

不同干扰对铱星机载导航设备接收信号的影响

马振洋¹, 史超翰¹, 丁桥², 周仁平², 毛新胜²

(1. 中国民航大学安全科学与工程学院, 天津, 300300; 2. 中电科航空电子有限公司, 成都, 611731)

摘要 铱星是目前使用较广泛的低轨道卫通系统,其机载收发信机已在多种民航客机上应用。由于铱星系统研发较早,未考虑后加入的机载通信系统的干扰,且机载电子环境日益复杂,铱星用户链路信号受到的威胁越来越大,需对其进行更完备的电磁兼容分析。首次建立了铱星下行链路信号的接收模型,分析了天线隔离度和不同干扰下的信号误信率,并用实验验证仿真结果。实验测试了不同频率和占空比的宽带和窄带干扰对铱星机载设备接收的信号质量的影响,与仿真吻合程度较好。结果表明:相同功率水平下,宽带干扰的影响大于窄带干扰;不同种类的宽带干扰造成的影响差异不大;带内和带外的宽带干扰造成的影响差异不大,但窄带干扰的影响呈先减小后增加的趋势;脉冲干扰的影响程度与占空比呈正相关。

关键词 铱星信号;机载导航;宽带干扰;窄带干扰

DOI 10.3969/j.issn.2097-1915.2022.05.008

中图分类号 V243.1 **文献标志码** A **文章编号** 2097-1915(2022)05-0051-06

The Influence of Different Interferences on Received Signals of Iridium Airborne Navigation Equipment

MA Zhenyang¹, SHI Chaohan¹, DING Qiao², ZHOU Renping², MAO Xinsheng²

(1. College of Safety Science and Engineering, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China;
2. China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 611731, China)

Abstract Iridium is widely used in low-orbit satellite communication system currently, and its airborne transceivers have been using in a variety of civil aviation aircraft. Aimed at the problems that the Iridium satellite system being relatively earlier in design on no consideration of the interference of the newly developed satellite navigation system, and the airborne electronic environment being more and more complex, and the threat to Iridium user-link signal being increased, more complete electromagnetic compatibility analysis is needed, a model of receiving Iridium downlink signal is established. The antenna isolation and bit error rate under different interferences are analyzed, and the simulation results are verified by experiments. The effects of wideband and narrowband interference with different frequencies and duty cycles on the quality of downlink signal received by the Iridium airborne equipment are tested, which is in good agreement with the simulation. The results show that under the same power level, the influence of wideband interference is greater than that of narrowband interference. The impact of different types of wideband interference is not much different. The impact of in-band and out-of-band wideband interference is

收稿日期: 2022-03-21

基金项目: 航空科学基金(20182667009)

作者简介: 马振洋(1985—),男,山东泰安人,副研究员,研究方向为微电子。E-mail:550147748@qq.com

引用格式: 马振洋,史超翰,丁桥,等.不同干扰对铱星机载导航设备接收信号的影响[J].空军工程大学学报,2022,23(5):51-56. MA Zhenyang, SHI Chaohan, DING Qiao, et al. The Influence of Different Interferences on Received Signals of Iridium Airborne Navigation Equipment [J]. Journal of Air Force Engineering University, 2022, 23(5): 51-56.

not much different, but the impact of narrowband interference decreases first and then increases. The impact of pulse interference is positively correlated with the duty cycle.

Key words Iridium signal; airborne navigation; wideband interference; narrowband interference

随着航空电子技术的发展,机载设备所处的电磁环境日益复杂,加之全球卫星导航系统的不断完善^[1-3],同频和邻频的电磁信号越来越多,使铱星机载接收机的工作条件更加苛刻^[4-6],因此其电磁防护受到重点关注,对铱星机载设备的接收信号进行电磁干扰分析更有重要意义。

