

地面卫星接收天线干扰信号的综合预防策略研究

姜锦涛

石嘴山市新闻传媒中心 宁夏 石嘴山 753000

摘要: 本文聚焦地面卫星接收天线干扰信号综合预防策略。先对干扰信号分类并剖析特性,明确其对接收系统的影响机制。基于此,阐述预防策略构建原则与技术框架,研究抗干扰天线设计、信号处理与增强等关键技术。最后提出未来研究方向,包括智能抗干扰、复杂干扰协同抑制等。旨在提升卫星通信抗干扰能力,保障其在复杂电磁环境下的可靠性与稳定性,为相关领域研究与应用提供参考。

关键词: 卫星通信;地面接收天线;干扰信号;综合预防策略

引言:卫星通信在现代社会作用关键,地面卫星接收天线作为其前端设备,信号接收稳定性直接影响通信质量。然而,复杂电磁与自然环境使天线易受各类干扰,导致信号信噪比下降、误码率升高等问题。对干扰信号分类并分析特性,是构建有效预防策略、提升抗干扰能力的前提。本文将深入探讨干扰信号分类、特性,构建综合预防策略框架,研究关键技术,为卫星通信稳定运行提供支撑。

1 地面卫星接收天线干扰信号分类与特性分析

地面卫星接收天线作为卫星通信系统的关键前端设备,其接收信号的稳定性直接决定通信质量。在复杂的电磁环境与自然环境中,天线极易受到各类干扰信号的影响,导致信号信噪比下降、传输误码率升高,甚至出现通信中断。对干扰信号进行科学分类并深入剖析其特性,是后续构建有效预防策略、提升系统抗干扰能力的前提。通过梳理干扰信号的来源、传播路径及作用机制,可明确不同干扰的核心影响要素,为针对性技术研发和策略制定提供理论支撑,同时也能为接收系统的优化设计提供方向,保障卫星通信在各类应用场景下的可靠性与稳定性。

1.1 干扰信号类型

1.1.1 自然干扰

自然干扰是由自然环境自身产生的电磁干扰,其形成与天体活动、大气现象等自然过程密切相关,具有随机性强、覆盖范围广且难以人为控制的特性。常见的自然干扰包括宇宙噪声、大气噪声、雷电干扰等。宇宙噪声源于银河系、太阳等天体的电磁辐射,在卫星通信频段会形成背景干扰,强度随频段升高呈下降趋势;大气噪声由大气中电离层波动、水汽凝结等过程产生,在对流层传播中会对信号造成衰减与干扰,尤其在阴雨、雷雨天气下干扰强度显著增强;雷电干扰则是雷电放电过

程中产生的强电磁脉冲,其频谱覆盖范围广,会对卫星接收天线造成瞬时强干扰,严重时可能损坏设备。自然干扰的强度受季节、地域、气象条件等因素影响较大,给干扰预测与防控带来一定难度。

1.1.2 人为干扰

人为干扰是人类生产生活及各类活动产生的电磁信号对卫星接收天线造成的干扰,是当前卫星通信系统面临的主要干扰类型之一,具有来源多样、可控性差异大的特性。根据干扰意图,可分为无意干扰和有意干扰两类^[1]。无意干扰主要源于广播电视发射台、移动通信基站、雷达设备等合法无线设备的频率溢出,以及工业电磁设备、电力传输线路产生的电磁辐射,此类干扰多因频率规划不合理、设备滤波性能不佳或布局不当导致;有意干扰则是人为刻意发射干扰信号阻断或扰乱卫星通信,常见于恶意破坏、军事对抗等场景,干扰信号具有针对性强、强度大、调制方式灵活等特点,对卫星通信系统的破坏性极强。人为干扰的影响范围从局部区域到广域覆盖不等,严重威胁卫星通信的安全性及稳定性。

1.1.3 设备间干扰

设备间干扰是指卫星接收系统内部各设备之间,或接收天线周边其他电子设备之间产生的电磁干扰,属于系统内或近场干扰,其影响程度与设备布局、电磁兼容性设计、频率分配方案密切相关。从干扰来源看,主要包括接收系统内部的低噪声放大器、变频器、调制解调器等设备的电磁辐射泄漏,以及周边同频段通信设备、电力设备、控制电路等产生的电磁信号耦合。这类干扰的传播路径较短,多以传导或近场辐射的方式作用于接收天线,表现为信号失真、信噪比下降等问题。通过优化设备布局、提升电磁屏蔽性能、合理规划频率等措施,可有效降低设备间干扰的影响。

