

文章编号: 2095-4980(2024)04-0405-07

## 一种卫星物联网上行干扰分析高效计算方法

陆远松<sup>1</sup>, 李伟<sup>2</sup>, 魏文康<sup>2</sup>, 刘子威<sup>1</sup>, 张更新<sup>1</sup>

(1.南京邮电大学 卫星通信研究所, 江苏 南京 210003; 2.国家无线电监测中心, 北京 100037)

**摘要:** 低轨卫星物联网(IoT)作为空间信息网络的重要组成部分, 由于其星座规模激增, 卫星平台动态性强, 终端数量多, 在与其他通信系统进行干扰分析及协调时, 存在干扰计算复杂度较高的问题。实际中, 物联网终端的分布与地理和人口高度相关, 但由于单颗卫星覆盖面积大, 面临多种密度和部署终端, 采用静态遍历计算的方式将带来运算量爆炸。本文从同频干扰产生的机理出发, 以区域化发射场强作为密集物联网终端上行集总干扰的建模核心, 并引入泊松点过程(PPP)分布模型对地面终端进行等效建模, 使区域化的上行集总干扰仅与分布参数及发射参数有关, 而与终端确切位置、数量均无关。仿真结果表明, 本文方法与传统链路分析结果相比误差较小, 对不同数量终端的拟合性能均较好, 并能有效降低长时分析的计算复杂度, 能够用于高效干扰分析与计算。

**关键词:** 低轨卫星物联网; 泊松点分布; 场叠加; 干扰分析

中图分类号: TN927

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022088

## An efficient calculation method for satellite IoT uplink interference analysis

LU Yuansong<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, WEI Wenkang<sup>2</sup>, LIU Ziwei<sup>1</sup>, ZHANG Gengxin<sup>1</sup>

(1.Institute of Satellite Communication, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing Jiangsu 210003, China;  
2.State Radio Monitoring Center, Beijing 100037, China)

**Abstract:** As an important part of space information network, low-orbit satellite Internet of Things (IoT) has the problem of high complexity of interference calculation in interference analysis and coordination with other communication systems due to its proliferation of constellation size, dynamic satellite platform and large number of terminals. In addition, the distribution of IoT terminals in practice is highly correlated with geography and population, but due to the large coverage area of a single satellite, it will face multiple densities and deployments of terminals, and the use of static traversal calculations will bring an explosion of computing power. Starting from the mechanism of co-channel interference generation, the regionalized transmit field strength is used as the core of modeling the uplink aggregate interference of dense IoT terminals, and the Poisson Point Process(PPP) distribution model is introduced to equivalently model the ground terminals, so that the regionalized uplink aggregate interference is only related to the distribution parameters and transmit parameters, but not to the exact location and number of terminals. The simulation results show that the proposed method has less error compared with traditional link analysis, and has better fitting performance for different number of terminals. It can effectively reduce the computational complexity in long-time analysis, and can be used for interference analysis and calculation with high efficiency.

**Keywords:** low-orbiting satellite IoT; Poisson point distribution; field superposition; interference analysis

随着卫星通信领域的发展, 低轨卫星通信已成为天基信息系统领域的发展热点; 同时由于微小卫星批量化生产技术的不断成熟和重复使用运载火箭、一箭多星等发射技术的迅猛发展, 触发了新一轮的低轨卫星物联网(IOT)星座的发展热潮。OneWeb、SpaceX、亚马逊等国外科技公司纷纷推出了自己的空间物联网计划, 国内航天科技、航天科工、中科院、中国电科以及多家民营企业也相继公布了低轨卫星星座的发展计划, 包括“鸿雁”、