文献[7]提出了利用铱星机会信号实现定位的方法,采用FFT和最大似然估计方法对铱星单音信号进行有效多普勒频移测量;文献[8]提出利用STL信号实现非合作导航定位算法,采集铱星信号后对其中STL信号部分进行解调,从时域和频域分析其定位误差;文献[9]提出了融合Orbcomm和Iridium卫星的时分和频分多址信号的接收器架构,结合EKF实现定位;文献[10]从可见卫星数量和几何精度稀释两个方面对铱星的导航性能进行了仿真分析,并与其他导航系统进行了对比;文献[11]提出一种减轻铱星信号所受射频干扰的算法,仿真对比了应用算法前后信号的完整性;文献[12]用误码率计算对铱星上行链路产生有效干扰的功率要求,并用Matlab仿真了误码率和干扰功率的关系。

以上文献主要研究了利用铱星实现定位的方法、铱星导航性能的分析及抗干扰算法的优化,分析了上行链路的有效干扰功率,但并未关注机载设备接收链路的抗干扰情况,因此本文评估了铱星机载设备接收下行信号时受到不同干扰的误信率。通过隔离度分析和接收过程建模,首次仿真了不同占空比、频率的干扰对接收信号的影响,并进行了语音质量测试。

1 理论基础

1.1 隔离度

接收系统所受的射频干扰主要有邻频、阻塞、互调3种,外部干扰通过天线耦合进入接收机。在研究不同干扰对铱星下行信号的影响前,需确定铱星机载天线对不同干扰的接收程度,因此首先分析天线间隔离度。

通常天线间的隔离分为水平、垂直、组合梯形3种方式,由导航天线在飞机上的安装位置可知,水平隔离为主要工作场景。

干扰耦合模型见图1,干扰信号从发射机射频

端口经发射通道、发射馈电系统、发射天线、空间传输路径到达接收天线,进入接收馈电系统、接收通道。

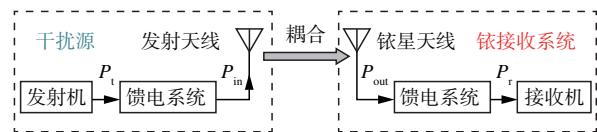


图1 天线耦合模型

不考虑机身的屏蔽效应等,两天线端口隔离度计算公式为^[13]:

$$P_c = P_t - P_r = L + L_p - D_1 - D_2 \quad (1)$$

式中: P_t 和 P_r 分别为发射机和接收机端口输出或输入的干扰功率; L 为线缆损耗,取典型值3 dB; D_1 和 D_2 分别为两天线连线方向上各自的增益; L_p 为自由空间传输损耗。

$$L_p = 32.45 + 20 \lg F + 20 \lg D \quad (2)$$

式中: F 为工作频率,MHz; D 为传输距离,km。

根据实际装机的天线间距,以2 m(最恶劣情况)为参考,增加4 m和8 m以观察隔离度随距离变化情况;根据铱星的用户链路频段,频率范围为1 614~1 626 MHz。

则上述公式简化为:

$$P_c = -3.2 + 20 \lg(FD) \quad (3)$$

计算结果见表1。

表1 天线隔离度理论计算值

频率/MHz	不同间距时的隔离度/dB		
	2 m	4 m	8 m
1 614	66.978	72.999	79.020
1 616	66.989	73.010	79.031
1 618	67.000	73.021	79.041
1 620	67.011	73.032	79.052
1 622	67.022	73.042	79.063
1 624	67.032	73.053	79.074
1 626	67.043	73.064	79.084

1.2 误信率

铱星下行链路传输90 ms的突发信号,由2.6 ms无调制单音信号、BPSK调制独立字、QPSK调制数据信息组成。其数据传输速率为50 kbps,信号模型为^[14]:

$$s(t) = Ab(t - \tau) \exp(j\omega t) + n(t) \quad (4)$$

式中: $b(t)$ 为发射数据码片频率,常见值为1 023 ω ;

τ 为码片周期; A 与接收机响应、路径损失等相关; $n(t)$ 为 AWGN。

在无外加干扰时,下行信号的载噪比表达式为^[15]:

$$\frac{C}{N_0} = P_{\text{EIRP}} - 10\lg(KT_0) - L - N_f \quad (5)$$

式中: P_{EIRP} 为等效全向辐射功率; G 为接收天线的增益; T 为接收系统噪声温度; K 为玻尔兹曼常数。

加入干扰后,载噪比的表达式变为^[16]:

$$\left(\frac{C}{N_0}\right)_{\text{eff}} = \left(\frac{1}{C/N_0} + \frac{J/S}{QR}\right)^{-1} \quad (6)$$