1.2 干扰信号的特性分析

干扰信号的特性是制定抗干扰策略、研发抗干扰技术的核心依据,主要从时域、频域、空域及调制域四个维度展开分析,不同类型干扰在各维度呈现出差异化特征。时域特性上,自然干扰中的雷电干扰表现为瞬时脉冲特性,持续时间短但峰值强度大;宇宙噪声和大气噪声则呈现连续平稳的随机特性;人为干扰中,有意干扰可能表现为突发脉冲、连续波或扫频信号,无意干扰多为连续平稳信号。频域特性方面,自然干扰的频谱多为宽频带连续分布,人为干扰则可能是窄带集中频谱或宽频扫频频谱,设备间干扰多集中在特定工作频段附近。空域特性上,干扰信号的来波方向、极化方式与卫星信号存在差异,可作为干扰识别与抑制的重要依据。调制域特性中,有意干扰的调制方式灵活多变,可能采用调幅、调频、调相或复杂数字调制,而自然干扰多为非调制随机信号,这些特性差异为干扰信号的精准识别与针对性防控提供了关键支撑。

1.3 干扰对接收系统的影响机制

干扰信号通过不同作用路径对地面卫星接收系统产生影响,其核心影响机制表现为信号叠加失真、系统性能下降及设备损坏三个层面。在信号叠加层面,干扰信号与卫星有用信号在接收天线处叠加,导致合成信号的幅值、相位或频率特性发生畸变,若干扰信号强度较大,会直接淹没有用信号,造成信号无法正常解调。在系统性能层面,干扰会导致接收系统的信噪比降低,进而使传输误码率升高,通信速率下降;对于数字卫星通信系统,干扰还可能引发同步丢失、帧同步错误等问题,影响系统的正常工作时序^[2]。长期存在的强干扰会加剧接收设备内部元器件的损耗,降低设备使用寿命,而瞬时强干扰(如雷电干扰)则可能突破设备的耐压、耐流极限,直接造成低噪声放大器、变频器等核心器件损坏,导致接收系统瘫痪。另外,干扰还可能影响接收系统的动态范围,使系统对有用信号的接收灵敏度下降,无法正常接收弱信号,进一步扩大通信质量劣化的范围,严重影响卫星通信系统的服务稳定性与可靠性。

2 综合预防策略的构建原则与技术框架

构建地面卫星接收天线干扰综合预防策略,需以保障通信稳定性、提升抗干扰能力为核心目标,结合干扰信号的特性与影响机制,遵循科学的构建原则并搭建完善的技术框架。

2.1 预防策略的设计原则

地面卫星接收天线干扰综合预防策略设计,要遵循五大核心原则。针对性原则,依不同干扰特性、来源和影响机制,制定差异化防控措施,如对有意干扰强化

识别与抑制技术,对自然干扰提升抗随机干扰能力。系统性原则,预防策略要覆盖干扰全流程,从产生前的预防、发生时的识别抑制到干扰后的应急恢复,各环节无缝衔接,形成闭环防控体系。前瞻性原则,设计时考虑未来电磁环境、卫星通信技术及潜在干扰类型变化,预留升级空间。经济性原则,平衡防控效果与成本,优先选技术成熟、成本可控方案。协同性原则,技术手段与管理措施协同,依托抗干扰技术,完善管理机制,形成防控合力,提升综合预防效果。

2.2 综合预防技术框架

地面卫星接收天线干扰综合预防技术框架以“预防为先、精准识别、快速抑制、应急保障”为核心,构建四层技术体系。前端防护层在接收系统前端,用抗干扰天线设计、电磁屏蔽、合理布局等技术,优化天线特性,增强有用信号接收,削弱干扰信号耦合,阻断干扰传导与辐射。中端识别层实时监测分析接收信号,通过频谱分析等技术,精准区分有用与干扰信号,明确干扰信息,为抑制提供依据。后端抑制层针对干扰类型,用信号处理与增强技术,抑制干扰、增强有用信号。全局管控层通过频谱监测网络等,实现干扰全局监测、统筹调度与长效管控,确保各层级协同高效,形成综合预防体系。

3 关键技术与方法研究

关键技术与方法是支撑地面卫星接收天线干扰综合预防策略落地的核心,针对综合预防技术框架的各层级需求,需重点开展抗干扰天线设计、信号处理与增强、频谱监测与管理及政策法规协同机制四大类关键技术研究。

3.1 抗干扰天线设计技术

抗干扰天线设计技术是地面卫星接收系统前端防护核心技术,通过优化天线结构等,提升有用信号接收增益,削弱干扰信号强度,实现前端阻隔。重点方向有自适应阵列天线、相控阵天线、极化分集天线技术及高方向性抛物面天线优化设计。自适应阵列天线由多个单元组成阵列,用自适应算法实时调整加权系数,形成最大增益方向图,在干扰方向形成零陷抑制干扰;相控阵天线控制辐射单元相位,灵活调整波束方向,跟踪有用信号、避开干扰源;极化分集天线利用信号极化差异,通过双或多极化设计,增强特定极化有用信号接收、抑制不同极化干扰^[3]。优化抛物面天线反射面形状等参数,可提升主瓣增益与旁瓣抑制比,减少旁瓣干扰,减轻后续信号处理压力。

