

doi: 10.7690/bgzdh.2018.10.020

基于 EFAST 法的多管火箭射击密集度全局灵敏度分析

沙赵明, 于存贵

(南京理工大学机械工程学院, 南京 210094)

摘要: 为定量分析各种随机因素(弹、炮、气象环境等)对射击密集度的影响程度, 对多管火箭射击密集度的影响因素进行全局灵敏度分析。基于火箭飞行动力学方程建立火箭弹落点计算模型, 采用傅里叶幅值灵敏度检验扩展法(extended Fourier amplitude sensitivity test, EFAST)对落点计算模型进行全局灵敏度分析, 并对某 122 mm 多管火箭炮进行分析计算。分析结果表明: 火箭弹的质量误差及弹体的起始扰动是影响射击密集度的主要因素, 各随机因素参数间存在一定的交互作用, EFAST 计算量较小、结果直观清晰、便于分析。

关键词: 多管火箭炮; 射击密集度; 随机因素; 灵敏度分析; 傅里叶幅值灵敏度检验扩展法

中图分类号: TJ713 **文献标志码:** A

Global Sensitivity Analysis for Affecting Factors of Firing Dispersion of Multiple Launch Rockets System Based on EFAST Method

Sha Zhaoming, Yu Cungui

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: To analyze the influence of random factors such (rocket, launcher, meteorological environment, etc.) on firing dispersion quantitatively, the global sensitivity analysis was adopted. The calculation model of rocket falling points was established based on the flight dynamics equations of rockets and a global sensitivity analysis method, namely the extended Fourier amplitude sensitivity test (EFAST), was introduced and applied to the parameter sensitivity analysis of the model. As an example, the global sensitivity analysis was carried out on a 122mm multiple launch rockets system. The analysis results show that the mass error and initial disturbances are the major factors influencing the firing dispersion; there are certain interactions between random factors in the model; EFAST has the advantages of minor calculation and the results are more intuitive, clearer and easier to analyze.

Keywords: multiple launch rockets system; firing dispersion; random factors; global sensitivity analysis; extended Fourier amplitude sensitivity test

0 引言

多管火箭武器是地面部队最为有效的面饱和打击武器, 具有射程远、威力大和机动性强等特点。随着火箭武器技术的不断发展, 现代多管火箭武器的射程显著提高。对于无控火箭, 在射没有提高射击密集度水平的情况下, 火箭武器的射程越大, 弹着点的散布就越大^[1]。射击密集度是评定散布大小的主要方法。影响射击密集度的因素很多, 例如弹丸起始扰动、初速误差、推力偏心、弹丸结构参数误差和风速等, 并且这些因素具有随机性和不确定性的特点; 因此, 为对无控火箭射击密集度进行控制、评价、优化, 需对影响火箭射击密集度的随机因素进行深入分析。

王国平等^[2]采用随机抽样技术生产随机因素的序列, 结合蒙特卡罗法建立了多管火箭武器系统密集度仿真技术; 郭锡福、王兆胜等^[3-4]研究表明, 随

机因素间存在一定的交互耦合作用, 各因素引起的误差项之间并不完全独立; 曹宁等^[5]采用均匀设计与逐步回归的方法, 分析了部分随机因素对射击精度的影响, 但是构建的线性回归模型忽略了问题的非线性。笔者在前人研究的基础上, 考虑到随机因素较多, 且随机因素参数之间存在相互作用以及模型的非线性, 引入参数灵敏度分析方法分析随机因素对射击密集度的影响。

参数灵敏度分析是评价因模型参数的不确定性引起模型结构特性变化程度的方法, 主要分为局部灵敏度分析和全局灵敏度分析^[6]。局部灵敏度分析考察单一参数发生变化时模型结果的变化量, 全局灵敏度分析考察多个参数的变化对模型结果产生的总的影响, 并分析每一个参数及参数之间的相互作用对模型结果的影响。傅里叶幅值灵敏度检验扩展法(extended Fourier amplitude sensitivity test, EFAST)^[7]是典型的定量全局灵敏度分析方法, 广泛

