_4 \quad (11)$$

式中： σ_4 为瑞利分布中各高斯分量的标准差； μ_2 和 σ_2 分别为服从对数正态分布 Lognormal 信号包络 σ_4 的均值和标准差。由此可见，Suzuki 信道模型是瑞利分布 Rayleigh 信号包络的标准差 σ_4 ，在服从对数正态分布 Lognormal 下积分得到的，实现了从局部特性到全局特性的转化。

2 UHF 频段信道特性分析^[4-6]

UHF 频段通信链路是 MUOS 系统链路的重要组成部分，兼容了原先的 UFO 窄带卫星通信终端接入和现有采用 WCDMA 的 UHF 频段通信接入。

2.1 技术性能

1) UFO 卫星系统性能:

- ① 频率: 290~320 MHz(上行), 240~270 MHz(下行);
- ② 调制: BPSK;
- ③ 带宽: 555 kHz;
- ④ 信道数: 39 个(包含 21 个窄带、17 个中继和 1 个舰队广播);
- ⑤ 信道宽度: 5 kHz(窄带), 25 kHz(中继);
- ⑥ 通信体制: TDMA/FDMA;
- ⑦ 波束类型: 全球波束;
- ⑧ 数据速率: 75~2 400 bit/s;
- ⑨ 安全机制: 数据加密。

同时,采用星上搭载 UFO 通信载荷的方式实现了与 MUOS 通信体制的兼容。

2) MUOS 系统 UHF 链路性能:

- ① 频率: 300~320 MHz(上行), 360~380 MHz(下行);
- ② 调制: 正交可变扩频因子(orthogonal variable spreading factor, OVSF);
- ③ 带宽: 20 MHz;
- ④ 信道宽度: 5 MHz;
- ⑤ 通信体制: WCDMA;
- ⑥ 波束类型: 16 个 WCMA, 1 个全球;
- ⑦ 数据速率: 2.4~384 kbit/s;
- ⑧ 安全机制: 数据加密, 双向鉴权, 完整性检查。

2.2 信道特性分析

UHF 频段信号穿透力强,适用于战术卫星通信,但由于移动接收终端所处的地理环境、地物场景相差较大,易受电离层闪烁效应、多径衰落、多普勒频移和阴影效应的影响,信道衰落较为严重,因此信道特性较为复杂多变。

由于移动接收终端所处环境对信道统计特性影响较大,为便于对其进行细致研究,可从无阴影效应和有阴影效应的传播情况加以分析。

如果接收端处于机载方式或车载开阔区域,此时直射分量信号较强,一般认为信道为莱斯信道。而当直射分量和多径分量受阴影遮蔽效应影响时,由于受遮蔽效果的不同,传播场景可分为部分阴影和全阴影 2 种遮蔽情况加以分析。

由于信道衰落类型之间彼此独立,各种效应均

有各自的莱斯因子以表征信道特性,而计算出各种效应(电离层闪烁、多径、阴影)综合影响信道特性的等效莱斯因子,可获得不同传播情况的莱斯因子。

2.2.1 存在 2 种效应时等效莱斯因子

假设 UHF 信道中电离层闪烁及多径效应同时存在,则等效莱斯因子为

$$R_e = \frac{R_s R_m}{R_s + R_m + 1} \quad (12)$$

其中: R_e 为等效莱斯因子; R_s 为电离层闪烁效应莱斯因子; R_m 为多径效应莱斯因子。

显然,若信道中只有其中效应之一,则 R_e 即为 R_s 与 R_m 其中之一。

2.2.2 存在 3 种效应时等效莱斯因子

当 UHF 信道中同时存在电离层闪烁、多径和阴影 3 种效应,阴影效应为 Loo 型时,则此时的等效莱斯因子表示为

$$R_e = \frac{a G_s}{b G_s + \frac{1}{R_m}} \quad (13)$$

其中: G_s 为阴影遮蔽效应下的平均路径损耗; a 为电离层闪烁效应对直射信号功率的影响因子; b 为电离层闪烁效应对随机散射信号功率的影响因子。且

$$a = R_s / (R_s + 1);$$

$$b = 1 / (R_s + 1)。$$

当阴影效应为 Lutz 型,此时的等效莱斯因子为

$$R_e = \frac{\text{pcnt}(\frac{R_s}{R_s + 1})}{(1 - \text{pcnt})G_s + \text{pcnt}(\frac{1}{R_m}) - \text{pcnt}(\frac{R_s}{R_s + 1})} \quad (14)$$

其中 pcnt 为无阴影遮蔽状态的时间百分比。

通过以上分析,在 UHF 频道卫星通信作战使用中,结合接收端场景特点,必须综合分析考量各种效应影响。

3 Ka 频段信道特性分析^[7-11]

美军 MUOS 系统中, Ka 频段链路主要是将星上接收到的 UHF 链路信号传送至 RAF,并把 RAF 处理后的信号通过 Ka 链路发送到星上。采用 Ka 频段与 UHF 频段交链技术,实现了从 UHF 频段到 Ka 频段的链路平滑。与 UHF 链路相比, Ka 频段较高,信道性能和特点差异也更大。

应用生态学报, 2004, 15(6): 1056-1062.

[7] SALTELLI A, TARANTOLA S, CHAN K P S. A quantitative model-independent method for global sensitivity analysis of model output[J]. *Technometrics*, 1999, 41(1): 39-56.