3.2 信号处理与增强技术

信号处理与增强技术是干扰抑制核心手段,对叠加

信号数字化处理,提取有用信号特征,抑制干扰,恢复原始信息,提升通信质量。关键研究有自适应滤波、干扰对消、盲源分离及数字解调优化技术。自适应滤波技术依干扰统计特性实时调整系数,强衰减干扰、低损耗有用信号;干扰对消技术构建干扰估计模型,生成抵消信号实现干扰抵消;盲源分离技术在未知参数下,利用信号统计独立性分离有用与干扰信号,适用于复杂未知干扰场景;针对数字卫星信号,优化解调算法,提升适应能力,结合前向纠错编码,增强抗干扰冗余度,提升接收系统对干扰耐受能力。

3.3 频谱监测与管理技术

频谱监测与管理技术是实现干扰精准识别、实时管控的关键支撑,通过对卫星通信频段及周边电磁环境的实时监测、数据分析与动态管理,为干扰预防与抑制提供精准的数据支撑。核心研究方向包括宽频段实时频谱监测技术、干扰信号特征提取与识别技术、频谱资源动态分配技术及监测网络构建技术等。宽频段实时频谱监测技术采用高采样率、高分辨率的频谱分析仪,实现对卫星通信全频段及周边潜在干扰频段的连续监测,捕捉干扰信号的时域、频域特征;干扰信号特征提取与识别技术通过机器学习、模式识别等算法,从监测数据中提取干扰信号的幅值、频率、相位、调制方式等特征参数,与已知干扰类型特征库对比,实现干扰类型的精准识别与来源定位。频谱资源动态分配技术根据频谱监测结果,实时调整卫星接收系统的工作频率,避开干扰频段,提升频谱资源的利用率与抗干扰灵活性。构建覆盖广泛的频谱监测网络,实现对不同区域电磁环境的协同监测,可形成全局电磁环境态势感知能力,为干扰的统筹管控与应急处置提供保障。

3.4 政策与法规协同机制

政策与法规协同机制是地面卫星接收天线干扰综合预防重要保障,通过完善制度规范电磁环境等管理,实现技术与措施协同,提升防控长效性与权威性。关键研究有频谱资源管理法规完善、干扰责任认定、跨部门协同管控及应急处置预案制定。频谱资源管理方面,明确频段划分标准,规范设备频率使用,加大非法行为处罚力度,减少人为干扰;建立科学干扰责任认定机制,依监测数据等明确来源与责任主体,保障合法权益;构建跨行业部门协同管控机制,加强沟通协作,实现数据

共享、流程协同,提升处置效率;制定完善应急处置预案,明确响应流程、措施与分工,确保快速响应、有效处置,降低干扰损失。

4 未来研究方向

卫星通信技术快速发展、电磁环境日益复杂,地面卫星接收天线干扰防控面临新挑战。未来研究聚焦技术创新、体系协同与场景适配,重点围绕四大方向展开。一是智能抗干扰技术,结合人工智能、大数据等前沿技术,研发能自主学习、自适应决策的智能抗干扰系统,自动识别未知干扰、实时建模并动态抑制,提升智能化水平。二是复杂干扰协同抑制,针对多源、异构、宽频带复杂干扰场景,整合抗干扰天线、自适应信号处理等技术,构建多维度协同防控体系,增强综合抑制能力^[4]。三是空天地一体化防控,整合地面监测网络、空中无人机及卫星监测系统,构建全方位监测与防控体系,精准管控全球卫星接收天线干扰。四是绿色节能防控技术,结合绿色通信需求,优化抗干扰设备能耗设计,研发低功耗、高效能元器件与系统,降低能源消耗。另外,加强国际技术交流与政策协同,应对跨境干扰,构建全球统一协同机制,保障全球卫星通信网络稳定运行。

结束语

地面卫星接收天线干扰信号综合预防策略研究意义重大。通过明确干扰信号分类与特性,构建科学预防策略框架,研究关键技术,能有效提升卫星通信抗干扰能力。未来,随着卫星通信发展,需持续探索智能抗干扰、复杂干扰协同抑制等方向,加强国际交流合作。相信通过不断研究与实践,能构建更完善的防控体系,保障卫星通信在全球稳定运行,推动相关领域持续发展。

参考文献

- [1]高翠东,杨争光,陈娟.反极化干扰信号对5米S-SAR卫星测控系统性能影响分析[J].航天器工程,2025,34(3):95-102.
- [2]哇萌.卫星地面接收站接收天线的安装、调整与维护[J].数字通信世界,2021(3):84-85,171.
- [3]张媛媛,贾树泽,郎宏山,等.基于卫星地面站天线状态预测的任务再规划[J].气象科技,2023,51(1):49-55.
- [4]邸晨旭,贾铁燕.一种卫星地面站接收链路资源的智能分配方法[J].计算机与网络,2025,51(4):394-400.