"行云"、"天象"等系统<sup>[1-4]</sup>，但卫星星座的爆炸式发展带来了频轨资源紧张的负面效应<sup>[5-6]</sup>。在卫星系统设计和发射部署前，需要根据国际电信联盟(International Telecommunication Union, ITU)相关规定及频率划分规则进行频率和轨道的申报，并与现有系统进行必要的频轨协调<sup>[7]</sup>，以保证各系统间的共存共用。由于低轨卫星星座系统下卫星数量众多，非对地静止轨道(Non Geo-Stationary Orbit, NGSO)星座覆盖全球，用户或关口站可视范围内存在多颗干扰卫星，产生较为严重的集总干扰，同时产生共线极端干扰的概率也会增加<sup>[8]</sup>。此外，相比于对地静止轨道(GSO)系统，NGSO卫星星座系统具有卫星数量众多、卫星的位置和波束指向不断变化、地球站往往接入多颗卫星等特点<sup>[9]</sup>；同时，地面无线通信的快速发展使得计算NGSO系统卫星干扰时计算量陡增，计算量较大。不同于GSO系统相对静止的干扰场景，NGSO卫星与地面站的相对位置是变化的，导致了卫星之间以及卫星与地面站之间的空间几何关系的时变性，增加了干扰计算对的复杂程度。

针对NGSO星座间的干扰分析，目前已有许多研究，文献[10]中周傲松等对NGSO星座间的干扰计算方法进行了研究，但并没有给出相关的仿真证明。李睿等<sup>[11]</sup>针对NGSO星座时变性的特点，对不同采样点上的瞬时干扰进行了计算和仿真，但只考虑了NGSO星座与GSO卫星间的干扰。对于NGSO系统间干扰，靳瑾等<sup>[12]</sup>提出了一种通过卫星链路间夹角等效干扰指标的方式，并以OneWeb系统和O3b系统为例，给出了全球范围内系统间的可用概率。但由于不同系统的发射功率以及链路损耗的不同，夹角的门限值也不同，因此对干扰信号无法通过一个统一的夹角进行描述，只适用于2个系统间的干扰分析。文献[13]通过对卫星物联网和地面物联网间混合信道建模，建立了一种新的系统间干扰分析模型，研究了在不同发射功率、离轴角和地面小区半径情况下系统间上下行干扰水平变化情况。

上述文献从不同的角度出发对星座系统间的干扰进行分析，本文从同频干扰产生的机理出发，以区域化发射场强作为密集物联网终端上行集总干扰的建模核心，并引入泊松点(PPT)分布模型对地面终端进行等效建模，从而实现对区域化的上行集总干扰的高效计算。通过仿真分析，本文所提方法计算量小，且符合实际干扰场景下的特征。

## 1 链路干扰模型

与通信性能相关的干扰指标需要考虑系统噪声和干扰条件下整个链路的性能，因此需要考虑系统的载波功率、噪声功率和干扰功率等参数。考虑低轨卫星系统上行链路受扰场景，接收端在 $t$ 时刻接收到的干扰源信号功率可通过式(1)计算<sup>[14]</sup>：

$$I_i(t) = \sum_{j=1}^{N_i(t)} \frac{P_j G_i(\theta_j(t)) G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{(4\pi)^2 d_j^2(t)} \quad (1)$$

式中： $I_i(t)$ 为 $t$ 时刻收到的干扰信号功率； $N_i(t)$ 为当前时刻波束覆盖范围内终端数量； $P_j$ 为第 $j$ 个终端发射功率； $\lambda_j$ 为第 $j$ 个终端的信号频率； $G_i(\theta_j(t))$ 为干扰信号发射天线在偏离其主轴一定角度上的天线增益， $\theta_j(t)$ 为 $t$ 时刻第 $j$ 个干扰终端发射天线主轴与干扰链路间的夹角； $G_r(\varphi_j(t))$ 为受干扰系统接收端天线在偏离其主轴一定角度上的天线增益， $\varphi_j(t)$ 为接收天线主轴与干扰链路间的夹角； $d_j(t)$ 为链路距离。

卫星系统收到的集总干扰功率为通信仰角范围内干扰源造成的干扰功率之和，即：

$$I_{\text{total}}(t) = \sum_{i=1}^{N_1} I_i(t) = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_i(t)} \frac{P_j G_i(\theta_j(t)) G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{(4\pi)^2 d_j^2(t)} \quad (2)$$

式中 $N_1$ 为施扰波束。

系统噪声功率可由等效温度噪声构造： $N = KTW$ ，其中 $K$ 为玻兹曼常数， $T$ 为系统等效噪声温度， $W$ 为带宽，则干噪比计算如下：

$$\frac{I}{N} = \sum_{i=1}^{N_1} \sum_{j=1}^{N_i(t)} \frac{P_j G_i(\theta_j(t)) G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{(4\pi)^2 d_j^2(t) KTW} \quad (3)$$

