

文章编号: 2095-4980(2022)01-0034-06

低轨大规模卫星星座系统建模与干扰分析

贾敏, 孟士尧, 郭庆, 顾学迈

(哈尔滨工业大学 电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 针对低轨(LEO)大规模卫星星座系统存在电磁空间复杂且难于观测的问题, 对低轨卫星星座链路特征进行研究。以 Starlink 和 OneWeb 星座为研究对象, 根据低轨卫星的星座参数, 获取等效全向辐射功(EIRP)值并进行可视化处理; 对获取到的低轨电磁卫星数据进行分析, 获取数据的衰减特性和时间、频率等的关系, 计算星间的链路干扰以及时间上的分布特征; 获取相对干扰时间的特征值以及星间数据的衰减与时频的多维特性, 并分析不同场景下的干扰时间特征, 从多个维度分析低轨大规模卫星星座系统间星间链路的干扰情况并进行仿真验证。实验证明了低轨大规模卫星星座系统之间的星间链路存在干扰情况, 且频率越高, 干扰现象越明显。

关键词: 星座; 低轨卫星; 星间链路; 星间干扰; 等效全向辐射功

中图分类号: TN927+.23

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2021151

Analysis of inter-system interference of large-scale LEO satellite constellation

JIA Min, MENG Shiyao, GUO Qing, GU Xuemai

(School of Electronic and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin Heilongjiang 150001, China)

Abstract: The electromagnetic space of large-scale Low Earth Orbit(LEO) satellite constellation system is complex and difficult to observe. The link characteristics of LEO satellite constellation are studied. Firstly, taking Starlink and OneWeb constellations as the research objects, according to the constellation parameters of LEO satellites, Equivalent Isotropically Radiated Power(EIRP) values are obtained and visualized. Then the data of LEO electromagnetic satellite are analyzed to obtain the numerical relationship between attenuation characteristics and time, frequency, etc. The inter-satellite link interference and its temporal distribution characteristics are calculated. The characteristic values of relative interference time are obtained, as well as the attenuation and time-frequency multi-dimensional characteristics of inter-satellite data. The time characteristics of interference in different scenarios are analyzed. The inter-satellite link interference of large-scale LEO satellite constellation system is studied from multiple dimensions and verified by simulation. Finally, it is proved that there is interference in the inter-satellite links among large-scale LEO satellite constellation systems, and the higher the frequency is, the more obvious the interference is.

Keywords: constellation; LEO satellite; inter-satellite links; inter-satellite interference; Equivalent Isotropically Radiated Power

物联网是目前信息技术发展的重点方向和重要组成部分, 目前地面物联网面临着各种困难, 其中包括天气、容量、网络资源等的影响。

低轨(LEO)卫星通信系统时延小, 信号的抗衰减能力强, 且可以通过提高系统的覆盖能力, 达到卫星的全球无缝覆盖。目前已有的一些 LEO 卫星星座, 如 Starlink 星座和 OneWeb 星座, 都采用了 Ka 及 Ku 频段, 它们的覆盖性能很好, 并且频率复用性能好, 可以承担空中域的物联网要求。这种 LEO 卫星系统的频带容量相对较小, 一般同频波束之间的相距较大, 因此同频干扰情况较少^[1-3]。

目前卫星通信系统中尤其是 LEO 卫星星座的星间干扰的仿真和研究还处于初步的研究论证阶段^[4]。已有的

收稿日期: 2021-04-15; 修回日期: 2021-05-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61771183); 民用航天技术预先研究资助项目(B0105)

模型中天线模型构建也不完全准确,无法精准地体现出不同角度的不同增益以及不同时刻的连续干扰的变化情况,而且已有的文献中对于 LEO 卫星星座的干扰场景大部分局限于上下行链路中的地面站与星座间的同频干扰,以及其他地球同步轨道(Geosynchronous Orbit, GEO)星座对 LEO 星座之间的干扰,缺少对于不同以及同一 LEO 星座之间的直接通信干扰情况,因此需要对干扰场景进行完善。在建模卫星系统中,亟需分析目前空间网络中存在的干扰与衰减的情况,进一步实时分析出大规模卫星星座系统所受的星间干扰以及星地干扰等,才能最大程度减少系统受到的干扰影响^[5-6]。