收稿日期: 2018-07-05; 修回日期: 2018-08-07

作者简介: 沙赵明(1992—), 男, 江苏人, 硕士, 从事兵器发射理论研究。

应用于各种领域，例如舰艇设备、生态模型、可靠性等^[6,8]。笔者将 EFAST 法应用于多管火箭射击密集度影响因素的分析中，并对某 122 mm 多管火箭炮的射击密集度进行了灵敏度分析，得到随机因素对该型火箭炮射击密集度的影响规律，证实了该方法的可行性，为多管火箭武器的小密集度设计和优化提供了理论依据。

1 傅里叶幅值灵敏度检验扩展法

EFAST 法是由 Saltelli 等结合 Sobol's 法^[9-10]和傅里叶振幅灵敏度检验法^[11](Fourier amplitude sensitivity test, FAST)的优点，提出的基于方差分解的全局敏感度分析方法^[7]。该方法的基本原理为选取合适的搜索曲线在由各参数组成的多维空间内搜索，将一组非线性相关整数频率分配给每个输入参数，并对每个输入参数引入具有共同独立变量 s 的搜索函数，使多参数函数模型变成只有独立参数 s 的周期函数。然后对该周期函数进行傅里叶分析，通过频谱曲线获得由每个参数及参数间的相互作用所引起模型结果的方差，该方差在模型总方差中所占的比例即为相应参数的灵敏度。其基本理论如下：

首先，在 k 维单元体 Ω^k 内，对于模型 $y=f(\mathbf{x})$ ，其中 $\mathbf{x}=(x_1, \dots, x_k)$ ， Ω^k 表示如下：

$$\Omega^k = \{x \mid 0 \leq x_i \leq 1; i=1, \dots, k\}。 \quad (1)$$

定义搜索函数：

$$x_i = g_i(\sin(w_i s)), \quad i=1, 2, \dots, k。 \quad (2)$$

式中：序列 $\{w_i\}$ 为人为设定的频率，满足非线性相关； s 是所有参数的独立参数，在 $(-\pi, \pi)$ 区间内等间隔取 N_w 个值，每个值对应一个样本， $N_w=2Mw_{\max}+1$ ，其中 M 通常取 4 或 6， w_{\max} 是序列 $\{w_i\}$ 中的最大值。为保证 s 变化时，由式(2)得到 x_i 和 x_i 一致，搜索函数必须满足如下方程组^[7]：

$$\pi\sqrt{1-u^2}f_i(g_i(u))\frac{dg_i(u)}{du}=1, \quad g_i(0)=0。 \quad (3)$$

式中： f_i 为 x_i 的概率密度函数。对于分布函数为 $F_i(x)$ 的参数，Lu 等^[12]认为其搜索函数应为：

$$x_i = F_i^{-1}\left(c + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(w_i s))\right)。 \quad (4)$$

将式(4)代入模型 $y=f(\mathbf{x})$ 便可得到：

$$f(s) = f[g_1(\sin w_1 s), g_2(\sin w_2 s), \dots, g_k(\sin w_k s)]。 \quad (5)$$

显然， $f(s)$ 是周期为 2π 的函数。对 $f(s)$ 进行傅里叶级数展开：

$$y = f(s) = \sum_{j=-\infty}^{+\infty} \{A_j \cos js + B_j \sin js\}。 \quad (6)$$

式中：

$$A_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \cos js ds,$$

$$B_j = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(s) \sin js ds,$$

$$j \in Z = \left\{ -\frac{N_w-1}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N_w-1}{2} \right\}。 \quad (7)$$

由于 s 在区间 $[-\pi, \pi]$ 内等隔取样，当取样足够多时， A_j 和 B_j 可由方程(8)近似获得：

$$A_j = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} f(s_k) \cos(js_k),$$

$$B_j = \frac{1}{N_w} \sum_{k=1}^{N_w} f(s_k) \sin(js_k)。 \quad (8)$$

傅里叶级数的频谱曲线定义为 $A_j = A_j^2 + B_j^2$ ，其中 $j \in Z$ ， $A_{-j} = A_j$ ， $B_j = -B_{-j}$ ， $A_j = A_{-j}$ 。由参数 x_i 不确定性所引起的模型结果方差为：

$$D_i = \sum_{p \in Z^0} \Lambda_{pw_i} = 2 \sum_{p=1}^M \Lambda_{pw_i}, \quad Z^0 = Z - \{0\}。 \quad (9)$$

模型的总方差为：

$$D = \sum_{j \in Z^0} \Lambda_j = 2 \sum_{j=1}^{+\infty} \Lambda_j。 \quad (10)$$