根据ITU-R S.1432建议书，考虑主要频率重叠所引起的通信性能和系统可用度恶化，以系统噪声的百分数表示干扰容限能够被转换成相应的干扰噪声比 $I/N$ ，目前业内采用的门限值为-12.2 dB。利用卫星接受到的干噪比 $I/N$ 与门限值-12.2 dB比较，进行受扰程度判断。

对于低轨卫星物联网系统，其终端部署环境可分为陆、海、空三类。其中陆地环境和海洋环境可进一步划分，如陆地分为沙漠、森林；海洋可分为远洋、近洋等。由于终端部署密度与应用及所处地理环境密切相关，因此对地理环境进行细分有着十分重要的意义。如，海洋监测类应用(包括远洋和近洋)所对应的终端部署密度相对较低，原因在于海洋在大部分情况下处于稳定状态，即大范围内的观测值会非常接近，因此无需部署过密终端，导致数据冗余和资源浪费。但对同属于监测类应用的地质灾害监测，其在地质灾害活动频繁区域(如裂谷、山地等区域)的终端部署密度将会大大提高，原因在于该类应用旨在利用冗余的监测数据来推断所处区域发生位移或变形的潜在可能，以提高先期预警的准确性。此外，针对追踪类业务，如物流跟踪，其终端部署密度(即运输设备密度)将完全取决于特定航线的繁忙程度<sup>[15]</sup>。因此，由于不同区域终端密度的差异性，低轨卫星物联网系统干扰分析面临的问题更为复杂。

## 2 基于 PPP 的等效模型分析

系统的终端部署密度随着应用和地理区域特征的变化而变化，但部署的规则比较接近，且数量均比较大，因此本文考虑用一种可调整密度的概率模型对终端分布进行建模，以区域化发射场强作为密集物联网终端上行集总干扰的建模核心。对式(3)进行整理：

$$\frac{I}{N} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j(t)} \frac{P_j G_i(\theta_j(t)) G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{(4\pi)^2 d_j^2(t) KTW} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j(t)} \frac{P_j G_i(\theta_j(t))}{4\pi d_j^2(t)} \times \frac{G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{4\pi KTW} = \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{j=1}^{N_j(t)} E_j \times \frac{G_r(\varphi_j(t)) \lambda_j^2}{4\pi KTW} \quad (4)$$

式中  $E_j$  表示在  $t$  时刻第  $j$  个终端产生的场。由于物联网终端大多体积小，天线孔径尺寸有限，多体现为弱方向性发射波束。本文考虑终端在各个辐射方向上的场强，将场强进行叠加实现等效分析，避免由于链路夹角时变性引起的计算量较大问题。各终端之间的距离随不同应用场景而约束不同，文献[16-17]表明，随着终端密度的增加，PPP 分布模型对于终端分布的刻画更加精确，也更易于处理。为探究低轨卫星物联网上行系统的干扰情况，对该场景的地面终端采用 PPP 分布模型，分布强度参数能够用于调节终端间的距离约束。对该模型下地面终端在空间中的场强进行分析。

假定具有潜在干扰的地面终端在半径为  $R$  的圆内服从 PPP 分布，平均密度为  $\lambda_b$ ，位置信息为  $L_k(r_k, \theta_k)$ ，其中  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \dots, \theta_k$  独立同分布于均匀分布  $U[0, 2\pi]$ ，并与  $r_1, r_2, r_3, \dots, r_k$  独立，如图 1 所示。在单位面积  $dA$  内存在一个终端的概率为  $\lambda_b \times dA$ ，假定在圆内存在终端的个数为随机变量  $K_b$ ，则  $K_b = k$  的概率可以建模为<sup>[18]</sup>：

$$P\{K_b = k | r\} = \frac{(\lambda_b \pi r^2)^k}{k!} e^{-\lambda_b \pi r^2} \quad (5)$$