式中: R 为扩频码速率,常见值为 1.023 Mbit/s; j/s 为干信比; Q 为抗干扰品质因数。

QPSK 调制下信号的误码率为:

$$P_e = 1 - (1 - \text{erfc} \sqrt{S_{\text{SNR}}/2})^2 \quad (7)$$

根据机载设备的实际工作环境,处于同频和邻频的导航信号对其影响较大,此外还有信道中的噪声,这些信号调制方式包括 BPSK、QPSK 等,因此主要考虑宽带干扰和窄带干扰下接收链路信号的性能。一般而言,干扰对信号的影响与其功率、重叠频率呈正相关,接收机的内部架构也使得不同调制方式的干扰带来的影响不同。

2 仿真建模

2.1 隔离度的建模

由于铱星机载天线工作在 L 波段,主要考虑同频和邻频的外部干扰信号,因此采用某 L 波段天线为发射端,铱星天线为接收端,进行隔离度建模。

将机身模拟为直径 1.2 m 的金属平面。根据实际所用型号天线,在 HFSS 中建立天线模型,见图 2。L 波段天线采用单层结构,正方形贴片边长为 22.5 cm,每边中点处分别加宽度为 4 cm、长度为 3 cm 和 6 cm 的短截线,介质基板材料为 Arlon AD450,相对介电常数为 4.5,采用同轴线馈电,馈电点在对角线距离中心 6.75 cm 处,过孔直径为 3 cm。两天线水平放置。仿真时端口类型设为集总端口,馈入功率为 1 mW,辐射边界为空气腔,采用 Interpolating 求解器。结果如图 3。

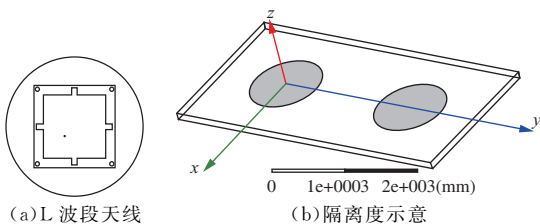


图 2 天线模型及隔离度仿真图

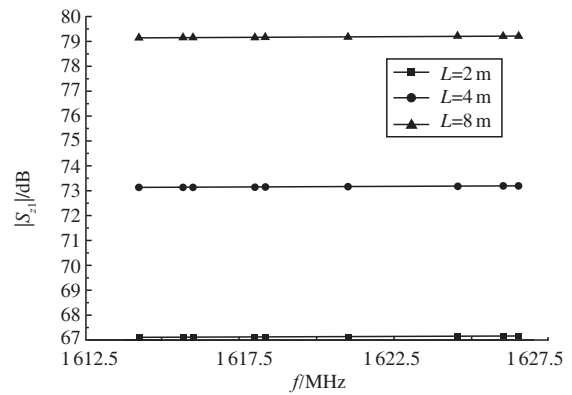


图 3 隔离度仿真结果

可以看出,两天线间的隔离度受到天线间距、相对位置、信号频率、干扰频率等因素的影响。

同一距离下,带内干扰的频率改变对隔离度影响很小,天线对干扰信号的接收没有明显差异;但随距离加倍,隔离度增加约 6 dB,与计算结果一致;相同功率和距离下,铱星天线对不同频率的带内干扰信号未呈现明显选择性。

2.2 误信率的仿真

铱星下行链路信号的结构及接收过程示意图 4。该突发信号包括无调制的单音信号、BPSK 调制独立字和经 DQPSK 调制的数据信息三部分。数据采用 DQPSK 调制,再与经 BPSK 调制的独立字组合,经根升余弦滤波器整形,再前置 2.6 ms 的无调制单音信号,最后上变频^[17]。信号经天线进入接收机,输入回路选择特定频率信号,变频电路将载波变为固定中频,中频信号经放大后由检波电路提取有用信号。部分参数见表 2,计算不同频率、占空比的干扰下接收信号的误信率,结果见图 5。