综上,本文首先对 LEO 大规模卫星星座系统进行建模仿真,获取星座实时星间距离与俯仰角,计算等效全向辐射功(EIRP)等星座发射数据;然后分析 LEO 大规模卫星星座系统间干扰情况,利用获取的 EIRP 值等计算和分析星座受到的星间干扰,验证 LEO 大规模卫星系统的星间链路中存在干扰。

1 LEO 大规模卫星星座系统的系统模型

计算 LEO 大规模卫星星座系统的干扰,需获取各个星座的 EIRP 等发射数据。首先通过软件仿真实现 LEO 大规模卫星星座系统的轨道模型,获取卫星轨道相关参数;然后根据电磁干扰模型,计算包括天线增益、EIRP(星间干扰中上行链路地面站发射机 EIRP、下行链路卫星发射机 EIRP)在内的若干电磁参数。

在系统模型中主要考虑的电磁发射参数包括:

1) 发射功率:发射机提供给电磁辐射器(天线)的射频功率。

2) 发射天线增益:在相同输入功率时,发射天线在某一规定方向上的辐射功率密度与参考天线(通常采用理想辐射点源)辐射功率密度的比值。天线增益用来衡量天线朝一个特定方向收发信号的能力,是选择天线最重要的参数之一。增益与天线方向图密切相关,方向图主瓣越窄,副瓣越小,增益越高。

3) EIRP:卫星或地面站在某个指定方向上的辐射功率,理想状态下等于功放的发射功率乘以天线的增益。

因此要分析 Starlink 星座和 OneWeb 星座的干扰,首先要获取两个星座的发射数据。OneWeb 系统在全球范围内提供宽带接入。OneWeb 低轨道卫星系统由大约 720 颗卫星以及在轨备份星构成,并且卫星数量还可进一步增加。OneWeb 星座运行在 Ku 和 Ka 波段的频谱上。

Starlink 系统的星座实现运行能力,将需要部署的 4 425 颗卫星分布在 83 个轨道面上,轨道高度 1 110~1 325 km 不等,在用户端最低 40°仰角条件下,可满足全球无缝覆盖。

设置地面站位置(72.826°E,0),在仿真实现的星座中,选取卫星过顶的一段时间进行仿真,设置步长为 1 s,获取卫星对地面站、地面站对另一颗卫星的方位角、距离等数据,通过查阅文献获取星座卫星发射功率、地面站发射机发射功率、卫星通信频率等数据。

1) 天线模型

多波束卫星系统中,卫星的覆盖区域被划分成很多不同的小区域,通过这些小区来实现卫星服务范围的完整覆盖。卫星上的天线类似于空间滤波器,天线的增益取决于卫星和用户连线与波束瞄准线之间的夹角。

ITU-R672.4 只给出了天线方向图的包络建议,而其中包含天线的具体参数,如归一化反射面口径直径、焦距与口径直径的比值等无法确定,因此选择 Vatalaro 卫星天线方向图模型:

$$F_j(\theta) = \hat{F}(u_j) = \frac{(p+1)(1-T)}{(p+1)(1-T)+T} \left[\frac{2J_1(u_j)}{u_j} + 2^{p+1} p! \frac{T}{1-T} \times \frac{J_{p+1}(u_j)}{u_j^{p+1}} \right] \quad (1)$$

$$u_j = \pi d_{aj} \sin \theta / \lambda \quad (2)$$

式中: d_{aj} 为第 j 个点波束的有效孔直径; λ 为波长, $J_p(u)$ 为第一类 p 阶贝塞尔函数; T 为天线孔径边缘锥度。

2) 上行链路 EIRP 的计算

在上行链路中,利用式(3)计算地面站发射机 $EIRP_E$:

