



综述

卫星干扰处理技术综述

郝才勇

(国家无线电监测中心深圳监测站, 广东 深圳 518120)

摘要:为了应对新的卫星干扰形势并针对卫星干扰问题提出有效的解决方法,研究了卫星干扰处理的新技术和策略,总结了卫星干扰源定位技术及其发展趋势,提出利用无人机辅助查找地面干扰源的技术,介绍了采用载波标识(CID)标准快速确定卫星干扰源的方法,给出了采用终端设备认证和数据共享策略解决干扰的实施方案。研究表明,多方联合、数据共享是解决卫星干扰问题的有效方法。

关键词:卫星干扰;干扰定位;无人机;载波标识;数据共享;终端认证

中图分类号: TN927

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2017018

A survey of mitigating satellite interference technology

HAO Caiyong

Shenzhen Station of State Radio Monitoring Center, Shenzhen 518120, China

Abstract: To deal with the new situation of satellite interference and solve the problem of satellite interference effectively, new techniques and methods of mitigating satellite interference were studied. The technology and development trend of satellite interference geolocation were summarized. The method of applying unmanned aerial vehicle assisted to find the ground interfering source was proposed, and it was introduced that using carrier identification (CID) standard to determine the satellite interference source. The implementation method of satellite terminal authentication and data sharing strategy to combat interference was given. It shows that multi-party cooperation and data sharing may be the most effective way to solve the problem of satellite interference.

Key words: satellite interference, interference geolocation, unmanned aerial vehicle, carrier identification, data sharing, terminal authentication

1 引言

随着在轨卫星数量的不断增多、卫星频谱资源的愈加紧张以及自动化设备和无人值守站的迅速增加,卫星干扰问题日益突出。全球每年大约发生上百起较为严重的卫星干扰事件,并且干扰事件发生数量在持续上升^[1]。

卫星干扰对卫星运营商和卫星资源监管部门造成了严重的威胁。对于卫星运营商,干扰导致有效频谱的价值损失、频率切换时延增加、通信服务质量下降甚至通信中

断等恶劣的影响,其代价不仅是造成公司营业额下降,更重要的是处理这些干扰需要消耗大量的资源,排除干扰往往需要几周甚至几个月的时间^[2]。对于卫星资源监管部门,卫星干扰扰乱了通信秩序,降低了卫星轨道和频谱资源的利用率,损害了卫星通信的经济价值和社会效益。卫星干扰通常分为下列几种。

- 设备故障:由卫星地球站设备运行不稳定导致,如带外杂散、信号交调、频率漂移等。
- 操作错误:包括不良设备安装在操作过程中设置

收稿日期:2016-12-01;修回日期:2017-01-01



- 需要至少 4 个已知参考站:参考站能在一定程度上修正卫星星历误差,参考站在地面上距离目标干扰源越近,误差修正效果越好^[11]。
- 较好的定位时段:FDOA 线在地面的分布随着时间的变化发生偏转,FDOA 线与 TDOA 线之间的夹角越小其定位误差越大,在某些时段当这两条线接近平行时,定位结果无效^[12]。

当这些条件都满足时,双星定位能在地面上将卫星干扰源确定到长轴半径为几十千米的椭圆区域,定位条件较好时误差半径能达到几千米。

2.2 三星定位

为了提高双星定位的精度,尤其是解决在参考站数量较少时定位误差较大的问题,参考文献[13-15]提出了三星定位技术。三星定位与双星定位的原理相似,但是额外引入了一颗邻星,利用信号分别经过两颗邻星和主星的到达时间差得到两条 TDOA 线,其交点为干扰定位结果。定位原理如图 2 所示。