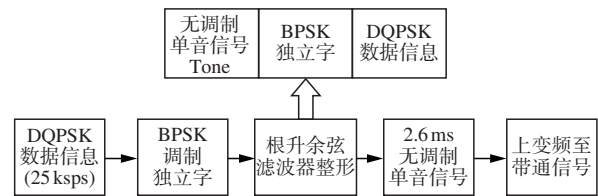
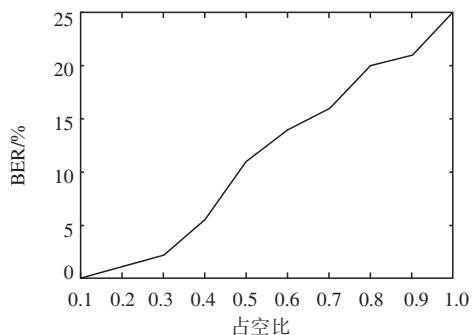


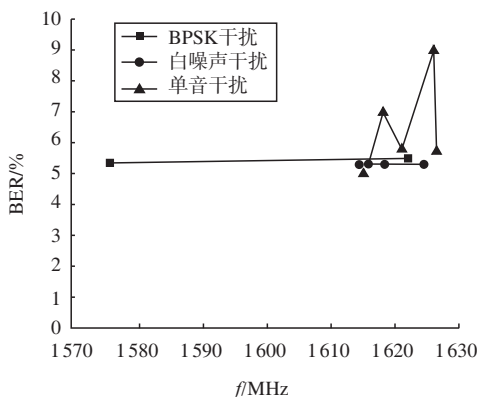
图 4 铱星用户下行链路信号结构

表 2 接收过程部分参数

关键参数	取值
随机数模块符号速率/ksps	25
平方根滤波器滚降系数	0.4
全向辐射功率/dBW	-4~9
天线增益/dBic	2.5~17
自由空间衰减/dB	167.38



(a)不同占空比下 BPSK 干扰的误信率



(b)不同频率下 3 种干扰的误信率

图 5 误信率的仿真结果

可以看出,脉冲 BPSK 干扰下接收信号的误信率随干扰的占空比的增加而增加。带内和带外的白噪声干扰和 BPSK 干扰对接收信号的影响程度几乎一致,其值在 5.3%~5.5%之间;宽带和窄带干扰对信号的影响程度与干扰频率、干扰带宽、干扰与有用信号的重叠程度有关。带内和带外的单音干扰对接收信号的影响随频率变化明显,在 1 618 MHz, 1 626 MHz 两个频点最大,在 1 615 MHz 时最小,接收信号的误信率分别为 7.1%、9.1%、5%。

3 实验方案

3.1 隔离度实验方案

实验框图见图 6。在空旷场地搭建实测平台,以 L 波段天线作为发射端,铱星天线作为接收端,两天线置于金属圆盘上,通过线缆与信号源、频谱仪连接。固定信号源功率,改变信号源频率和天线间距,使用频谱分析仪读取接收功率。

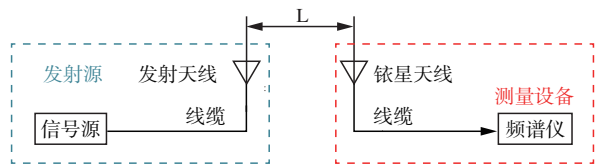


图 6 隔离度实验框图

3.2 误信率实验方案

实验框图见图 7,实验布置见图 8,实验设备型号见表 3。在空旷场地搭建实测平台,测试线路损

耗后连接设备、叠加特定功率的干扰并调整信号源类型,使用铱星设备拨号,记录通话质量随干扰频率和占空比的变化过程。铱星下行信号由铱星机载天线对星获取后送入耦合器的直流端,干扰信号由信号发生器产生后送入耦合端,铱星机载设备接在输出端。语音测试以固定速度循环报数。信号源频率包括带外频点 1 575 MHz、1 614 MHz、1 615 MHz,以及带内 1 616~1 626 MHz 部分频点。干扰种类包括宽带干扰(BPSK 和白噪声)和窄带干扰(单音信号)。

