

DOI: 10.13382/j.jemi.B2508217

# 通信系统无源互调干扰抑制方法研究进展\*

肖慧卿<sup>1,2</sup> 田露<sup>1,2</sup> 徐湛<sup>1,2</sup> 胡天存<sup>3,4</sup> 赵思衡<sup>1,2</sup>

(1. 北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室 北京 102206; 2. 北京信息科技大学信息与通信工程学院 北京 102206; 3. 空间微波通信全国重点实验室 西安 710100; 4. 西安空间无线电技术研究所 西安 710100)

**摘要:**随着通信技术的飞速发展,高功率、宽频带、多载波技术成为通信系统发展的必然趋势。然而,无源器件产生的无源互调广泛存在于通信系统中,严重时互调产物落入接收频带将会导致整个系统的通信中断,这制约着通信系统向大带宽、大容量和高功率方向发展。因此,互调产物的抑制方法是实际工程应用中的研究焦点,是解决无源互调问题的关键所在。从无源互调现象的来源和互调干扰信号的特征出发,结合6G空地海一体化通信背景,全面分析了无源互调干扰在空间通信、空基、船舶、地面等不同通信场景中的信号特征。从被动和主动干扰抑制两大方面对现有互调干扰抑制方法进行总结,以传统频带规划、工艺优化、器件结构优化为基础,拓展到非接触式设计、模拟抑制、基于信号处理和机器学习的抑制等先进抑制方法,为后续解决互调干扰提供思路和方案。最后,总结了无源互调干扰抑制技术的发展趋势。

**关键词:** 无源互调干扰; 通信系统; 干扰抑制; 被动抑制; 主动抑制

**中图分类号:** TN927.2      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.10

## Research progress of passive intermodulation interference suppression methods for communication systems

Xiao Huiqing<sup>1,2</sup> Tian Lu<sup>1,2</sup> Xu Zhan<sup>1,2</sup> Hu Tiancun<sup>3,4</sup> Zhao Siheng<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology of the Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 102206, China; 2. School of Information and Communication Engineering, Beijing Information Science &amp; Technology University, Beijing 102206, China; 2. National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, Xi'an 710100, China; 3. Xi'an Institute of Space Radio Technology, Xi'an 710100, China)

**Abstract:** With the rapid development of communication technology, the inevitable trend in the development of communication systems is high power, wide bandwidth, and multi-carrier technology. However, passive intermodulation generated by passive devices exists widely in the communication system. Once the intermodulation products fall into the receiving band, the whole system will be interrupted. This phenomenon restricts the development of communication systems to the direction, which is equipped with large bandwidth, large capacity, and high power. Therefore, it is necessary to focus on the suppression method of intermodulation products in practical engineering applications. This paper comprehensively analyses the signal characteristics of passive intermodulation interference in different communication scenarios, such as space communication, air-based, ship, and ground, starting from the sources and characteristics of passive intermodulation and combining with the background of 6G air, sky, land and sea integrated communication. Existing intermodulation interference suppression methods are summarised from two major aspects of passive and active interference suppression, based on traditional band planning, process optimization, and device structure optimization, and expanded to advanced suppression methods such as non-contact design, analog suppression, signal processing and machine learning suppression, which provide ideas and solutions for the subsequent resolution of intermodulation interference. Finally, the development trend of passive intermodulation interference suppression technology is summarised.

**Keywords:** passive intermodulation interference; communication system; interference suppression; passive suppression; active suppression

收稿日期: 2025-03-07      Received Date: 2025-03-07

\* 基金项目: 国家自然科学基金青年基金(62201070)、国家重点研发计划(2022YFC3301202)项目资助

## 0 引言

无源互调 (passive inter modulation, PIM) 是一种特殊的物理现象,指的是在大功率激励条件下网状天线、双工器、波导、法兰连接器和负载等无源器件有时会表现出非线性特征,导致其输出信号中产生了除输入信号谐波外的新频率分量的情况。对于工作在理想状态下的常规无线通信系统(不包括同时同频全双工通信系统),由于收发频段的不同,大功率发射信号并不会落入上行接收信号频带。但在实际情况下,接收链路往往会受到发送链路“无源互调效应”的影响。通常互调产物在功率上远小于无源器件输出的正常信号,基本上不影响发射质量。但是对于接收机灵敏度高的通信系统,一旦有发射信号的无源互调分量落入上行接收频带内,就会造成极为不利的后果。轻则造成通信接收机 G/T 值恶化,影响接收性能;重则上行信号被彻底淹没,堵塞接收通道<sup>[1]</sup>。