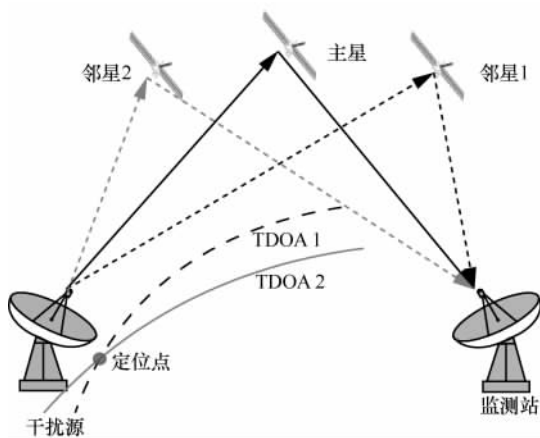


图 2 三星定位原理

三星定位去除了对定位精度影响较大的 FDOA 而保留了稳定性较强的 TDOA,在满足定位条件时,能够将定位精度提高到几千米^[2]。但是为了实现高精度,三星定位要求两条时差线的夹角较大,对邻星的选择条件更加苛刻^[16],通常将三星定位作为双星定位的辅助。近年来,随着高增益信号处理技术的发展,邻星的选择条件较容易满足,从而使三星定位技术的应用越来越普遍。

2.3 单星定位

双星定位和三星定位的限制条件较多,要完成定位需要至少两颗轨道位置相隔较近的卫星,同时还必须知道这些卫星准确的星历数据。对于某些卫星特定频段上的干扰,

很难找到可用邻星,尤其是点波束卫星,信号覆盖限制在特定的地面区域,基本没有邻星可用,导致定位失败。为了摆脱邻星和卫星星历等限制条件,提出了单星定位技术。

单星定位最初采用的方法是多普勒频率跟踪匹配法^[17-19],定位过程需要长时间信号测量(长达 12 h),并且载波频率的提取非常困难。新的单星定位技术^[20]则通过大量信号的对比发现匹配趋势来定位。定位原理为:信号传输过程中受到大气层、电离层和天气变化等因素的影响产生信号衰落,由于不同位置的地球站对应信号的传输距离和角度不同,导致信号接收电平抖动的差异,因此可通过同时测量多个信号的电平值,比较干扰信号与这些已知信号电平值抖动的变化趋势,其相似度反映出干扰源与已知信号源地理位置的距离,从而估计出未知干扰源的位置。图 3 显示了干扰信号与不同载波信号的匹配情况,第一个信号发射位置距离干扰源较远,第二个信号与干扰源处于同一位置。

单星定位能摆脱邻星和卫星星历条件的限制,但是需要引入大量的参考站。并且单星定位的精度依赖于干扰源与参考站的距离,已知参考站的分布范围足够广、数量足够多,则定位精度越高。在双星定位和三星定位都无法满足定位条件的情况下,单星定位可作为相对有效的辅助技术。