$$EIRP_E = P_E + G_E \quad (3)$$

式中: P_E 为地面站发射机发射功率;通过获取的方位角数据结合通信频率计算实时天线增益 G_E ,将所计算得出的电磁参数进行 3D 展示。

3) 下行链路 EIRP 的计算

在下行链路中,利用式(4)计算地面站发射机 $EIRP_S$:

$$EIRP_S = P_S + G_S \quad (4)$$

式中: P_S 为卫星发射机发射功率;通过获取的方位角数据结合通信频率计算实时天线增益 G_S 。

2 低轨卫星干扰特征计算

在低轨卫星通信中,可能会产生干扰的一个重要情况是星间干扰的场景。图 1 为电磁空间分布及干扰复杂性示意图。从图中可以看到,LEO 星座中的一颗卫星会受到多种潜在的干扰,主要分为系统上行和下行两种场景。图中对于 A 星座与地球站 A 之间的通信,其上行链路中存在的干扰主要为其他星座的卫星对其的干扰以及其他可能的地球站对其的干扰。在下行链路中存在的主要干扰分为其他星座对地球站的干扰以及有可能存在的 GEO 星座对地球站之间的干扰^[7]。

星间干扰一般考虑邻星干扰的场景。本文主要考虑邻星系统中存在的上行信道的干扰,即卫星通信过程中实际的有用信号为地面站发送的有用信号强度,而干扰则为其他星座发送的信息造成。在某些存在星间链路的低轨大规模卫星星座系统中,当本星 A 与本地地球站进行信息交流的同时,有可能邻星 B 的输出信息也会传输到 A 的接收机中,造成两颗星间的直接干扰。这种情况会发生在主链路的上行状态中。无论是哪种情况造成的星间干扰,都可以用某种数据处理方式,对干扰进行量化,并获知是否需要对其进行调节,如自适应功率控制等方法。之后计算系统的最佳采样时间,这样可以在能够正确判断系统之间的干扰情况的前提下,尽可能减少所需的数据计算量^[8]。在计算中,需要获取所选取的星座轨道高度以及卫星运行角速度等数据,本文确定终时间步进为 6 s。

在考虑星间干扰时,选择功率来进行判断。在计算过程中,需要对载干比进行数据处理。最终传输的载干比与星间链路本身传输的载干比关系为:

$$\frac{C}{I_{th}} = \frac{C}{N_{th}} + 12.2 \quad (5)$$

式中: $\frac{C}{I_{th}}$ 为系统的信干比; $\frac{C}{N_{th}}$ 为系统的信噪比。

在考虑系统的余量 M 时,可以根据之前计算的门限得

$$M = \frac{C}{I} - \left(\frac{C}{N_{th}} + 15.2 \right) \quad (6)$$

根据 ITU 规定的 ITU-R S.324 规则可知^[9],在判断是否存在干扰时,可以利用获得的系统余量:当系统余量 $M > 0$ 时,系统的干扰情况不严重,不会对主链路的信道造成影响;当 $M < 0$ 时,干扰会对主链路的通信造成影响,需要对系统进行如自适应功率控制等操作,以改善信道环境。

由于卫星发射和接收的椭圆极化波长轴之间有一定的角度,一旦此角度不为 0,则极化就会不完全匹配,即极化变换器和输出的线极化波的极化方向与接收波要求的极化方向不一致,接收波的能量就不能完全进入接收系统,会引起损耗,也叫极化损耗。一般在考虑天线时无需考虑极化损耗,但需要注意的是,由于接收天线和发射天线之间存在一定的夹角,点波束天线的方向图就很重要。LEO 卫星系统的卫星天线的辐射模型放大倍数如图 2~3 所示。