随着国家信息疆域战略扩展部署,空天地海一体化通信成为必然趋势,快速发展的大规模低轨卫星星座进一步加剧了空间频率的拥挤程度,以往基于频率规划的干扰避免方式已难以实施,无源互调干扰问题愈发凸显。同时,随着对通信距离和通信速率需求的进一步提高,大功率发射机和高灵敏度接收机逐渐得到应用,由于无源部件的微弱非线性而产生的无源互调已无法忽视<sup>[2]</sup>。此外,考虑到通信系统轻量化、小型化、高集成度的发展趋势,采用收发共用天线结构以及共站共址现象的更加普及,无源互调甚至成为无线通信系统的主要干扰之一。很多国内外航天器、地面通信基站、机载通信系统和舰载通信系统等在运行阶段都出现过无源互调干扰系统运行的问题。

无源互调现象产生机理复杂多样,PIM 信号具备复杂记忆效应、强时变性和多源性等特征,这给抑制方法研究带来了一定难度。通信系统的稳定运行和通信技术的进一步发展受到 PIM 的制约,因此在实际工程应用中,PIM 问题亟待解决<sup>[3]</sup>。经过长期的实验与探索,国内外学术界和工业界已经总结出一些抗无源互调的措施,结

合近年来最新发展现状,本文将总结无源互调现象产生原因与场景,以被动抑制方法和主动抑制方法作为分类标准梳理主流和最新的无源互调抑制方法,并在此基础上对未来灵活多变的无源互调抑制方法的发展趋势进行展望,为无源互调基础研究和工程应用提供参考。

## 1 无源互调现象来源

### 1.1 PIM 产生的场景

很多国内外航天器在研制开发和在轨运行阶段都经受过无源互调效应的考验。根据有关资料,美国舰队通信卫星 FLTSATCOM 在正样星联合调试期间,由于 3 阶 PIM 落入接收频带,被迫改用收发分开的方案,导致整星发射推迟 36 个月;为避免 13 阶互调产物落入接收频带,美国军事通信卫星 MILSTAR-II 被迫采用收发分开的方案;国际通信卫星 INTELSAT-V 在轨期间突然出现 27 阶互调产物,致使系统噪声大幅度提高,导致卫星降低功率使用甚至报废。我国风云二号卫星在测试过程中,转发信号曾出现通带内偶发宽带噪声现象,期间噪声带起伏变化,经排查,发现宽带噪声源于收发共用部分连接状态不良而产生的无源互调<sup>[4]</sup>。部分公开资料中受无源互调问题影响的航天器如图 1 所示。



图 1 部分公开资料中受无源互调问题影响的航天器

Fig. 1 Spacecraft affected by passive intermodulation problems in some public information

除空间通信外,空基、船舶、地面的通信系统均受到了无源互调影响,如表 1 所示。使无源互调现象产生场景如图 2 所示。

表 1 国内外关于无源互调效应的研究情况

Table 1 Research on passive intermodulation effect at home and abroad

场景	部件	阶次	频带	研究者,时间
卫星通信	TNC 连接器	9	2 100 MHz 频段	Wang 等 <sup>[5]</sup> ,2017
卫星通信	波导法兰	11	300 MHz 频段	Gong 等 <sup>[6]</sup> ,2017
卫星通信	波导法兰	3	C、Ku 频段	Smacchia 等 <sup>[7]</sup> ,2017
卫星通信	天线	3	2 GHz 频段	Guo 等 <sup>[8]</sup> ,2020
卫星通信	定向耦合器	3	2 550 MHz 频段	Chen 等 <sup>[9]</sup> ,2017
地面基站	同轴连接器	3	2 600 MHz 频段	Zhang 等 <sup>[10]</sup> ,2018
地面基站	同轴连接器	3	900 MHz 频段	Bi 等 <sup>[11]</sup> ,2019
地面基站	同轴连接器	3	900 MHz 频段	Jin 等 <sup>[12]</sup> ,2020
地面基站	同轴连接器	3	1 900 MHz 频段	Yang 等 <sup>[13]</sup> ,2018
地面基站	天线	3	3 Hz~100 kHz 频段	Wilkerson 等 <sup>[14]</sup> ,2015
船舶通信	多路耦合器	3	UHF 频段	罗一峰 <sup>[15]</sup> ,2010
临近空间	滤波器	5	1 450 MHz 频段	郑淑梅 <sup>[16]</sup> ,2009