式中： $r$  表示地面终端到圆心的距离。

终端上空区域取点，记为  $S$ ，则  $S = \{S_1, S_2, S_3, \dots, S_n\}$ ，如图 2 所示。

定义  $r_{i \rightarrow j}$  为空间中任意一点  $S_i$  到地面终端  $L_j$  的水平距离，则  $r_{i \rightarrow j}$  的概率密度函数为：

$$f(r_{i \rightarrow j}) = -\frac{2r_{i \rightarrow j}^2}{\pi R^3} \sqrt{1 - \frac{r_{i \rightarrow j}^2}{4R^2}} + \frac{4r_{i \rightarrow j}}{\pi R^2} \arccos \frac{r_{i \rightarrow j}}{2R} \quad (6)$$

对于每个  $r_{i \rightarrow j}$ ，其角度都服从  $[0, 2\pi]$  的均匀分布，则第  $j$  个终端在点  $S_i$  处的场可表示为：

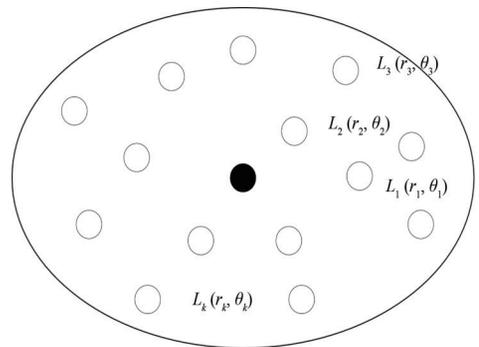


Fig.1 Ground terminal distribution model  
图1 地面终端分布模型

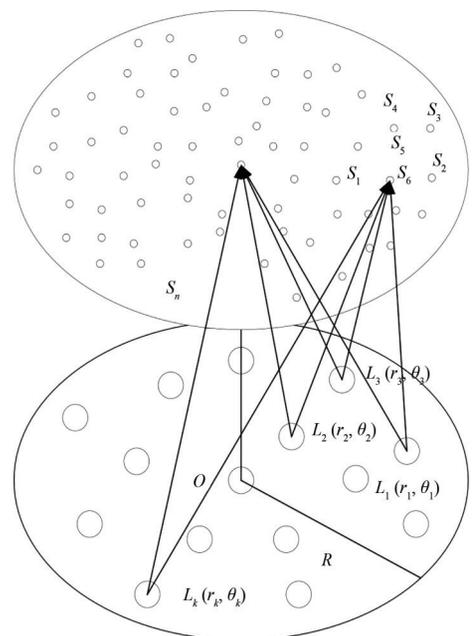


Fig.2 Schematic diagram of the scene  
图2 场景示意图

$$E_{j \rightarrow i} = \int_0^R \frac{P_j G_i}{4\pi d_{i \rightarrow j}^2} f(r_{i \rightarrow j}) dr_{i \rightarrow j} \quad (7)$$

式中： $d_{i \rightarrow j}$  为点  $S_i$  到第  $j$  个终端的空间距离。

综上所述，根据 PPP 分布进行等效计算主要有以下步骤：

- 1) 对地面终端采取 PPP 分布进行建模；
- 2) 利用所提等效模型对空域进行等效场分析，降低复杂度；

3) 接收端使用天线模型 ITU-R S.1528-0 进行干扰信号接收，根据干噪比的判别标准可对该区域内经过的卫星进行受扰判别。

### 3 仿真分析与验证

#### 3.1 可行性验证

局部区域内大量终端的存在，使计算 NGSO 系统卫星干扰时计算量陡增；同时考虑各站点之间的距离约束，对终端分布区域上空产生的干扰进行高效性仿真。针对空域中特定位置进行场强分析，考虑不同轨道高度下其场强随终端分布数的变化情况，对所提模型的可行性进行验证，仿真参数如表 1 所示。

根据上述理论推导，图 3 给出了不同轨道高度下场强随终端数量的变化曲线。可以看出，在不同的轨道高度下，利用传统链路计算与等效模型得到的结果趋势一致，仿真曲线吻合，表明式(4)中的  $E_j$  值可用式(7)进行等效，验证了所提等效分析模型的可行性。

对通信性能相关的干扰指标进行评价时，主要以干噪比  $I/N$  与门限值的差值为判断标准。因此对整个系统进行干扰分析时，除了仿真整个空域的场强分布情况，还对该区域卫星接收到的干噪比进行分析。仿真参数采用 Starlink 卫星参数，其余仿真参数如表 2 所示。