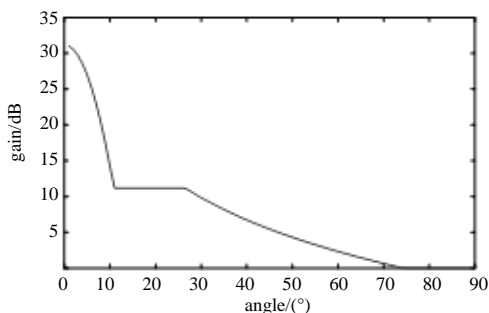


Fig.2 Antenna amplification capability of OneWeb system
图 2 OneWeb 系统的天线放大能力

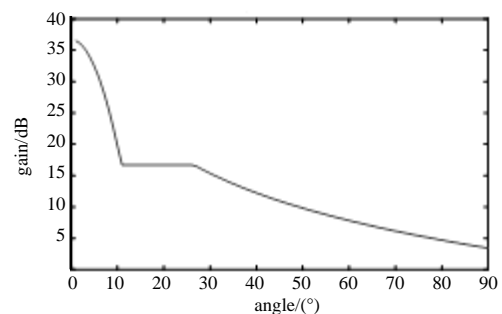


Fig.3 Antenna amplification capability of Starlink system
图 3 Starlink 系统的天线放大能力

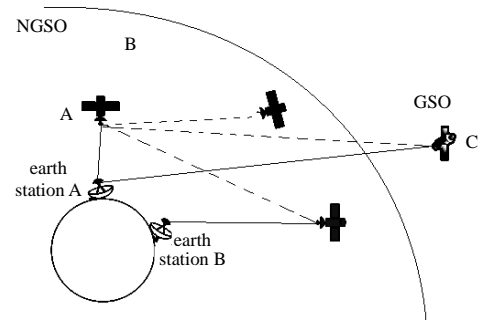


Fig.1 Schematic diagram of electromagnetic spatial distribution and interference complexity

图 1 电磁空间分布及干扰复杂性示意图

卫星通信系统中存在多种干扰和环境影响因素,在考虑卫星之间的干扰时,一般采用自由空间传输模型,且还需考虑大气产生的损耗。

1) 自由空间损耗

定义自由空间传输损耗为 L_f , 其中 λ 为电磁波的波长:

$$L_f = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 = \left(\frac{4\pi d f}{c} \right)^2 \quad (7)$$

2) 大气损耗

晴朗天气环境下的电磁波传输衰减主要由分布在低层大气中水汽和氧气吸收导致,并且水汽和氧气的密度是不均匀的,随高度的增加而递减。另外,沿射线路径,大气环境的温度随高度的增高而降低,因此有些环境模型要求进行温度修正。

3) 雨衰

考虑下雨对于通信系统的影响。根据 ITU-R P.681.11 规定的雨衰计算方法^[10],可以得到空间的雨衰与传输距离和通信频率有关。实际通信系统中,通信频谱可能不固定,固定的是传输距离。在相同的传输距离下,通信频率越大,自由空间损耗和大气衰减损耗也越大。对于一般的系统,其上下行链路之间的频段重叠,为了满足上述要求,一般会要求门限增大 3 dB。因此,下行链路载干比门限会比系统的自带载噪比大 15.2 dB。

通过通信系统仿真获取的低轨卫星系统的实时数据,可以得到在系统中两颗独立的卫星某时刻的角度关系、距离关系以及当前时刻。由于在某些时刻,两颗卫星之间可能没有相互之间的信号传输,不存在互相连接,此时刻不获取数据。

在考虑星座之间的干扰时,可以分别统计一段时间内的一个星座各个星收到的干扰情况,进行汇总,然后记录收到干扰大小以及来自哪个星座的哪颗星,得到一个星座受到的干扰情况。之后对各组数据进行分类,按照干扰情形对数据进行分组提取,对于各种干扰情况选择合适的系统参数,计算星间干扰和其影响因素的关系。