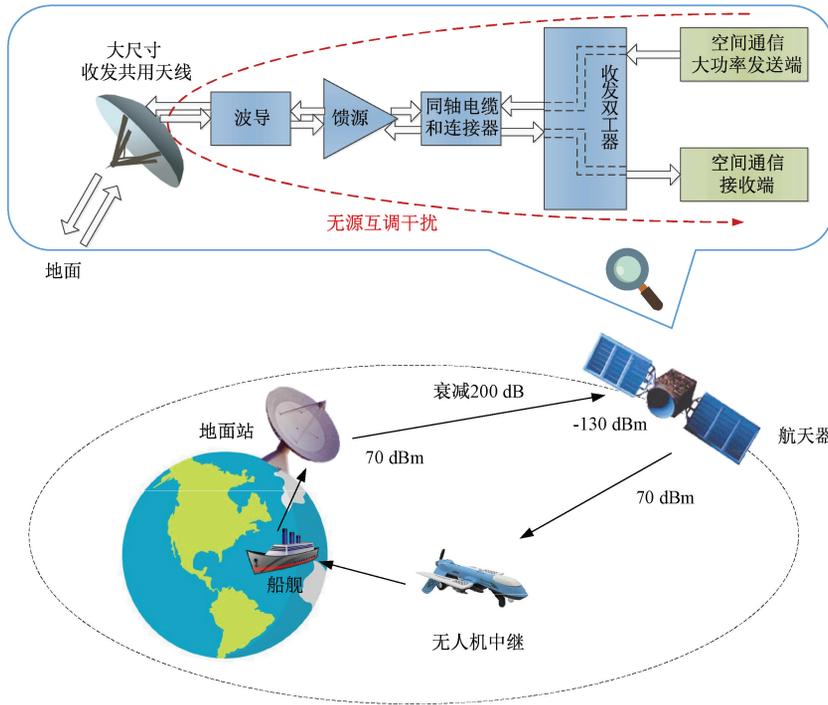


图2 使无源互调现象的产生场景

Fig. 2 Make the passive intermodulation phenomenon of the generation scene diagram

### 1.2 PIM 现象的产生机理

目前的研究认为,接触非线性和材料非线性这两种非线性,是通信系统中 PIM 产生原因的主要来源。

接触非线性主要是指由于金属表面的粗糙结构导致局部电流密度分布不均,从而产生接触电阻、电容等电特性,或者金属表面由于加工产生的微小裂缝、微小触须、气孔、表面积污染和金属结构中的砂眼而引起的微放电现象<sup>[17]</sup>,是 PIM 干扰产生的原因之一。并且,随着电磁工作环境发展的日益复杂,外部环境多物理场中一些因素也会对接触非线性产生一定的影响,如载荷、振动、温度和蠕变等。目前可将接触非线性产生原因归为半导体效应、接触电阻效应和非线性散射效应<sup>[18]</sup> 3 类。半导体效应是指金属材料表面出现一层薄膜,使得出现电接触特性较差的金属-绝缘物-金属(MIM)连接物,在承受载波功率时,引起非线性特性,从而导致 PIM 的出现。接触电阻效应是指,金属表面并非绝对光滑,在微观上金属间的接触表现为微凸体接触,导致电流流过时产生接触电阻<sup>[19]</sup>。当接触为松连接状态时,只有少量微凸体在表面形成有效接触,接触面积小,局部电流密度高;而在紧密连接时,微凸体接触数量变多,接触面积扩大,电流密度降低。非线性散射效应是指,因为传输介质是影响电磁波传播的因素之一,所以当接触非线性在传输介质上体现出各向异性时,将产生针对不同介质、不同方向的散

射,也将为通信系统带来更多且更为复杂的无源互调产物。

材料非线性主要是指系统硬件中使用了具有非线性导电特性的磁性材料,进而产生 PIM 干扰。严格来说,所有材料都有某种程度上的非线性特征。目前可将材料非线性产生原因归为电特性改变和磁特性改变两类。

#### 1) 电特性的改变产生的情况

(1) 电致伸缩,由于电场的改变而引起电介质发生弹性形变。(2) 电热耦合效应,金属导体在电流作用下产生焦耳热,导致材料温度升高,从而令金属的电导率发生相应的改变,电导率的改变又会影响电流的分布,电流再次产生焦耳热,焦耳热再次影响电导率,形成一种相互作用的耦合机制,在射频环境中,这种耦合作用表现得更为复杂<sup>[20]</sup>。学界尚未明确得出电流和电导率的反馈过程是正反馈还是负反馈。(3) 电滞效应,材料中电偶极子的自排列趋势。(4) 电介质击穿,在高强电场的作用下,电介质被击穿,从而引起非线性。

#### 2) 磁特性的改变产生的情况

(1) 铁磁效应,铁磁材料的磁导率随外加磁场呈现非线性变化,在外加磁场的作用下,铁磁材料有很高的磁导率;而去掉外加磁场后,其仍保持磁化状态。铁磁材料的非线性是产生 PIM 干扰的主要原因之一<sup>[21]</sup>。(2) 磁致伸缩,铁磁材料在磁化方向会产生线度的变化,从而产

生的非线性<sup>[22]</sup>,它比铁磁效应产生的无源互调弱。(3)磁阻,由于外加磁场的改变导致铁磁材料的电阻不再是固定值,电阻的非线性会引起很严重的无源互调干扰<sup>[23]</sup>。并且,在高功率微波(high power microwave, HPM)环境中,由于其大功率特性,部件和系统的非线性特性尤为显著,从而导致更为严重的无源互调问题。