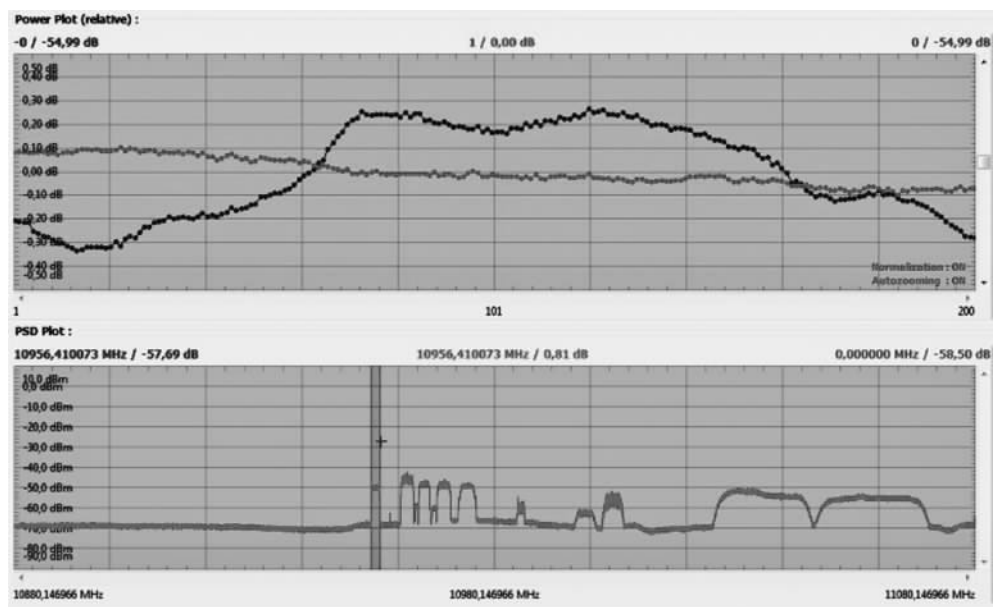
2.4 定位技术比较与发展趋势

3 种定位技术的定位条件和定位能力各有优势和局限,比较情况见表 1,对于不同的干扰情况选择适合的定位技术可提高定位成功率和定位精度。

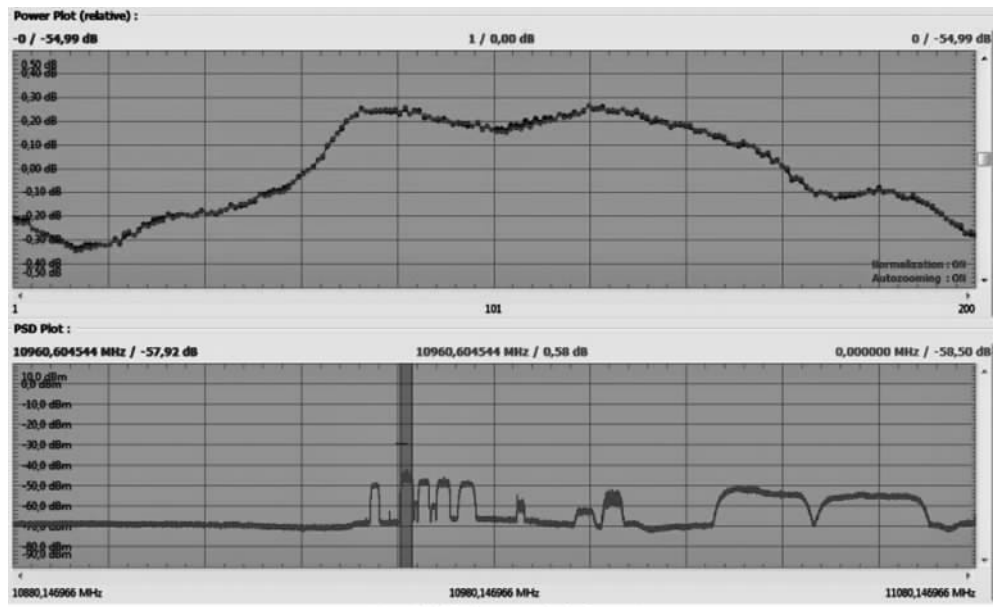
随着定位技术的不断创新,卫星干扰源定位系统的定位能力越来越强,但目前仍有一些问题有待解决,如难以对特殊类型的干扰信号(调频信号、扫频信号、单载波信号、扩频信号、移动目标信号等)进行定位、定位限制条件过于严格等。

未来卫星干扰源定位系统将向如下 4 个方面发展。

- 定位速度更快:定位系统通过预置定位参数,实现自动化和智能化控制,并在不同卫星运营商之间共享数据(如卫星信息、干扰信息等)来加快定位速度。
- 定位更准确:引入更多的定位相关信息,消除定位的不确定性,如天气预报信息、高精度地图、路网信息、高精度星历数据、地球站信息等。
- 独立性更强:完成定位或达到一定的定位精度所需的定位限制条件将越来越少,如邻星选择、定位时段、定位地点、参考站条件等;定位系统的数据采集和信号定位两部分将分离,定位系统不受限于干扰出现的时间。



(a) 干扰信号不匹配 (相似度8%)



(b) 干扰信号匹配 (相似度99%)