图 4 和图 5 分别为传统链路计算和等效计算得到的场强分布。根据仿真结果分析，传统链路计算的场值波动范围低于等效计算值。图 6 和 7 分别给出了传统链路计算与等效计算的干噪比绝对误差和相对误差变化曲线。由误差分析曲线可知，干噪比绝对误差最大为 0.82 dB；相对误差的最大误差低于 1.7%。

仿真时长对比如表 3 所示，本文所提等效方法在仿真时长上也减少了。

#### 3.2 不同参数的近似效果仿真

图 8~11 分别为实际应用场景下终端分布密度不同以及波束宽度大小对干噪比绝对误差和相对误差的影响。

仿真的误差是由于对波束覆盖范围内不同增益区域的等效造成的。根据仿真结果可知，不同波束宽度和终端分布密度下的误差较小，对实际应用中不同区域的分布差异性具有适用性。此外，当波束宽度为  $7^\circ$ ，分布密度为 0.5 时，本文方法与传统链路分析模型相比，干噪比相差最大为 0.68 dB，最大相对误差为 1.21%。

表 1 仿真参数设置

Table1 Simulation parameter settings

parameters	value
radius of terminal distribution area/km	106
transmitting power/dBW	0
transmitting antenna diameter/m	0.2
terminal antenna gain/dB	1.2
signal frequency/GHz	1.67
space S-point height/km	500~1 000

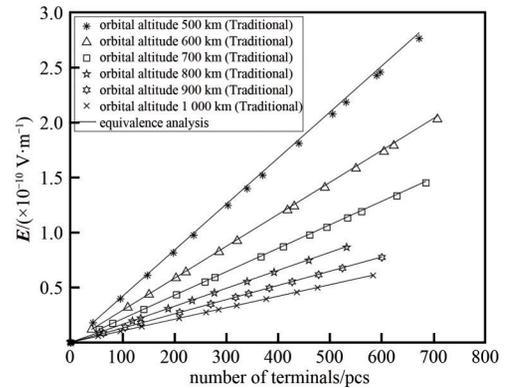


Fig.3 Variation curves of field strength with the number of terminals at different orbital heights

图 3 不同轨道高度下场强随终端数量的变化曲线

表 2 仿真参数设置

Table2 Simulation parameter settings

parameters	value
airspace altitude/km	540
transmitting power/dBW	0
transmitting antenna diameter/m	0.2
receiving antenna diameter/m	0.6
signal frequency/GHz	1.67
bandwidth/kHz	20
equivalent noise temperature/K	550
satellite antenna model	ITU-R S.1528-0

表 3 仿真时长对比

Table3 Comparison of simulation time

method	duration/s
traditional link computing	1 663.2
equivalent calculations in this paper	313.7