### 1.3 PIM 场景与机理的关系

PIM 的产生不仅与设备和器件的非线性特性有关,还与信号传播的工作场景息息相关。不同的应用场景环

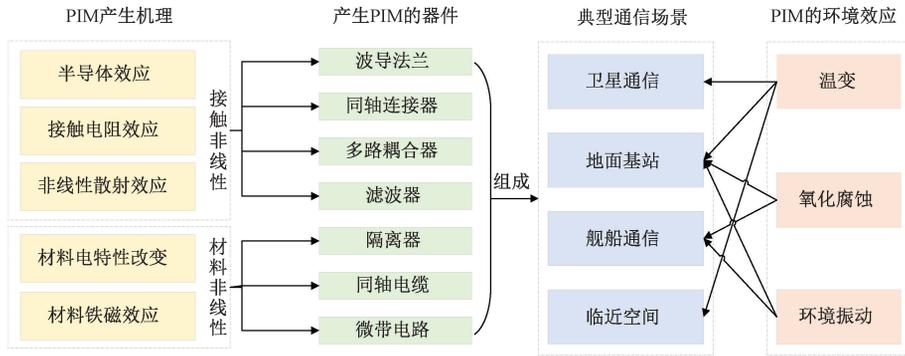


图 3 PIM 产生场景与机理的关系

Fig. 3 Relationship between PIM generation scenarios and mechanisms

## 2 无源互调干扰信号特征

对于工作在理想状态下的收发天线共用系统,大功率下行发射信号并不会落入上行接收信号频带。但在实际情况下,接收链路往往会受到发送链路“无源互调效应”的影响<sup>[10]</sup>。通常互调产物在功率上远小于无源器件输出的正常信号,基本上不影响发射质量。但是对于收发天线共用系统(图 2),由于到达航天器的地面站信号已经非常微弱,一旦有发射信号的无源互调分量落入上行接收频带内,就会造成极为不利的后果。轻则导致通信接收机 G/T 值下降,影响接收效果;重则完全覆盖上行信号,造成接收通道堵塞。空天地海一体化通信系统发射信号、接收信号和无源互调三者的典型频段和功率关系如图 4 所示。

无源互调产物是由空天地海一体化通信系统产生的非线性自干扰,这类干扰会落入接收频带,分析整个无线通信收发链路的无源互调干扰信号,它具备以下 3 个特点:1)复杂记忆效应,由于电热效应的存在,在同一温度和应力等环境下对同一待测件进行测量,发现其表现出复杂的记忆效应<sup>[18]</sup>;2)强时变性,指非线性的变化,而不是信号的变化,即使输入信号幅度不变的情况下,环境温度变化、连接器啮合状态等也是无源器件产生非线性变化的因素,从而导致无源互调产物幅度变化,变化时间可

境下的非线性诱因不同,如温变、氧化腐蚀、环境振动等,作用于无线通信场景而造成的互调干扰。随着无源器件低 PIM 设计需求的普及,磁性材料逐渐被避免应用于无源器件制造中,由材料非线性引起的 PIM 干扰现象逐渐减少;对于单一器件引起的 PIM 干扰,通常采用工艺优化、器件结构优化或非接触设计等方式减少其非线性效应;对于无线通信收发系统整个链路的系统级 PIM 干扰,可以采用频带规划及其他主动抑制方法。PIM 产生场景与机理的关系如图 3 所示。

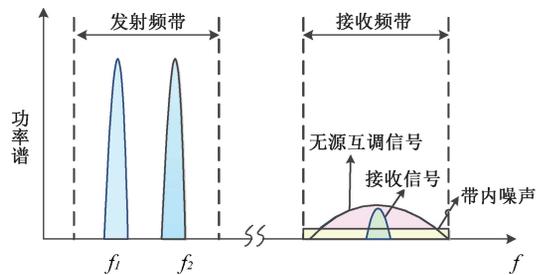


图 4 上、下行通信信号和无源互调的典型频率和功率关系

Fig. 4 Typical frequency and power relationships for upstream and downstream communication signals and passive intermodulation

达毫秒量级,变化幅度甚至可超过 100 dB<sup>[24]</sup>,如图 5 所示;3)多源性,整个通信系统存在多个非线性源,往往存在多个 PIM 发生点,多个 PIM 源互相耦合叠加形成最终的干扰结果<sup>[25]</sup>。鉴于互调干扰信号的复杂特征,在传统的抑制方法失效的情况下,可借助人工智能技术实现对干扰的抑制。