[8] 汪宏伟, 汪玉, 赵建华. EFAST 法在管路系统冲击响应中的应用研究[J]. *振动与冲击*, 2010, 29(4): 197-199.

[9] SOBOL I M. Sensitivity estimates for nonlinear mathematical models[J]. *MMCE*, 1993, 1(4): 407-414.

[10] SOBOL I M. Global sensitivity indices for nonlinear mathematical models and their Monte Carlo estimates[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2001, 55(1-3): 271-280.

[11] CUKIER R I, LEVINE H B, SHULER K E. Nonlinear sensitivity analysis of multiparameter model systems[J].

Journal of Computational Physics, 1978, 81(1): 1-42.

[12] LU Y C, MOHANTY S. Sensitivity analysis of a complex proposed geologic waste disposal system using the Fourier Amplitude sensitivity test method[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2001, 72(3): 275-291.

[13] PHILIPPE L, ERIC F, THIERRY A M. A node pruning algorithm based on a Fourier amplitude sensitivity test method[J]. *Neural Networks, IEEE Transactions on*, 2006, 17(2): 273-293.

[14] 芮筱亭, 陆毓琪, 王国平, 等. 多管火箭发射动力学仿真与试验测试方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003: 145, 164.

[15] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008: 153-154.

(上接第 91 页)

3.1 技术性能

- 1) 频率: 30 ~ 31 GHz(上行), 20.2 ~ 21.2 GHz(下行);
- 2) 调制: 8PSK;
- 3) 带宽: 372 MHz(上行), 450+450*2(下行);
- 4) 多址方式: FDMA, WCDMA;
- 5) 天线: Ka 频段 18.4 m 天线;
- 6) 极化方式: 右旋园极化, 左旋园极化。

3.2 信道特性分析

与 UHF 频段相比, Ka 波段信道干扰较小, 而且带宽高。在美军 MUOS 系统中, Ka 频段只有星地链路, 其特性主要受大气效应影响(包括雨、雪、冰晶、云雾的吸收与散射等)。其接收信号的幅度、相位均服从高斯分布。其概率密度函数为:

$$p_w(r_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w} \exp\left\{-\frac{(r_w - m_w)^2}{2\sigma_w^2}\right\}; \quad (15)$$

$$p_w(\phi_w) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_w'} \exp\left\{-\frac{(\phi_w - m_w')^2}{2\sigma_w'^2}\right\}。 \quad (16)$$

其中: $p_w(r_w)$ 为信号幅度概率密度函数; $p_w(\phi_w)$ 为信号相位的概率密度函数; σ_w^2 、 $\sigma_w'^2$ 分别为信号幅度和相位的方差; m_w 、 m_w' 分别为相应的均值。

在 Ka 频段链路中, 云雾会使信号产生衰落特性, 衰落程度受云雾里边水的含量以及温度等因素影响。但是云雾的影响比雨滴要小, 而在波束区域边缘或高纬度区域的地方, 必须考虑云雾的影响。雨衰对 Ka 波段通信链路影响最为显著, 需要作为一个重要因素加以考虑, 降雨对信号的影响主要受地面位置、降雨强度、信号频率以及天线极化等因

素影响, 而干雪和冰粒的影响基本不用考虑。

4 结束语

MUOS 系统作为美军卫星通信系统的重要组成部分, 在实际作战使用中为美军提供了全球无缝通信覆盖能力。美军 MUOS 卫星通信无线信道特性对作战中的信息传输能力具有重要影响。研究 MUOS 系统 UHF 频段、Ka 波段传播特性, 对后续开展针对该系统链路干扰技术研究具有重要作用。如何针对其无线通信链路特点, 在作战中采取相应对抗措施, 是下一步需要研究的重点。

参考文献:

[1] 张小辉, 于坚, 陈建华. UHF 频段军事卫星通信及其信道的仿真研究[J]. *军事通信技术*, 2010, 31(3): 72-75.

[2] 倪娟, 黄国策, 陈强. UHF 频段卫星移动通信建模与仿真[J]. *电视技术*, 2012, 36(23): 102-105.

[3] 郝谢东, 刘爱军, 张邦宁. UHF 卫星信道质量分析与评估算法研究[J]. *信号处理*, 2007(4A): 369-372.

[4] 袁涛. 卫星信道建模及其仿真方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014: 35-41.

[5] 胡君. 卫星移动通信信道研究及性能仿真[D]. 成都: 电子科技大学, 2005: 23-25.

[6] 杨明川, 郭庆, 王振永. 阴影环境下陆地移动卫星信道模型及仿真研究[J]. *遥测遥控*, 2007, 28(3): 20-23.

[7] 牛和昊, 何元智. Ka 段卫星通信信道建模及性能仿真[J]. *电波科学学报*, 2013, 28: 183-185.

[8] 王艳岭, 达新宇. Ka 频段卫星通信分集和自适应抗雨衰技术[J]. *电讯技术*, 2010, 50(9): 125-130.

[9] 于森, 康健. Ka 频段卫星通信系统雨衰混合补偿算法[J]. *吉林大学学报*, 2015, 33(1): 33-37.

[10] 苏一栋, 陈树新, 林诚. 临近空间 Ka 频段信道建模[J]. *空军工程大学学报*, 2011, 12(5): 76-79.

[11] 王艳岭, 达新宇. 一种改进的 Ka 频段雨衰减预测模型[J]. *电讯技术*, 2010, 50(1): 53-56.