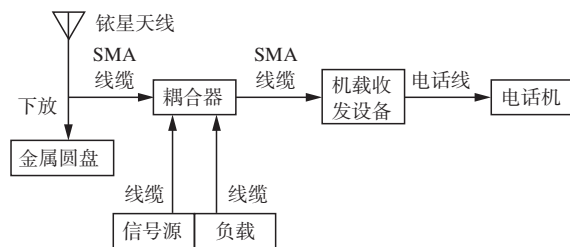


图 7 抗干扰实验框图

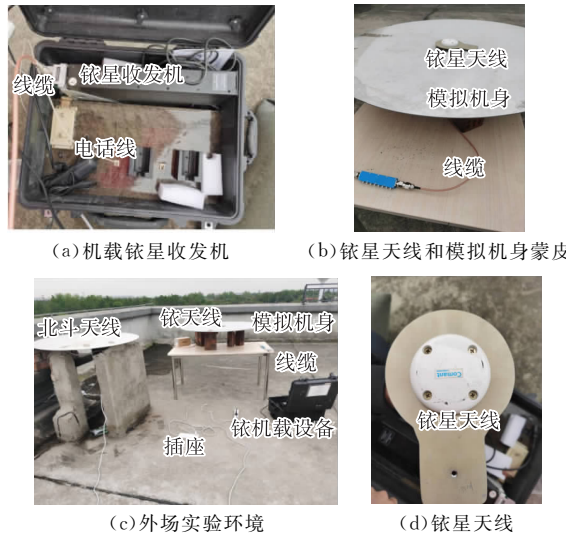


图 8 实验设备及场地布置

表 3 实验设备和型号

设备名称	厂家和型号
机载铱星天线	comant
耦合器	DTO-600
矢量信号发生器	Agilent N5182A
匹配负载	50 Ω
机载铱星收发机	ICS-120B
频谱分析仪	KeysightN9914B
金属反射板	模拟机体反射平面

评估接收信号的受干扰情况时,需选取接收机的关键性能指标,一般选择话音清晰度和误码率进行分析^[18]。除外部干扰,误码率还与接收机内部滤波器群时延、IQ 不平衡度等有关。

根据 RTCA DO-262E 及所用接收机参数,当设

置干扰功率为典型值时,认为接收机内部器件的非线性效应等可以忽略。话音清晰度除与误信率相关,还受设备质量、传输网络的影响。不考虑其他因素,选择误信率量化描述话音清晰程度,量化方式采取移动通信标准。

4 测试分析

4.1 隔离度测试

连接设备后配置信号源功率为 0 dBm,带宽为 1 kHz,在不同频率下依次调整距离,记录频谱分析仪示数。天线距地面高度 1.15 m,金属板直径 1.2 m,线损 2.1 dB。

4.1.1 结果对比

实测与仿真对比结果见图 9。

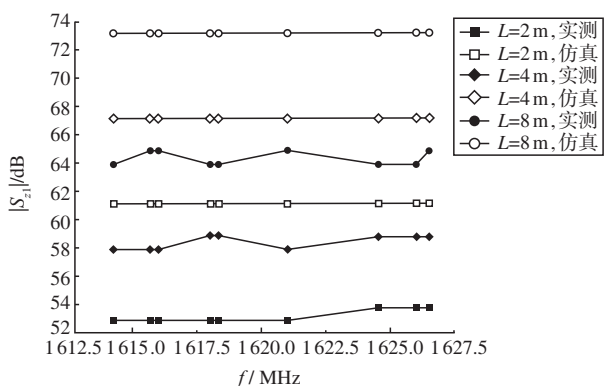


图 9 隔离度的仿真与实测对比

4.1.2 结果分析

在相同的频率条件下,隔离度随着间距的增加而增大;在相同的间距条件下,隔离度随着频率的增加而增大。在相同间距和功率下,不同频率的带内干扰下隔离度差异不大,即铱星天线对此没有明显选择性。