图 3 干扰信号与不同载波信号的匹配情况

表 1 定位技术比较

定位条件及性能	双星定位	三星定位	单星定位
邻星条件	需要 2 颗	需要 3 颗	不需要
卫星星历	需要高精度	需要	不需要
参考站	需要 4 个以上	需要 1 个	需要大量参考站
定位时段	需要	不需要	不需要
定位精度	几十千米	几千米	与参考站分布相关
点波束定位	不具备	不具备	具备

智能化程度高:定位系统根据历史监测数据和定位案例进行干扰检测、定位参数预置、定位模式学习、定位结果修正等。

3 干扰源地面查找技术

目前通过卫星干扰源定位系统得到的定位结果是一个长轴半径为几千米到几十千米的椭圆区域,为了进一步排除干扰源,需要在该定位区域内对干扰源进行地面逼近查



找。通常使用车载或手持便携式信号监测设备在定位区域地面上搜索查找干扰信号,通过接收信号的强度和来波方向逐步逼近干扰源发射天线,最终排除干扰,如图4所示。

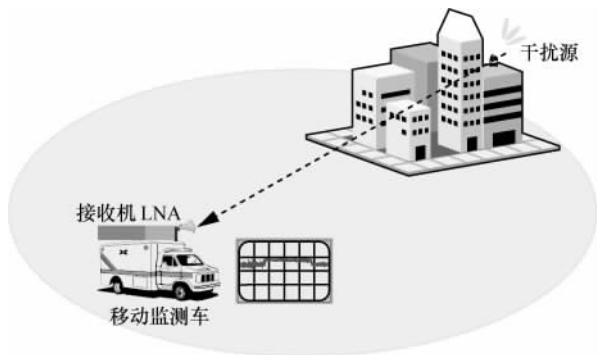


图4 干扰源地面逼近查找

该方法在空旷区域或者地势较高的监测点,能够相对容易地检测到干扰信号,但是在建筑物密集的市区却很难成功检测。由天线辐射方向图理论可知^[21],干扰源天线指向卫星发射信号,信号旁瓣则通过地面开场传播,因此地面监测设备能收到的信号非常弱。此外,卫星通信的射频信号传播受到周围建筑物遮挡产生的衰减非常大,干扰信号旁瓣常常位于噪声之下,难以被地面监测设备捕获到。因此,要在该区域中找到一个直径仅为几米的发射天线难度非常大。

为了解决干扰源查找的“最后一公里”问题,提出了采用无人机辅助干扰源查找的方法,其原理如图5所示。在使用双星定位得到的初始定位区域上,将携带便携式监测设备的无人机升空,无人机的高度优势使得监测信号的覆盖范围更广;同时无人机避开了干扰源附近的障碍物对信号的遮挡,并且更靠近信号主瓣,相对于位于地面的监测设备显著地提高了接收信号信噪比,更容易检测到干扰信号,从而得到一条测向线(DF线)。同时,利用双星定位中TDOA线具有稳定性的特点^[13,22],保留定位系统得到的TDOA线。DF线与TDOA线的交点即干扰源在地面的位置。该方法有效地降低了卫星干扰源地面查找的难度,减少了排查时间。

4 采用CID确定干扰

解决卫星干扰问题的传统方法依赖于干扰源定位系统和地面干扰源排查技术,这个过程常常需要消耗大量的时间和人力成本。为了快速识别并及时终止不可接受的干扰,SiRG(卫星干扰消除研究组)和SDA(空间数据联盟)提

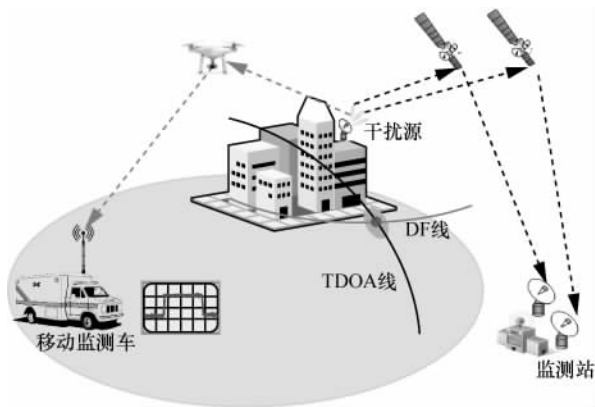


图5 无人机辅助地面干扰源查找

出了CID(carrier identification)标准^[23]。CID是嵌入卫星上行发射载波信号中的标识码,用来识别该载波信号的身份信息,如地理位置、运营商和用户的联系方式等^[24,25]。