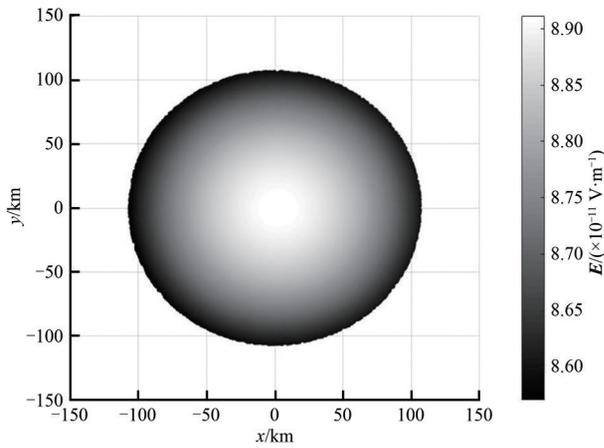


Fig.4 Traditional analysis of field strength distribution  
图4 传统分析场强分布情况

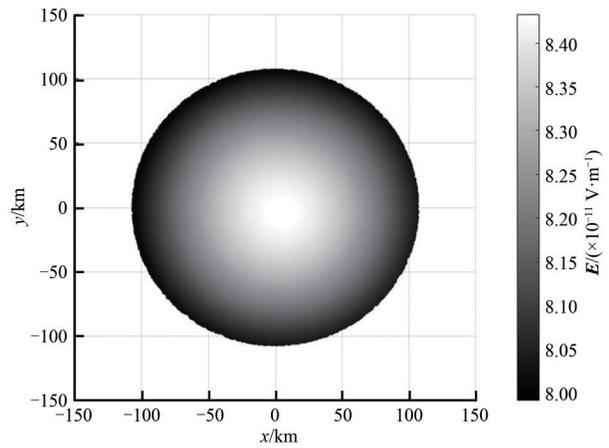


Fig.5 Equivalent analysis of the field strength distribution  
图5 等效分析场强分布情况

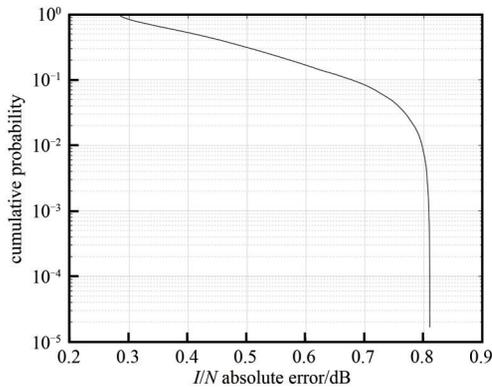


Fig.6 Absolute error of  $I/N$  ratio  
图6 干扰比绝对误差

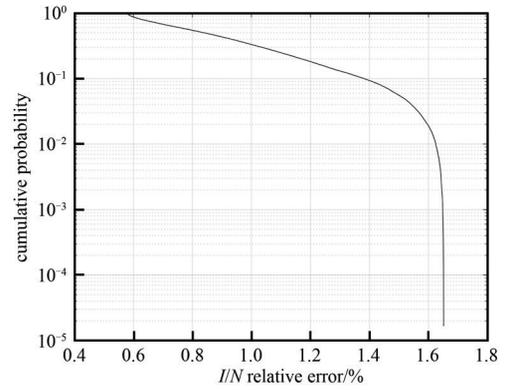


Fig.7 Relative error of  $I/N$   
图7 干扰比相对误差

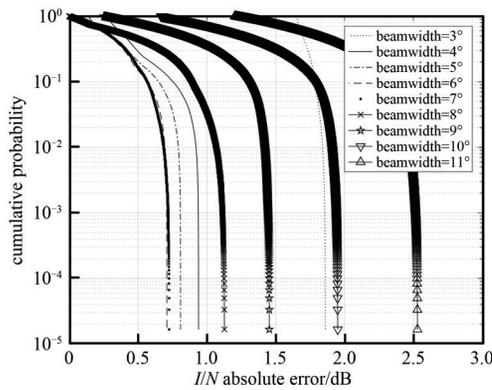


Fig.8 Absolute error of  $I/N$  ratio vs. beam width  
图8 干扰比绝对误差随波束宽度变化曲线

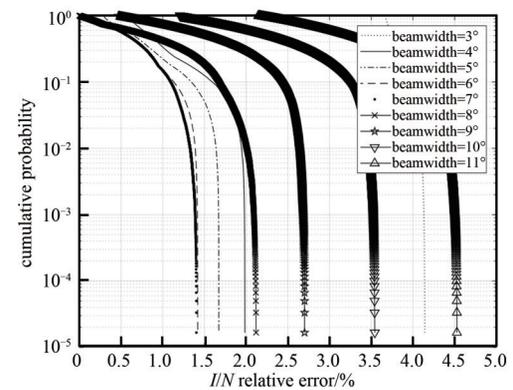


Fig.9 Relative error of  $I/N$  ratio vs. beam width  
图9 干扰比相对误差随波束宽度变化曲线

### 4 结论

低轨卫星物联网星座系统的同频干扰问题，随着地面终端的广泛部署越加严重。由于传统的链路分析模型在计算干扰时需要考虑卫星与不同终端的链路变化问题，计算量大。本文从同频干扰产生的机理出发，以区域化发射场强作为密集物联网终端上行集总干扰的建模核心，并引入泊松点分布模型对地面终端进行等效建模。根据仿真分析，本文所提方法与传统链路计算模型相比，仿真结果误差较小，不同终端分布密度下拟合性能较好，能有效降低计算时长，可用于高效干扰分析计算，具有一定的参考价值。