首先考虑 Starlink 星座同层之间的干扰情况。由于 Starlink 的星座情况比较复杂,在 Starlink 轨道存在不同的批次,其中的轨道高度等参数均不同。因此需要考虑不同层的 Starlink 星座之间的星间干扰情况。由于轨道情况较为复杂,在计算各个链路之间的角度时,可以采用余弦定理来计算各个角度,获得不同角度的天线增益,最终获得干扰情况如图 4~图 5 所示。由图可知,在同层 Starlink 星座之间及某一 Starlink 与某一 OneWeb 之间的干扰情况,其判决值都一直大于 0,可知其不会对现行链路的通信进行干扰。对于同层 Starlink 的情况,在 3 km 以内,干扰情况基本保持不变,判决值维持在 6 dB 左右。而对判决值大小分析可以看出,OneWeb 对 Starlink 系统的干扰比 Starlink 对 OneWeb 系统的干扰量稍大。当通信频率在 20 GHz 左右时,在日降雨量约为 5~10 mm 的小雨情况下,降雨衰减约为 5 dB 左右,在 Starlink 系统中,降雨情况下,可能会在某些时间造成星间干扰,对低轨通信系统造成干扰,但是相对较小。通过以上的判断方式,就可以得知在数据挖掘对数据进行分析的时候,针对任意的时间对应的角度、星间距离、频率以及降雨量等,判断该情形下是否存在干扰。

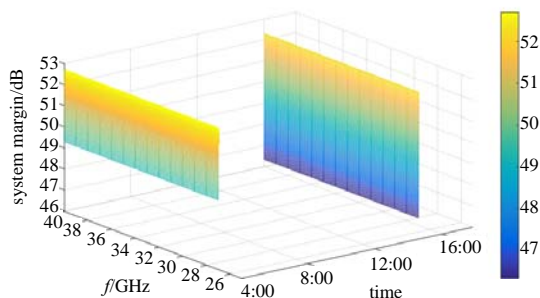


Fig.4 Inter-satellite interference of Starlink system to OneWeb system
图 4 Starlink 系统对 OneWeb 系统的星间干扰

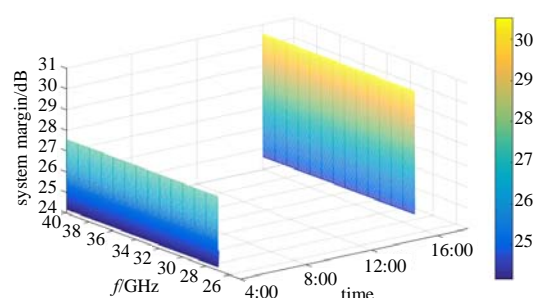


Fig.5 OneWeb's inter-satellite interference decision to Starlink
图 5 OneWeb 对 Starlink 的星间干扰判决

3 电磁数据分析模型与结果

根据 ITU-R S.1324 判断不同系统之间的干扰特性。低轨卫星主要分布在 Ka/Ku 波段,根据干扰的计算公式可知,越接近高频段,干扰影响越大。此外在日降雨量约为 5~10 mm 的小雨情况下,降雨衰减约为 5 dB 左右,干扰更加强烈。在数据挖掘对数据进行分析时,针对任意的时间对应的角度、星间距离、频率以及降雨量等,判

断该情形下是否存在干扰。

对于干扰与时间和频率的多维度分析可知,频率在 Ka 频段范围内,随着频率增加,由于自由空间损耗等的增加,最终系统的信噪比会降低,受到干扰的可能增大;而对于干扰与时间的关系,随着时间变化,星间的角度和距离也会变化,这就是星间数据的干扰特征。

对于电磁数据的相对干扰时间问题,选取 Starlink 星座编号 1007 到 1027 的 20 颗星座对于编号为 0007 的 OneWeb 星座在某一天的干扰情况进行分析。在 Ka 频段范围内,其相对干扰时间的情况如图 6 所示。可以看出,在这一天中,不同的卫星发生通信干扰的相对时间有较大的差异。在这 20 颗卫星中,1016 与 1017 两颗卫星发生通信干扰的时间大约为 $24 \times 0.08 = 1.92$ h 左右,1012,1018,1022 与 1024 这 4 颗卫星发生干扰的时间最少,大约为 $24 \times 0.035 = 0.84$ h;此外也可以看出,通信的频率越大,系统发生干扰的时间也越多。