CID采用扩频信号与实际通信信号独立,信号位于噪底之下(DVB-CID载波典型值位于主信号的27 dB之下),能被卫星运营商解码和识别。在使用CID之前,需要建立卫星CID数据库记录载波信号与对应地球站的信息,每个卫星运营商拥有自己的CID数据库,同时通过空间数据联盟或国家卫星管理机构来共享其他卫星运营商的CID数据。基于CID的卫星干扰处理流程如图6所示,包含以下4个步骤。

步骤1 卫星运营商检测到干扰载波信号。

步骤2 解码干扰信号的CID信息。

步骤3 查询该干扰信号的CID: 如果在该卫星运营商的CID数据库中,直接成功查到;否则通过卫星数据共享组织查询其他卫星运营商的CID数据库,直到成功查到。

步骤4 使用查到的载波CID确定干扰信息,联系操作者排除干扰。

CID标准促进了卫星干扰源的快速识别并显著减少了干扰排查时间,是一种高效和低成本的干扰处理工具。目前发展的难点在于在不同的卫星运营商、国家卫星监管机构之间建立和共享CID数据库,并促进设备制造商将其作为强制性标准。近年来CID标准发展迅速,国际电信联盟(ITU)已于2013年2月份发布了卫星广播业务的CID-DVB标准^[26];美国联邦通信委员会(FCC)已要求美国所有的新闻采集(SNG)传输在2016年6月1日前采用CID标准,并将在2017年12月31日前对所有SCPC和MCPC视频以及数据传输采用CID标准^[27];欧洲电信标准协会(ETSI)已将CID定为正式标准,用在数字视频广播

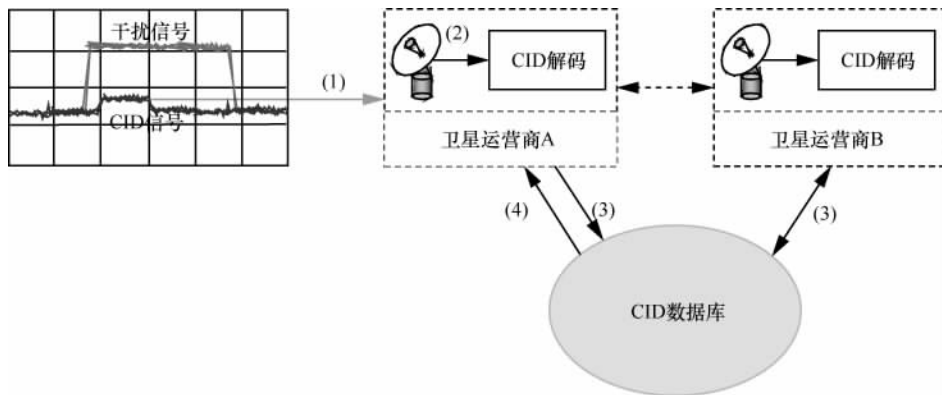


图 6 基于 CID 的卫星干扰处理流程

(DVB)。目前国际主要卫星运营商都具有 CID 检测能力,约 95%的调制器和越来越多的数字新闻采集编码器(超过总市场的 50%)采用了 DVB-CID 标准^[28]。

5 设备认证

卫星信号传输需要对卫星地球站的天线指向、发射频率、发射功率、极化方式、载波带宽和调制技术等参数进行正确控制,任何一个环节出现故障或操作问题都可能会导致干扰。当前绝大多数卫星终端采用的是低成本的甚小孔径终端(VSAT),现场安装技术人员的技术能力参差不齐,这将会以多种方式导致卫星干扰的发生,主要包括:天线指向偏离造成的邻星干扰、交叉极化干扰和转发式干扰等,全球约 39%的卫星干扰来自于 VSAT 干扰^[29]。