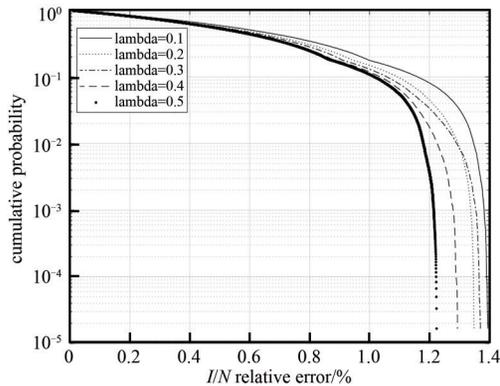
Fig.10 Absolute error of  $I/N$  ratio with distribution density curve

图 10 干噪比绝对误差随分布密度变化曲线

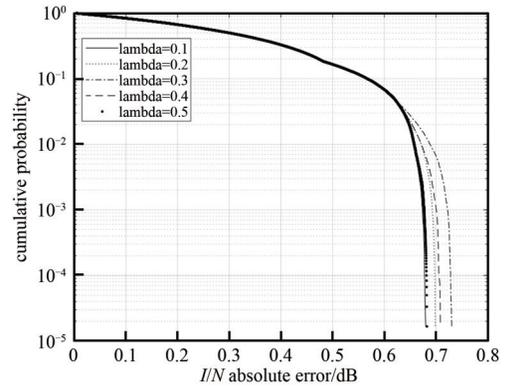
Fig.11 Relative error of  $I/N$  ratio with distribution density curve

图 11 干噪比相对误差随分布密度变化曲线

## 参考文献:

- [ 1 ] HANSON W A. In their own words: OneWeb's internet constellation as described in their FCC form 312 application[J]. New Space, 2016,4(3):153-167. doi:10.1089/space.2016.0018.
- [ 2 ] SÁNCHEZ A H, SOARES T, WOLAHAN A. Reliability aspects of mega-constellation satellites and their impact on the space debris environment[C]// 2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium(RAMS). Orlando, FL, USA: IEEE, 2017: 16776165. doi:10.1109/RAM.2017.7889671.
- [ 3 ] 韩沁珂. 中国低轨卫星通信系统首星上天, 要让全球永不失联[J]. 卫星电视与宽带多媒体, 2019(1):58-64. (HAN Qinke. China's low-orbit satellite communication system is the first to go to heaven, so that the world will never lose contact[J]. Satellite TV & IP Multimedia, 2019(1):58-64.)
- [ 4 ] 姜燕丽, 刘晓娟, 张雪梅, 等. 低轨卫星互联网发展问题研究[J]. 数字通信世界, 2018(8):21-22. (JIANG Yanli, LIU Xiaojuan, ZHANG Xuemei, et al. Internet development of low-orbit satellites[J]. Digital Communication World, 2018(8):21-22.) doi:10.3969/J.ISSN.1672-7274.2018.08.012.
- [ 5 ] 沈永言. 全球空间信息基础设施的发展态势与我国卫星通信的发展思路[J]. 国际太空, 2016(11):44-50. (SHEN Yongyan. Development of the global space information infrastructures and China's satellite communication[J]. Space International, 2016(11):44-50.)
- [ 6 ] PORTILLOA I D, CAMERON B G, CRAWLEY C E F, et al. Telesat、One Web 及 SpaceX 三个全球宽带低轨卫星星座系统的技术对比[J]. 卫星与网络, 2019(7):48-61. (PORTILLOA I D, CAMERON B G, CRAWLEY C E F, et al. Technical comparison of telesat, One Web and SpaceX three global broadband low-orbit satellite constellation systems[J]. Satellite & Network, 2019(7):48-61.)
- [ 7 ] 张泓湜, 蒋伯峰. 基于空间隔离的低轨卫星系统频谱共享方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2018,44(9):1909-1917. (ZHANG Hongshi, JIANG Bofeng. Spectrum sharing method for low-orbit satellite system based on space isolation[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018,44(9):1909-1917.) doi:10.13700/j.bh.1001-5965.2017.0732.
- [ 8 ] 方芳, 吴明阁. 全球低轨卫星星座发展研究[J]. 飞航导弹, 2020(5):88-92, 95. (FANG Fang, WU Mingge. Research on the development of global low-orbit satellite constellations[J]. Aerodynamic Missile Journal, 2020(5):88-92, 95.) doi:10.16338/j.issn.1009-1319.20190258.
- [ 9 ] 梁晓莉, 李云. “星链”星座最新发展分析[J]. 卫星与网络, 2019(8):40-43. (LIANG Xiaoli, LI Yun. Analysis of the latest development of the constellation of Starlink[J]. Satellite & Network, 2019(8):40-43.)
- [ 10 ] 周傲松, 陈道明. 非静止轨道卫星网络间下行数据传输同频干扰的分析方法[J]. 通信学报, 2000,21(3):32-37. (ZHOU Aosong, CHEN Daoming. An analysis method of co-frequency interference for data transmission in down-link between non-geostationary orbit satellite networks[J]. Journal on Communications, 2000,21(3):32-37.) doi:10.3321/j.issn:1000-436X.2000.03.006.
- [ 11 ] 李睿, 曾德贤. 非静止轨道卫星网络中同频干扰问题的分析与仿真[J]. 电讯技术, 2008,48(8):6-10. (LI Rui, ZENG Dexian. Analysis and simulation of co-frequency interference in non-geostationary orbit satellite network[J]. Telecommunication Engineering, 2008,48(8):6-10.) doi:10.3969/j.issn.1001-893X.2008.08.002
- [ 12 ] 靳瑾, 李娅强, 张晨, 等. 全球动态场景下非静止轨道通信星座干扰发生概率和系统可用性[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2018,58(9):833-840. (JIN Jin, LI Yaqiang, ZHANG Chen, et al. Occurrence probability of co-frequency interference and system