因此，计算 x_i 1 阶灵敏度为：

$$S_i = \frac{D_i}{D}。 \quad (11)$$

1 阶灵敏度表示输入参数 x_i 单独作用对模型输出总方差的贡献率，而要表示该参数与其他参数相互作用对输出的影响，则需采用全局灵敏度。计算 x_i 的全局灵敏度时，先给 x_i 设定一个频率 w_i ，为除 x_i 之外的其余所有参数设定一个较小的频率 w_{-i} 。通过计算 w_{-i} 在 pw_i 上所有频谱的值，即可得到偏方差 D_{-i} ，它包含了除 x_i 外所有参数及参数之间相互作用的影响。因此，计算参数 x_i 的总灵敏度公式^[13]为：

$$S_i^T = 1 - \frac{D_{-i}}{D} = \frac{\sum_{p=1}^M (A_{pw_{-i}}^2 + B_{pw_{-i}}^2)}{\sum_{j=1}^{+\infty} (A_j^2 + B_j^2)}。 \quad (12)$$

2 多管火箭射击密集度全局灵敏度分析

2.1 影响射击密集度的随机因素

无控火箭弹发射与飞行过程中，随机因素的综合作用会使每枚弹丸的弹道产生偏差，从而造成落点散布。从外弹道学的角度分析，当弹体离开发射系统的瞬间，发射系统对弹体的作用力消失，随后弹体仅受到发动机推力(主动段)、重力和空气动力

的影响，那么此时影响飞行弹道和落点位置的随机因素主要来自 3 方面：弹丸起始扰动、弹丸结构参数、气象环境。笔者从这 3 个方面考虑，选取了如下随机变量进行分析：

1) 火箭弹起始扰动。起始扰动是火箭弹离开发射系统时的运动姿态，此时弹体的运动可分为质心运动和绕心运动。一般采用以下参数描述弹丸的起始扰动：高低摆动角 φ_1 、水平摆动角 φ_2 、高低摆动角速度 $\dot{\varphi}_1$ 、水平摆动角速度 $\dot{\varphi}_2$ 、高低偏角 ψ_1 、水平偏角 ψ_2 、初速 v_0 。其中摆动角为弹体几何纵轴相对参考坐标系的参数，偏角为弹速度矢量 v 相对参考坐标系的参数^[14]。

2) 火箭弹结构参数误差。在火箭弹的制造、加工、装配等过程中不可避免地造成火箭结构参数误差而引起的随机因素有：质量偏心 L_m 、动不平衡 β_D 、推力偏心角 β_p 、推力偏心距 L_p 、火箭弹质量 m 、推进剂质量 m_g 。

3) 气象环境。风速是影响弹道的主要因素。在弹道计算中，随机风可分为 2 部分：① 对每一发弹道都相同，是随高度变化的确定部分，主要影响火箭弹的平均落点；② 对每一发弹都不同，影响火箭的落点散布^[14]。因此，在进行密集度计算时主要考虑第②部分的随机风，即阵风对火箭落点散布的影响，并根据射向与风向的关系，分解为纵风 w_x 和横风 w_y 。

2.2 火箭弹落点的计算模型及目标函数的设定

通常，多管火箭的射击密集度用落点的概率偏差比上最大射程来表示。它又分为横向密集度和纵向密集度。中间偏差即落点的散布特征，是一种基于落点方差的评定方法。因此在进行灵敏度分析时，可将目标函数设为火箭弹落点的横坐标函数和纵坐标函数。

记随机参数变量：

$$x = (L_{m1}, L_{m2}, \beta_{D1}, \beta_{D2}, \beta_{p1}, \beta_{p2}, L_{p1}, L_{p2}, m, m_g, \varphi_1, \varphi_2, \dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2, \psi_1, \psi_2, v_0, w_x, w_y) \quad (13)$$

基于六自由度刚体火箭弹飞行动力学方程^[15]，考虑随机参数变量的输入^[14]，建立某多管火箭发射系统的外弹道计算模型。通过外弹道计算模型可获得弹道诸元，其中包括落点坐标。由此建立落点横坐标和纵坐标与随机因素的关系：

$$\begin{cases} X = f(x) \\ Z = g(x) \end{cases} \quad (14)$$

2.3 实例计算

以某 122 mm 多管火箭炮在最大射程(射角 $\theta=50^\circ$)下射击密集度为分析对象，将火箭落点的横坐标和纵坐标作为目标函数，随机因素为输入参数，用 EFAST 法进行射击密集度全局灵敏度分析。参考文献[14]中火箭弹结构参数、空气动力系数等，设定 $f(x)$ 、 $g(x)$ 函数中相关值。