减少干扰的最好方法是预防干扰发生,特别是对于很难识别和定位的干扰,设计良好的设备终端能够比各种定位技术更快地终止干扰。地球站设备认证是保证地球站设备性能和预防干扰最有效的方式,强制要求设备在进入市场和安装之前必须进行技术指标核准和认证非常有必要。地球站设备认证要求的测试参数主要包括以下 3 个方面:范围测试,天线增益和天线方向图的有效范围;指向测试,测量天线在不同环境下的指向偏差,Eutelsat 要求在任何环境下指向偏差小于 0.4° ;稳定性测试,天线抗风能力测试。

除了采取严格的地球站设备认证,制定和实施严格的培训计划,帮助技术人员熟练掌握终端设备各项设置和通信接入流程,也是预防干扰发生的有效手段。

6 数据共享

卫星干扰源定位需要提供精确的卫星星历数据、可靠

的参考源信息、准确的卫星覆盖范围图、卫星转发器频谱分配数据以及 CID 数据。然而,这些卫星数据往往掌握在卫星运营商内部,不利于快速、准确地解决卫星干扰问题。

显然,不同卫星运营商之间进行数据共享能提高卫星干扰的处理效率。数据共享的目的是联合国际上的各个卫星运营商和卫星监管机构,创建一个共享的卫星数据中心,用于处理卫星干扰。数据中心主要包含以下内容。

(1) 卫星参数和载波信号数据

包括:准确的卫星星历数据,波束覆盖范围(尤其是点波束),卫星转发器频谱分配信息,各个载波信号的频率、带宽,信号对应的地球站数据(包括天线注册信息),CID 数据库等。这些数据可为干扰定位提供最佳的定位条件,为 CID 干扰识别提供广泛的数据支持。

(2) 联系人信息

包括地球站设备操作人员信息,如姓名、电子邮件、电话、职务等,以便确定干扰后能及时联系到操作人员终止干扰。

(3) 干扰告警信息

描述干扰事件的具体信息或处理该干扰所需的信息:受影响的卫星,被干扰的业务,干扰影响程度,干扰信号频率、带宽、极化方式、调制方式、持续时间、频谱图等。数据中心将干扰告警信息发送到所有成员,对干扰信息进行集中分配、寻求帮助并提供及时反馈。

(4) 干扰数据库

建立干扰事件的记录和历史统计数据库,用于案例研究。主要包括描述干扰事件的信息(干扰的业务、干扰信号特性、干扰活动日志),执行干扰处理的方法(干扰定位、CID 识别、干扰地面查找),产生干扰的原因(设备故障、操作失误、恶意干扰等)。在干扰出现时可先搜索与之相关的



历史记录,找到有价值的信息。同时,从发生的干扰事件中收集信息转交给国际电信联盟和受干扰方的政府部门,以支持谈判。此外,可将干扰数据匿名处理后提供给干扰处理研究机构,使用这些数据来设计干扰过滤器和其他方法,提高卫星系统的抗干扰能力。

数据共享不仅可以用来直接为干扰处理提供必要和辅助的信息,而且可作为不同成员之间交流和分享干扰事件处理经验的平台。目前,空间数据联盟正在全球范围内建立和推动卫星数据共享机制。同时,在建立数据共享机制时必须保证数据的安全性,各个卫星监管机构、卫星运营商和商业定位系统公司之间应建立数据使用的法律规则和约束条件。