## 3 无源互调干扰被动抑制方法

关于收发共用天线系统射频通道无源互调干扰的抑制,有两条基本思路:被动方式和主动方式。被动方式主要依靠工艺优化、结构优化和非接触式设计等,从无源互

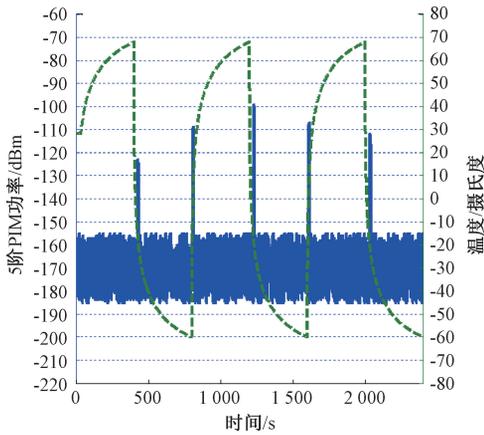


图5 PIM受环境变化影响的测试

Fig. 5 Test chart of PIM's exposure to environmental changes

调现象产生机理出发进行无源器件设计。

### 3.1 频带规划避免无源互调干扰

频带规划避免无源互调干扰的方法提出集中于20世纪90年代,主要从发送和接收频带设计的角度,尽可能宽地分开收发频带,防止低阶次无源互调产物落入上行频段<sup>[26]</sup>,其原理如图6所示。文献<sup>[27]</sup>提出了一种次优不等间距信道分配(suboptimum unequal spacing channel assignment, S-USCA),以减少任意大量信道的三阶互调产物,但并不能完全消除;文献<sup>[26]</sup>提出随机间隔信道分配(random spacing channel assignment, RSCA),利用蜂窝无线电系统中分配给每个单元的宽信道间隔来减少互调产物,对集群中小区的频率信道进行排列,使小区连续信道之间的信道间距不等。

在2G等窄带信道带宽系统中,采用频带分离和频带规划的方式能有效抑制三阶互调产物,但在宽信道带宽系统,如LTE、NR或涉及多个频段时并不能有效抑制互调产物<sup>[28]</sup>,并且会造成频谱的浪费。

### 3.2 工艺优化抑制方法

工艺优化可以采用以下几种方式对PIM进行抑制:

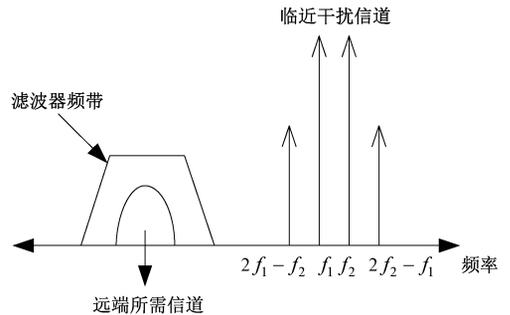


图6 频带规划避免互调干扰

Fig. 6 Frequency band planning to avoid intermodulation interference

对于具有强非线性特性的铁磁材料和腐蚀材料应尽量避免选用<sup>[29]</sup>;在金属表面或金属板内采用无氧化层的一体化硬件设计<sup>[30-31]</sup>;减少同轴滤波器腔体和谐振杆的连接<sup>[32]</sup>;对“金属-非金属-金属”接触面进行修整,从而增强接触面导电性等<sup>[33]</sup>。

Christianson等<sup>[34]</sup>于2013年提出了通过在同轴接头上镀金以实现无源互调的可控管理。2023年,张可越等<sup>[35]</sup>提出将可重构液态合金EGaln放置在接触点即可改变接触面的非线性,能明显降低PIM水平,提高天线性能,与贵金属涂层相比,节约大量成本。Kozlov等<sup>[36]</sup>于2018年提出一种基于高介电常数的材料覆盖微带线边缘的方法降低印刷电路板上的平面微波电路中产生的无源互调干扰。张洪太研究团队<sup>[37]</sup>利用非导电介质螺钉消除金属电接触降低了部件的PIM干扰。2020年王琪等<sup>[38]</sup>在此基础上设计出适用于简单的微波部件的新介质调节螺钉,替换金属调节螺钉对无源互调进行抑制,如图7所示,采用介质调节螺钉滤波器的无源互调值降低了10 dB左右。同年,王琪等<sup>[38]</sup>改进了传统滤波器的输入输出馈电结构,采用金属-介质-金属的接触方式取代传统的焊接方式。与传统滤波器相比,无源互调降低了20 dB,对低无源微波部件的设计具有指导意义。