一般认为影响火箭射击密集度的随机因素 x 都服从正态分布，根据实际测量结果和历史数据统计，可得各随机因素的均值和中间误差。某 122 mm 多管火箭炮随机因素的统计特性^[14]如表 1、表 2 所示，表中 1、2 的数字下标分别为水平方向和铅锤方向分量。风速中间偏差一般取 0.7 m/s^[15]。

表 1 火箭弹特征参数统计特性

参数名	均值 μ	中间误差 E
质量偏心 L_{m1}	0.0	1.126×10^{-5}
质量偏心 L_{m2}	0.0	1.126×10^{-5}
动不平衡角 β_{D1}	0.0	2.02×10^{-4}
动不平衡角 β_{D2}	0.0	2.02×10^{-4}
推力偏心角 β_{p1}	0.0	1.126×10^{-4}
推力偏心角 β_{p2}	0.0	1.126×10^{-4}
推力偏心距 L_{p1}	0.0	2.23×10^{-4}
推力偏心距 L_{p2}	0.0	2.23×10^{-4}
火箭弹质量 m	66.157	0.235 6
推进剂质量 m_g	20.622	0.065 0

表 2 火箭弹起始扰动统计特性

参数名	均值 μ	中间误差 E
摆动角 φ_1	0.866	4.96×10^{-5}
摆动角 φ_2	-2.03×10^{-5}	5.61×10^{-5}
摆动角速度 $\dot{\varphi}_1$	-0.102	3.03×10^{-3}
摆动角速度 $\dot{\varphi}_2$	-5.07×10^{-3}	2.4×10^{-3}
偏角 ψ_1	-4.19×10^{-3}	6.27×10^{-5}
偏角 ψ_2	-9.45×10^{-4}	6.04×10^{-5}
初速 v_0	49.06	0.0167

对于正态分布，根据式(4)推导搜索函数：

$$x_i = F_i^{-1}\left(0.5 + \frac{1}{\pi} \arcsin(\sin(w_i s + R_i))\right),$$

$$F_i(x_i) = \int_{-\infty}^{x_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-u^2/2} du \quad (15)$$

式中 R_i ^[7]是在 $(0, 2\pi)$ 上服从均匀分布的随机变量，这样搜索函数的搜索起点可在优化区间内任意位置，使参数取值更均匀合理。

根据 EFAST 算法，设定约 11 000 组样本，采用龙格-库塔法求解外弹道微分方程组，使用 Matlab 编程，计算 EFAST 灵敏度值。

2.4 结果分析

计算结果如表 3 所示，直方图形式结果如图 1、

图 2 所示。

表 3 随机因素对射击密集度的灵敏度

随机因素	1 阶灵敏度		全局灵敏度	
	X	Z	X	Z
L_{m1}	0.005	0.002	0.028	0.041
L_{m2}	0.002	0	0.031	0.039
β_{D1}	0.008	0.020	0.032	0.060
β_{D2}	0.004	0.002	0.030	0.042
β_{p2}	0.008	0.002	0.033	0.041
β_{p2}	0.007	0.003	0.025	0.029
L_{p1}	0.001	0.015	0.039	0.059
L_{p2}	0.003	0.013	0.030	0.053
m	0.571	0.001	0.609	0.039
m_g	0.263	0.001	0.299	0.039
φ_1	0.031	0.001	0.036	0.041
φ_2	0.001	0.013	0.021	0.083
$\dot{\varphi}_1$	0.080	0.001	0.126	0.061
$\dot{\varphi}_2$	0.002	0.511	0.028	0.652
ψ_1	0.022	0.001	0.026	0.041
ψ_2	0.003	0.004	0.015	0.070
v_0	0.009	0	0.029	0.042
w_x	0.118	0.001	0.148	0.038
w_y	0.002	0.415	0.029	0.555