7 结束语

解决卫星干扰问题没有一个简单或容易的方法,不仅是一个技术问题,不是依靠某项干扰源定位技术或卫星公司、卫星监管机构采取的某项措施能够完成的,需要进行多方面的合作和数据共享,也需要从卫星通信的整体流程来考虑。这包括研究卫星通信和信号处理新技术对卫星系统抗干扰能力的影响(如星上定位技术、波束成形技术);对用户终端质量认证和对设备安装人员及操作人员组织必要的技术培训,从而预防干扰发生;卫星运营商和卫星监管机构如何监测通信质量,检测有害干扰和实施干扰源定位和查找的措施;建立和促进数据共享机制,联合卫星运营商、设备制造商、卫星监管机构、国际组织、学术研究机构在内的多个卫星相关部门展开卫星干扰处理方面的合作和经验交流;制定标准和法律来规范干扰预防和处理的流程,并通过行政和政治手段提高人们对卫星干扰、卫星资源监管和相关法律条款的认识。

参考文献:

- [1] SHARMA S K, CHATZINOTAS S, OTTERSTEN B. Satellite cognitive communications: interference modeling and techniques selection[C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference (ASMS) and 12th Signal Processing for Space Communications Workshop(SPSC), September 5-7, 2012, Vigo, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2012: 111-118.
- [2] 郝才勇,刘恒.采用空间稀疏性的单星无源定位方法[J].电信科学,2016,32(4): 65-69.
HAO C Y, LIU H. Method of single satellite passive geolocation using spatial sparsity [J]. Telecommunications Science, 2016, 32(4): 65-69.
- [3] 郭道省,张邦宁.透明转发器卫星通信系统在干扰条件下的容量[J].系统工程与电子技术,2005,27(5): 866-868.
GUO D S, ZHANG B N. Analysis on capacity for transparent transponder satcom system with interference [J]. Systems Engineering & Electronics, 2005, 27(5): 866-868.
- [4] DAVID H, NIGEL S, RICCARDO B, et al. Interference localization for EUTELSAT satellites-the first European transmitter location system [J]. International Journal of Satellite Communications, 1997, 15(3): 155-183.
- [5] FENECH H, AMOS S, TOMATIS A, et al. High throughput satellite systems: an analytical approach [J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2015, 51(1): 192-202.
- [6] KOUROGIORGAS C I, ARAPOGLOU P D, PANAGOPOULOS A D. Statistical characterization of adjacent satellite interference for earth stations on mobile platforms operating at Ku and Ka bands[J]. IEEE Wireless Communication Letters, 2015, 4(1): 82-85.
- [7] 孙正波,叶尚福.利用互模糊函数实现卫星干扰源定位[J].电波科学学报,2004,19(5): 525-529.
SUN Z B, YE S F. Satellite interference location using cross ambiguity function [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2004, 19(5): 525-529.
- [8] RICCARDO B, DAVID H, NIGEL S. Interference localization for the EUTELSAT satellite system [C]//IEEE Globecom'95, November 14-16, 1995, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 1995: 1641-1651.
- [9] GRANT H, SALT E, DODDS D. Geolocation of communications satellite interference [C]//IEEE Electrical and Computer Engineering, May 5-8, 2013, Regina, SK, Canada. New Jersey: IEEE Press, 2013: 1-4.
- [10] RIDEOUT R. DERA transmitter location service (TLS) [C]//IEEE Colloquium on Military Satellite Communications, June 6-10, 2000, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2000: 1-6.
- [11] 夏畅雄,叶尚福,王俊辉.卫星干扰源定位系统中卫星历校正技术[J].宇航学报,2008,29(3): 860-863.
XIA C X, YE S F, WANG J H. Ephemeris determination in satellite interference location system[J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(3): 860-863.
- [12] 瞿文中,叶尚福,孙正波.卫星干扰源定位中的误差分析与预测[J].电波科学学报,2005,20(5): 590-593.
QU W Z, YE S F, SUN Z B. Analysis and prediction of satellite interference location error [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2005, 20(5): 590-593.
- [13] 郝才勇,刘恒,刘宏立.基于TDOA的卫星干扰源定位方法的研究[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2012,24(4): 442-446.