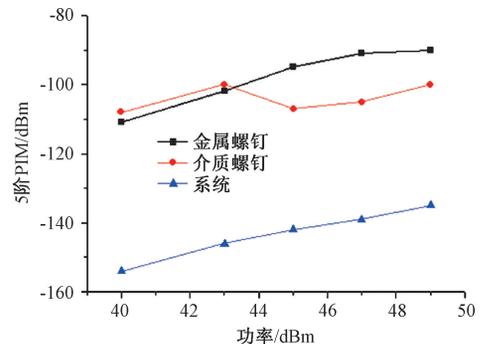


图7 金属和介质螺钉滤波器PIM曲线

Fig. 7 Metal and dielectric screw filter PIM curves

### 3.3 器件结构优化抑制方法

器件结构优化主要是通过结构调整达到降低 PIM 效应的目的。2009 年 Dallaire 等<sup>[39]</sup>在 Alphasat-XL 卫星项目中设计制造了一款通过减少接头数量降低 PIM 效应的大型多波束收发共用馈源阵列天线,目的是通过减少部件的数量和各个单元之间安装面的数量以实现 PIM 的抑制<sup>[40]</sup>;2018 年 Smacchia 等<sup>[7]</sup>通过一体化加工设计减少部件级联结构降低了系统自身产生的 PIM 干扰;2005 年 Vicente<sup>[41]</sup>根据实验结果提出了一种降低 PIM 的方法,即在波导法兰间插入介质垫片;2009 年 Christianson 等<sup>[34]</sup>提出通过在同轴接头上镀金以降低 PIM,并指出系统中非线性器件和线性器件之间的耦合作用,会对系统的非线性特性产生显著影响<sup>[42]</sup>,基于此,采用串联电路点源模型来对 PIM 进行预测和抵消。为解决法兰安装同轴连接器电气连接不良引起的 PIM 失真问题, Yang 等<sup>[43]</sup>提出了一种新型同轴连接器设计方案。在法兰安装式同轴连接器的外导体中嵌入一个柔性环,达到提高金属电气连接的可靠性的目的,其 3D 结构如图 8 所示。经实验验证,该设计将电气连接不完善引起的 PIM 水平降低了 9 dB,并提高了法兰安装同轴连接器在拧紧力矩超标或需要频繁断开和重新连接情况下的可靠性和稳定性。

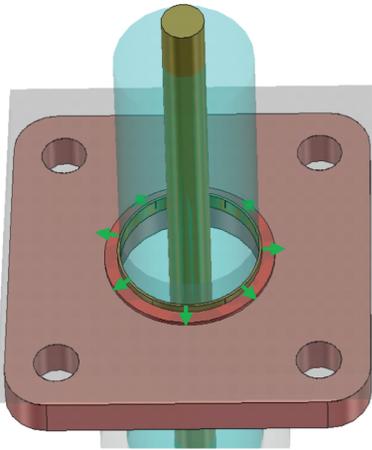


图 8 改进环形同轴连接器的 3D 结构

Fig. 8 3-D structure for the modified ring coaxial connector

### 3.4 非接触式设计

2020 年 Jin 等<sup>[12]</sup>对中心导体接触压力与 PIM 产物的关系进行了研究,增大接触压力可以使三阶互调产物功率减小,这对分析同轴连接器中无源互调失真有重要作用。

常用的法兰连接使用大量的连接螺钉,不便于测量,且螺钉的连接扭矩也可能会产生 PIM<sup>[44]</sup>。Chen 等<sup>[45]</sup>首次提出了基于间隙波导技术的新型 PIM 抑制方法,并提

出了一种用于低频应用的折叠低 PIM 非接触式波导法兰,从产生机理的角度,对法兰接触面由于不良电接触产生的接触非线性进行消除,最终达到高效抑制。此外,还开发了一种非接触式波导法兰适配器,实现了简单的低 PIM 法兰连接<sup>[46]</sup>。为适用于测量系统,又提出了一种基于间隙波导的紧凑型波导法兰适配器(CWFA),其 3D 几何模型如图 9 所示,形成的无接触结构几乎可以消除金属接触非线性,从而达到抑制 PIM 的效果<sup>[47]</sup>,该适配器减小了接头尺寸,增强了电磁泄漏抑制能力。测试结果显示使用该适配器,系统的残留 PIM 最大改善优于 30 dB,实现了稳定的低电平。

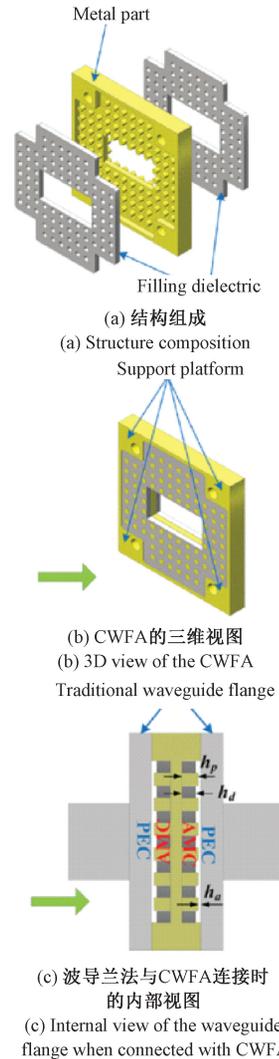


图 9 CWFA 的 3D 几何模型

Fig. 9 3D geometry of the proposed CWFA

## 4 无源互调干扰主动抑制方法

主动抑制 PIM 的基本思路是依赖于模拟或数字方

法,在上行链路接收端生成一条与 PIM 信号功率相等、极性相反的信号,从而对互调干扰信号实现抵消。

#### 4.1 模拟抑制方法

2011 年 Keehr 等<sup>[48]</sup>采用将重建的模拟信号与数字信号处理技术相结合的方案实现 PIM 抵消;2020 年 Gao 团队<sup>[49]</sup>针对 3 阶 PIM,利用模拟器件产生 PIM 源进行干扰补偿的形式实现干扰抑制,如图 10 所示,向系统中引入了两种不同频率的补偿信号以实现互调干扰的抵消。Chen 等<sup>[50]</sup>利用多个非线性源叠加的星形拓扑结构实现互调信号的重构与消除。