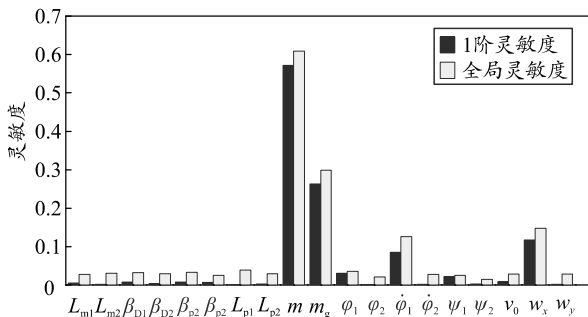


图 1 纵向密集度灵敏度

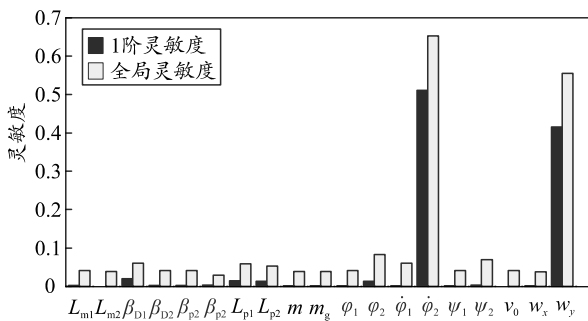


图 2 横向密集度灵敏度

根据灵敏度的基本概念可知，灵敏度越高说明该因素的变化对总输出的变化影响越大。1 阶灵敏度体现了单因素独立作用对总输出的影响，全局灵敏度较 1 阶灵敏度高出部分，则体现了因素间相互作用对输出结果的影响。由此可得以下结论：

1) 从图 1 可以看出：影响纵向密集度的主要随机因素有火箭弹质量和推进剂质量，次要因素为纵风以及高低摆动角速度，其他因素影响较小。从图 2 可以看出：影响横向密集度的主要随机因素为水

平摆动角速度和横风，其他因素影响较小。

2) 从图 1、图 2 可以看出：主要影响因素的全局灵敏度比 1 阶灵敏度稍大，这是由于因素之间耦合作用对总输出结果造成了影响，且耦合作用的影响较小，独立作用为灵敏度主要贡献者。其他次要随机因素的全局灵敏度远大于 1 阶灵敏度，说明该因素与其他因素的耦合作用对总结果输出影响更为明显；因此，在分析随机因素对密集的影响程度时，随机因素之间的交互作用不容忽视。

3) 从随机因素的分类角度，将全局灵敏度值归一化计算起始扰动、结构参数和风速 3 类随机因素对密集度影响。对于纵向密集度，各随机因素的影响权重分别为 17.4%、71.6%、11.0%；对于横向密集度，各随机因素的影响权重分别为 48.9%、21.8%、29.3%。

3 结束语

笔者将 EFAST 法引入火箭射击密集度的全局灵敏度分析，基于火箭的六自由度刚体弹道方程建立多管火箭的落点计算模型，并针对某 122 m 多管火箭进行了分析，得到以下结论：

1) 火箭弹的质量误差是影响纵向密集度的主要因素，火箭弹的起始扰动是影响横向密集度的主要因素。可见，通过改进火箭的制造工艺以及控制火箭弹发射时的起始扰动是优化多管火箭炮射击密集度的有效方法。

2) 该研究较好地体现了 EFAST 法计算量较小、结果直观清晰、便于分析等优点，研究结果与工程经验相符合，证明 EFAST 法可用于多管火箭发射系统密集度的优化设计；其研究方法思路也可适用其他大型非线性系统的研究，例如炮一车一地面等非线性模型的优化设计研究等。

参考文献：

- [1] 于存贵, 李志刚. 火箭发射系统分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 12.
- [2] 王国平, 芮筱亭, 陈卫东. 多管武器系统密集度仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(6): 963-966.
- [3] 郭锡福. 远程火炮武器系统射击精度分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 35-48.
- [4] 王兆胜, 刘志强, 杨保元, 等. 各因素对射击精度影响研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(3): 198-200.
- [5] 曹宁, 王晓峰, 徐亚栋, 等. 基于逐步回归法的车载炮射击精度影响因素分析[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(4): 557-560.
- [6] 徐崇刚, 胡远满, 常禹, 等. 生态模型的灵敏度分析[J].

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: 右旋圆极化, 左旋圆极化。

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.