4.2 占空比测试

测试直通、耦合路径的线损后连接设备,配置信号源调制类型为 BPSK、中心频率 1 615 MHz、符号率 4.08 Msps、幅度 16 dBm;脉冲发射周期 1 s,初始脉宽为 100 ms。逐渐增加占空比,使用铱星设备拨号并循环报数,记录通话质量。直流通路衰减 1.6 dB,耦合通路衰减 32.7 dB。

4.2.1 结果对比

实测与仿真对比结果见图 10。

4.2.2 结果分析

脉冲 BPSK 干扰在不同占空比下影响不同。随占空比增加,品质因数减小,导致载噪比减小,误信率增加,干扰逐渐严重。当占空比大于 0.4 后误信率增加较快,最大值为 18.1%。

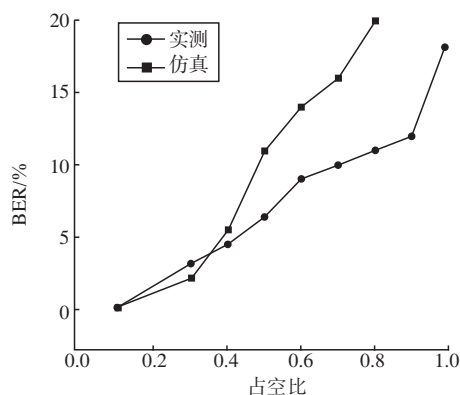


图 10 占空比变化的仿真与实测对比

4.3 抗干扰测试

4.3.1 宽带干扰测试

测试直通、耦合路径的线损后连接设备,配置信号源为脉冲调制,周期为 10 s、脉宽为 2 s、输出功率 16 dBm、根余弦滤波器系数 0.5。分别设定不同中心频率、符号率的 BPSK 干扰和不同中心频率、带宽的宽带白噪声干扰。使用铱星设备拨号并循环报数,记录通话质量。直通路损耗 1.7 dB,耦合路径损耗 32.9 dB。

4.3.2 窄带干扰测试

连接设备并配置信号源为连续发射、单音信号、输出功率为 16 dBm。使用铱星设备拨号并循环报数,记录通话质量。

4.3.3 结果对比

实测与仿真对比结果见图 11。

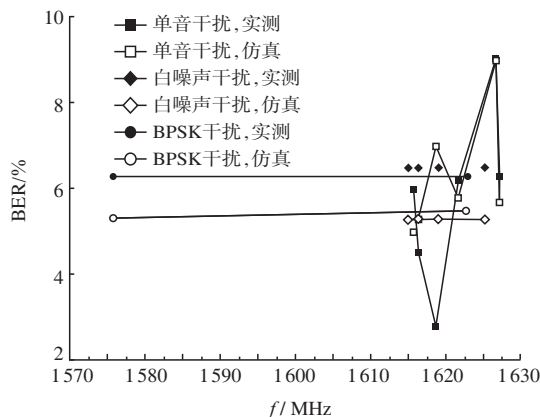


图 11 不同干扰的仿真与实测对比

4.3.4 结果分析

不同类型宽带干扰信号对接收信号的影响近似,其误信率范围为 6.3%~6.5%。结合公式,误信率应在干扰和有用信号频率重叠程度最大时达到最高。带内和带外的宽带干扰对接收信号的影响近似。

窄带干扰对误信率的影响小于宽带干扰,带内单音干扰造成的误信率变化趋势为先下降后上升。干扰程度与干扰频率有关,因此载噪比和误信率呈

现波动性,当干扰频率在有用信号功率谱峰值附近时品质因数的值减小。

4.5 测试结论

图 9、10、11 分别对比了实测和仿真、计算的结果,由于实测过程存在温度变化等因素,且仿真未考虑极化损耗、电磁波的二次辐射等,二者趋势相同、数值不同,但足以说明上述分析的合理性。