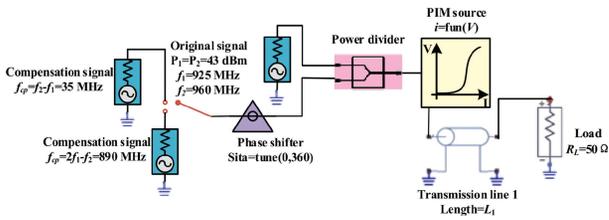


图 10 引入两种不同频率的补偿信号缓解系统无源互调失真  
Fig. 10 Two compensation signals with different frequencies were introduced to mitigate system passive intermodulation distortion

2020 年 Chen 等<sup>[51]</sup>提出了采用可重构非线性注入技术的紧凑型无源互调抵消方法。放置在低 PIM 微带线上的铁氧体磁盘会产生大小相位理想的 PIM 信号,将其引入 PIM 失真的网络,从而实现 PIM 抵消。实验证明,

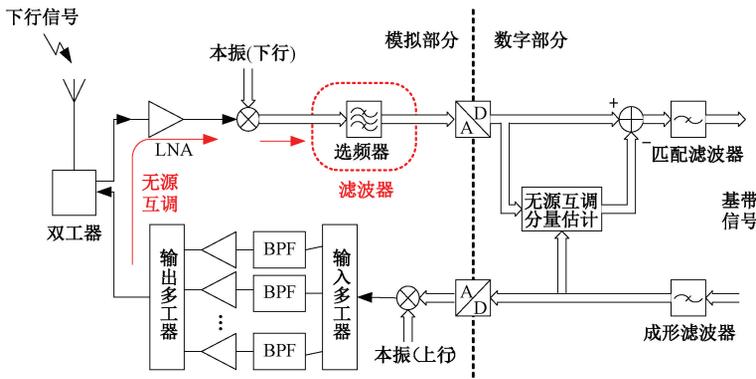


图 11 星上无源互调干扰数字抑制方法原理

Fig. 11 Schematic diagram of digital suppression method for on-planet passive intermodulation interference

相关专利<sup>[56-59]</sup>提出 PIM 的自适应抑制方法。2016 年,张序琦<sup>[60]</sup>详细介绍了基于数字信号处理的 PIM 抵消技术,并给出了具体方案和实验结果。同年 Rejeb 等<sup>[61]</sup>对双载波激励下的 3 阶 PIM 信号提出数字补偿方法,有效降低 PIM 信号影响。

2019 年,文献<sup>[62]</sup>提出了可以尝试使用机器学习的方法对无源互调干扰进行抑制的思想,然而由于其对计

在 LTE 频段 2 600 MHz 下,PIM 的抑制效果可达 20 dB。该方法只需要在微波网络中插入一段半波长长度最小的低 PIM 微带线,一旦其集成度得到提高,就可以进一步发展成为一种特殊的 PIM 抑制仪器。

但在实际应用中,模拟抑制方法仍有一定的局限性。一方面,随着时间的推移,元器件会发生老化且易受到环境的影响;另一方面,复杂的电路设计和高精度的要求使得硬件实现极具挑战性。因此,未来研究方向正聚焦于硬件优化和增强元器件环境适应性等方面,以满足通信系统的多样化需求。

#### 4.2 数字抑制方法

##### 1) 基于信号处理的抑制方法

2011 年,爱立信公司在申请的发明专利中提出一种利用数字信号处理技术对无源互调干扰进行抵消的解决方案,但该方案需要周期性中断通信,采用测试信号进行 PIM 预测<sup>[28]</sup>。Tian 等<sup>[52]</sup>提出了一种基于自适应滤波的无源互调干扰抑制方法,并先后提出了基于双维自适应滤波的盲估计无源互调干扰抑制方法<sup>[52]</sup>、基于稀疏分数阶傅里叶变换的无源互调干扰抑制算法<sup>[53]</sup>、无源互调信号时延和频率的联合估计和补偿算法<sup>[42]</sup>,和导频条件下基于递归网络的无源互调干扰抵消方法<sup>[54]</sup>等,星上无源互调干扰数字抑制方法原理如图 11 所示。安金坤等<sup>[55]</sup>于 2016 年提出了一种对接收信号进行小波包多层分解后,对其进行全盲 PIM 抑制的算法。