另一种场景,分析从 0006 号到 0024 号这 19 颗 OneWeb 星座对 1007 号 Starlink 星座的干扰,在 Ka 频段范围内,其相对干扰时间的情况如图 7 所示。可以看出,此种情况下干扰相对时间各自不同,在这 19 颗卫星中 0012 与 0019 两颗卫星发生通信干扰的时间大约为 $24 \times 0.12 = 2.88$ h 左右,其余的干扰相对时间都较少,大约为 $24 \times 0.02 = 0.48$ h;此外也可以看出,通信频率越大,系统发生干扰的时间也越多。

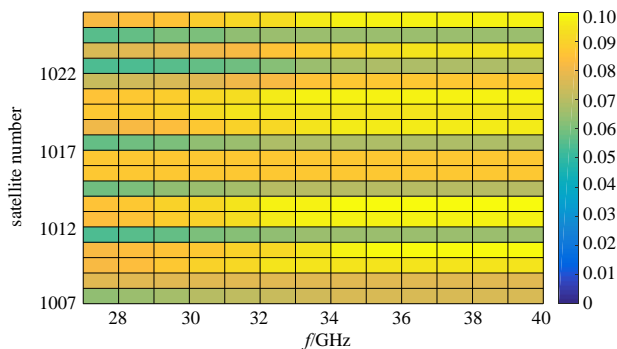


Fig.6 Relative interference time of Starlink to OneWeb in one day under different frequencies

图 6 不同频率下, Starlink 对 OneWeb 一天内相对干扰时间

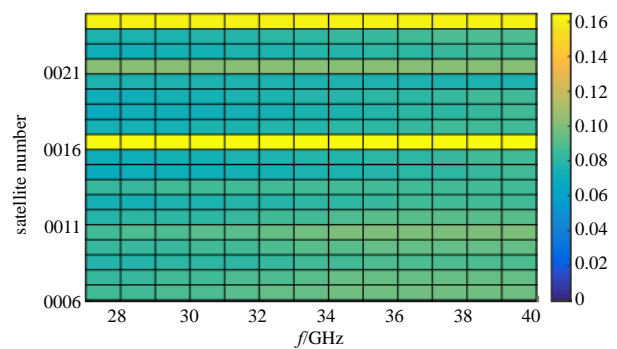


Fig.7 Relative interference time of OneWeb to Starlink in one day under different frequencies

图 7 不同频率下, OneWeb 对 Starlink 一天内相对干扰时间

由以上两个场景中存在的低轨大规模星座系统的干扰分析可知,星间链路上是存在干扰的,并且在雨天等对信号传输有较大衰减的场景下,干扰会对通信系统产生较大的影响。低轨大规模星座系统的通信链路主要分布在 Ka 与 Ku 频段,大量的处于同频段的卫星星座链路势必会产生较大的干扰,影响通信链路。此外,从干扰的时间特征图像可以看出,并不是所有的卫星星间链路都会产生干扰。在互相影响的星间链路上,干扰随频率升高有增大的趋势。

4 结论

通过建立低轨卫星星座的链路间干扰模型,可以发现,在目前的低轨大规模星座空间电磁环境下,链路干扰是具体存在的。低轨卫星如 Starlink 是存在星间链路的,其通信频率主要分布在 Ka,Ku 频段,按照仿真分析可知其中存在一定的干扰,有可能会对通信系统产生一定的影响。在对系统的干扰时间等特性进行可视化展示时,需要 2D 与 3D 展示方法互相结合,充分体现其特点。在不同系统中,如 Starlink 对 OneWeb 系统与 OneWeb 系统对 Starlink 系统之间都会产生一定的干扰,并且随着降雨等因素的存在,干扰可能会相对较大。此外,也可以看出,总体趋势上,频率相对较高时,干扰总体趋势会越高。因此充分了解不同干扰场景的 LEO 低轨卫星星座系统受到的干扰情况,通过后续的功率控制等手段对 LEO 卫星星座进行保护,完善在 Ka,Ku 频段的频谱规划,尽可能减小干扰存在。

参考文献:

- [1] 韩慧鹏. 低轨通信星座星间链路浅析[J]. 卫星与网络, 2018(8):40-42. (HAN Huipeng. Analysis of LEO communication constellation inter-satellite links[J]. Satellites and Networks, 2018(8):40-42.)
- [2] 董苏惠,姚秀娟,高翔,等. GSO 卫星系统布设中的通信干扰评估方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2020,46(11):2184-2194. (DONG Suhui,YAO Xiujuan,GAO Xiang,et al. Evaluation method of communication interference in GSO satellite system deployment[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2020,46(11):2184-2194.)