- HAO C Y, LIU H, LIU H L. Research on satellite interference location based on TDOA [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2012, 24(4): 442-446.
- [14] DOU H, LEI Q, CHENG J, et al. Research on TDOA parameters estimation for satellite interference localization [C]// IEEE International Conference on Signal Processing, March 3-11, 2012, Singapore. New Jersey: IEEE Press, 2012: 259-262.
- [15] 任文娟, 胡东辉, 丁赤飏. 三星时差定位系统的多时差联合定位方法[J]. 雷达学报, 2012, 1(3): 262-269
- REN W J, HU D H, DING C B. Multi-TDOA location algorithm for three satellites TDOA passive location system [J]. Journal of Radars, 2012, 1(3): 262-269.
- [16] 王莹桂, 陈振林, 李腾, 等. 三星时差定位系统的主要系统误差分析[J]. 飞行器测控学报, 2010, 29(1): 85-89.
- WANG Y G, CHEN Z L, LI T, et al. Major system error analysis based on tri-satellite TDOA location system [J]. Journal of Spacecraft TT & C Technology, 2010, 29(1): 85-89.
- [17] 陆安南, 孔宪正. 单星测频无源定位法 [J]. 通信学报, 2004, 25(9): 160-168.
- LU A N, KONG X Z. Passive localization from frequency measurements by single satellite[J]. Journal on Communications, 2004, 25(9): 160-168.
- [18] KALANTARI A, MALEKI S, CHATZINOTAS S, et al. Frequency of arrival-based interference localization using a single satellite [C]//Advanced Satellite Multimedia Systems Conference, September 5-7, 2016, Palma de Mallorca, Spain. New Jersey: IEEE Press, 2016.
- [19] 龙宁. 单星无源定位原理及精度分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(6): 17-20.
- LONG N. Single satellite passive localization principle and precision analysis [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(6): 17-20.
- [20] The one-satellite geolocation solution SIECAMS®ILS ONE[EB/OL]. [2016-10-01]. <http://www.convergence-creators.siemens.com/ils-one-improvements-eutelsat-roll-out.html>.
- [21] 李文臣, 王雪松, 王国玉, 等. 偏馈抛物面天线方向图外场测试分析[J]. 电波科学学报, 2007, 22(5): 842-847.
- LI W C, WANG X S, WANG G Y, et al. Outfield test analysis of offset-fed parabolic reflector antenna [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2007, 22(5): 842-847.
- [22] PATTISON T, CHOU S I. Sensitivity analysis of dual-satellite geolocation [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(1): 56-71.
- [23] MIGNONE V, SACCO B, DE BIE U, et al. DVB-CID: the novel DVB standard for satellite carrier identification [C]//31st AIAA International Communications Satellite Systems Conference, October 14-17, 2013, Florence, Italy. New Jersey: IEEE Press, 2013: 5602.
- [24] WEERACKODY V. Sensitivity of satellite interference to locations of small-aperture terminals [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2016, 52(1): 245-260.
- [25] COLEMAN M. Technology & thinking to combat satellite interference [C]//Institution of Engineering & Technology, June 16-18, 2015, London, UK. New Jersey: IEEE Press, 2015.
- [26] Recommendation ITU-R S.2062-0 [EB/OL]. [2016-10-01]. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/s/R-REC-S.2062-0-2014-09-I!! PDF-E.pdf.
- [27] FCC rule ATIS/CID-47 CFR 25.281 [EB/OL]. [2016-10-01]. <http://sating.org/wp-content/uploads/2013/09/FR-2014-02-12.pdf>.
- [28] DVB carrier ID [EB/OL]. [2016-10-01]. <http://www.sating.org/working-groups/carrier-id/>.
- [29] Type approval characterization-Eutelsat[EB/OL]. [2016-10-01]. <http://www.eutelsat.com/files/contributed/satellites/pdf/esog120.pdf>.

[作者简介]



郝才勇(1985-),男,国家无线电监测中心深圳监测站工程师,英国伦敦帝国理工学院访问学者,主要研究方向为无线电频谱监测与卫星通信。