- availability of non-geostationary satellite system in global dynamic scene[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2018,58(9):833-840.) doi:10.16511/j.cnki.qhdxxb.2018.25.038.
- [13] 徐大剑. 低轨卫星物联网与地面物联网间同频干扰分析[D]. 南京:南京邮电大学, 2019. (XU Dajian. Analysis of co-frequency interference between low-orbit satellite Internet of Things and terrestrial Internet of Things[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2019.) doi:10.27251/d.cnki.gnjdc.2019.000374.
- [14] 贾敏,孟士尧,郭庆,等. 低轨大规模卫星星座系统建模与干扰分析[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(1):34-39. (JIA Min, MENG Shiyao, GUO Qing, et al. Analysis of inter-system interference of large-scale LEO satellite constellation[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2022,20(1):34-39.) doi:10.11805/TKYDA2021151.
- [15] 曲至诚. 天地融合低轨卫星物联网体系架构与关键技术[D]. 南京:南京邮电大学, 2020. (QU Zhicheng. Architecture and key technologies of Internet of Things of space-earth fusion low-orbit satellite[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2020.) doi:10.27251/d.cnki.gnjdc.2020.000683.
- [16] ANDREWS J G, BACCELLI F, GANTI R K. A tractable approach to coverage and rate in cellular networks[J]. IEEE Transactions on Communications, 2011,59(11):3122-3134. doi:10.1109/TCOMM.2011.100411.100541.
- [17] BROWN T X. Cellular performance bounds via shotgun cellular systems[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000,18(11):2443-2455. doi:10.1109/49.895048.
- [18] 韩祥辉. 北斗卫星导航系统与邻频系统干扰共存分析与技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2015. (HAN Xianghui. Analysis and technology of interference coexistence between Beidou satellite navigation system and adjacent frequency system[D]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.)

#### 作者简介:

陆远松(1998-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为卫星通信 .email:1527175584@qq.com.

李伟(1984-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为卫星通信系统的频率兼容研究、干扰减缓技术、频谱共享技术.

魏文康(1990-), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间互联网系统间频率兼容性分析、频谱使用率和频率管理创新等.

刘子威(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为卫星通信、卫星物联网、多用户检测与信号处理技术.

张更新(1967-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为空间信息网络、卫星通信等.