- [3] 韩其位, 聂俊伟, 刘文祥, 等. Ka 频段星间链路干扰强度及可行性分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014,45(3):769-773. (HAN Qiwei, NIE Junwei, LIU Wenxiang, et al. Interference intensity and feasibility analysis of Ka band inter-satellite link[J]. Journal of Central South University(Natural Science Edition), 2014,45(3):769-773.)
- [4] 谢学东, 颜树华, 陈建云. 星间链路抗干扰性能分析[J]. 宇航计测技术, 2011,31(6):53-56. (XIE Xuedong, YAN Shuhua, CHEN Jianyun. Anti-jamming performance analysis of inter satellite link[J]. Aerospace Measurement Technology, 2011, 31(6):53-56.)
- [5] 代建中, 冯旭哲. 低轨卫星系统频谱干扰及其规避仿真与分析[J]. 信息技术, 2021(2):79-84,91. (DAI Jianzhong, FENG Xuzhe. Simulation and analysis of spectrum interference and its avoidance in LEO satellite system[J]. Information Technology, 2021(2):79-84,91.)
- [6] 柳敏, 王永兵, 杨丹丹. 低轨卫星通信系统干扰分析及策略研究[J]. 无线互联科技, 2021,18(2):3-5. (LIU Min, WANG Yongbing, YANG Dandan. Interference analysis and strategy research of LEO satellite communication system[J]. Wireless Interconnection Technology, 2021,18(2):3-5.)
- [7] 席超, 邓阳光, 杨博, 等. 低轨星座系统电磁发射可视化技术研究[J]. 电子测试, 2020(9):49-51. (XI Chao, DENG Yangguang, YANG Bo, et al. Research on electromagnetic emission visualization technology of LEO constellation system[J]. Electronic Test, 2020(9):49-51.)
- [8] 肖琦, 耿晓磊, 陈金刚, 等. 低轨磁测卫星干扰磁场标定方法研究[J]. 地球物理学报, 2018,61(8):3134-3138. (XIAO Qi, GENG Xiaolei, CHEN Jingang, et al. Study on the calibration method of interference magnetic field of LEO magnetic survey satellite[J]. Acta Geophysica Sinica, 2018,61(8):3134-3138.)
- [9] ITU-R. Analytical method for estimating interference between non-GEO stationary mobile-satellite feeder links and geostationary fixed-satellite networks operating co-frequency and codirectionally:ITU-R S.1324[S]. Geneva:ITU, 1997.
- [10] ITU-R P.681-11. Propagation data and prediction methods required for the design of telecommunication systems[R]. Geneva, 2007.

作者简介:

贾 敏(1982-), 女, 哈尔滨市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为天地一体化认知通信, 组网与接入技术.email:jiamin@hit.edu.cn.

郭 庆(1964-), 男, 哈尔滨市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和宽带多媒体通信.

孟士尧(1997-), 男, 哈尔滨市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为电磁态势数据挖掘.

顾学迈(1957-), 男, 哈尔滨市人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星通信和天地一体化测控.

(上接第 33 页)

- [14] RAJENDRAN S, MEERT W, GIUSTINIANO D, et al. Deep learning models for wireless signal classification with distributed low-cost spectrum sensors[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2018,4(3):433-445.
- [15] ALI A, FAN Yangyu. Automatic modulation classification using deep learning based on sparse autoencoders with nonnegativity constraints[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2017,24(11):1626-1630.

作者简介:

张 振(1981-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为深度学习、信号分析识别.email:zhangzhen@hrbeu.edu.cn.

李一兵(1967-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为通信信号处理、导航信号处理、图像信号处理、信息融合技术.

查浩然(1996-), 男, 在读博士研究生, 主要研究方向为深度学习、信号分析识别、软件无线电技术.