综合理论分析和实测结果,对比不同占空比、频率下的干扰对铱星下行链路信号误信率的影响,可以发现:相同功率水平下,宽带干扰比窄带干扰造成的影响更明显;不同种类的宽带干扰造成的影响差异不大;带内和带外的宽带干扰造成的影响差异不大,但窄带干扰影响呈先减小后增加趋势;脉冲干扰对接收信号的影响与占空比正相关。

5 结语

本文从误信率的角度评估了铱星机载设备下行链路信号的抗干扰性能,并进行了实测。测试结果可能与设备型号有关,但仍能为铱星机载收发机的电磁防护设计提供一定参考。后续如能进行上机测试,则结论将更具普适性。

参考文献

- [1] SPARAVALO M, YAVISYA V, LYSENKO A, et al. Approach to Building a National Satellite Communications System[C]//2019 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo). Odessa, Ukraine: IEEE, 2019: 1-3.
- [2] 黄森, 陈树新, 杨宾峰, 等. 多路 GNSS 欺骗干扰信号功率控制策略[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2017, 18(1): 76-80.
- [3] ISKANDAR M H, SURYANEGARA M. The Pulse Duration Effect to ADS-B Via Satellite Reception; Comparison Analysis of Iridium and Globalstar[C]//2016 22nd Asia-Pacific Conference on Communications (APCC). Yogyakarta, Indonesia: IEEE, 2016: 586-590.
- [4] BENZERROUK H, NGUYEN Q, FANG X X, et al. Alternative PNT Based on Iridium Next LEO Satellites Doppler/INS Integrated Navigation System[C]//2019 26th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). St Petersburg, Russia: IEEE, 2019: 1-10.
- [5] XU S J, TINGTING L. Design and Application of Iridium Satellite Radome for Smart Float Communication[C]//2020 Information Communication Technologies Conference (ICTC). Nanjing, China: IEEE, 2020: 226-230.
- [6] 韩雷晋, 卢虎, 谢岩, 等. 多频 GNSS 接收机自主完好性监测性能分析[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2015, 16(6): 32-37.
- [7] 秦红磊, 谭滋中, 丛丽, 等. 基于铱星机会信号的定位技术[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(9): 1691-1699.
- [8] 孙桂宇. 第十一届中国卫星导航年会论文集 S13 自主导航: A 集[C]//北京: 中科北斗汇科技有限公司, 2020: 7.
- [9] ORABI M, KHALIFE J, KASSAS Z M. Opportunistic Navigation with Doppler Measurements from Iridium Next and Orbcomm LEO Satellites [C]//2021 IEEE Aerospace Conference (50100). Big Sky, MT, USA: IEEE, 2021: 1-9.
- [10] FAN S Y, ZHAO L J, XIAO W J, et al. Performance Analysis and Simulation of Iridium Navigation Satellite Based on STK[C]//2012 Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. Shanghai, China: IEEE, 2012: 291-295.
- [11] 崔志颖, 岳富占, 田润, 等. 基于铱星突发信号的导航定位技术研究[J]. 全球定位系统, 2021, 46(2): 77-85.
- [12] 唐世庆, 李云龙. 对某低轨卫星通信系统上行链路的干扰研究[J]. 舰船电子工程, 2014, 34(9): 59-61.
- [13] 王立. 机载天线隔离度仿真与分析[J]. 电讯技术, 2012, 52(8): 1383-1386.
- [14] CHOWDHURY M R. Shahriar, Mitigation of Interference From Iridium Satellites By Parametric Estimation and Subtraction[D]. Blacksburg VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2006(12): 22.
- [15] 郭海玉, 鲁祖坤, 陈飞强, 等. 窄带与脉冲干扰对卫星导航信号载噪比的影响[J]. 全球定位系统, 2021, 46(1): 50-56.
- [16] 刘春玲, 张自豪. 北斗接收机在干扰下的性能研究[J]. 计算机科学, 2017, 44(2): 163-166.
- [17] 刘瑞华, 王新添. 北斗无线电测定业务机载设备与铱星机载地球站间兼容性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(10): 4103-4109.
- [18] 周锦程, 王学田. 系统间电磁兼容详细预测方法研究[J]. 微波学报, 2018, 34(S2): 422-425.

(编辑:姚树峰)