算资源的大量需求和难以快速收敛的问题尚未见实验报道。

##### 2) 基于机器学习的抑制方法

近年来,有许多学者将人工智能算法与无源互调相结合以实现互调干扰的抑制。

2019 年 Jin 等<sup>[63]</sup>采用神经网络算法对通信系统中的 PIM 源进行定位,解决了 PIM 源难以定位和检测的问题,

方便后续的互调干扰抑制。同年, Jang 等<sup>[64]</sup> 利用聚焦时延神经网络 (FTDNN) 和三阶 Volterra 滤波器 (CVF) 对非线性关系进行建模, 实现了对三阶 PIM 的估计。但还未对通过实时学习以自适应干扰消除的算法进行研究。2022 年, Treviso 等<sup>[65]</sup> 应用机器学习回归技术, 即最小二乘支持向量机 (LS-SVM), 从几组输入参数配置以及相应的三阶 PIM 功率对基于 LS-SVM 的回归模型进行训练, 从而实现低成本地对 PIM 进行大量预测。2023 年, 白春

江等<sup>[66]</sup> 依据实验测得的 PIM 功率, 采用小波神经网络预测模型对后续 PIM 进行预测, 该研究 PIM 的对消有一定的参考价值。同年, Banerjee 等<sup>[67]</sup> 构建了一个自监督强化学习 (SSRL) 系统, 从历史数据中调整 SSRL 来提前预测 PIM, 其他创新算法可通过此方案进行扩展。2024 年, 文献<sup>[68]</sup> 设计了 CNN-LSTM-FIR 神经网络模型, 其建模结构如图 12 所示, 该模型对系统产生的空气诱导 PIM 信号进行建模和补偿, 能达到 18 dB 以上的消去能力。

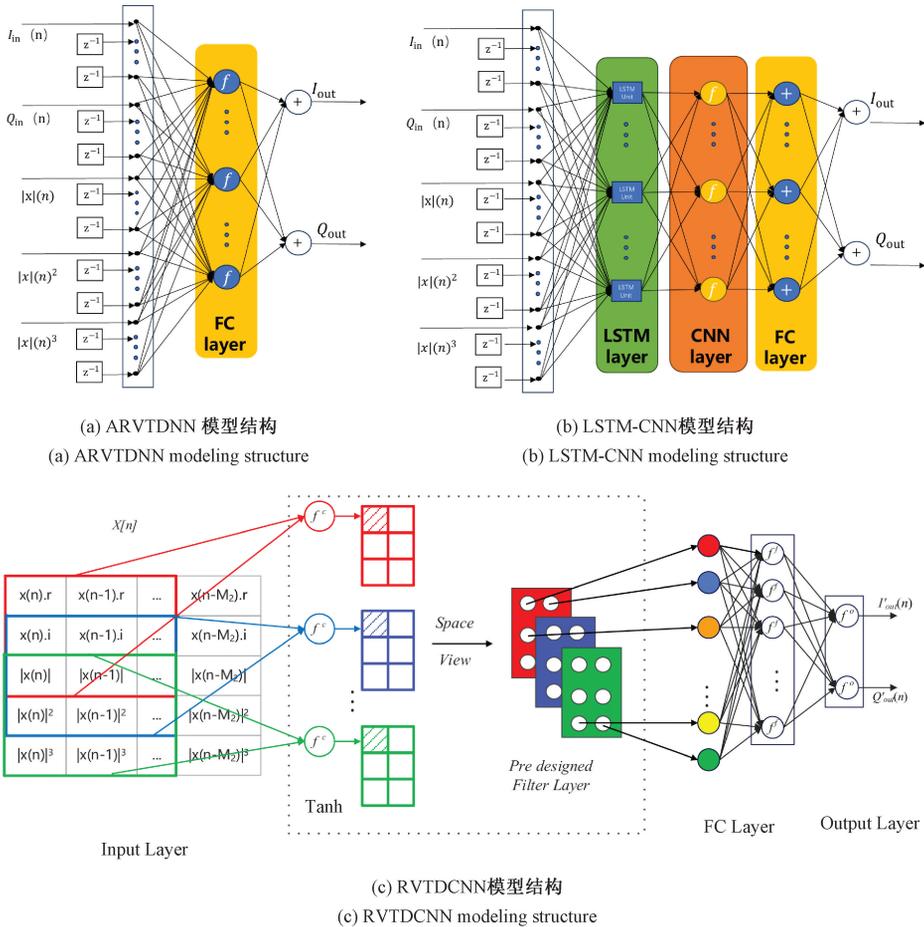


图 12 传统的非线性建模结构

Fig. 12 Traditional nonlinear modeling structure diagrams

## 5 结 论

无源互调广泛存在于通信系统中, 会对通信质量产生严重的影响, 因此对无源互调干扰进行有效的抑制是通信系统亟待解决的问题。无源互调抑制技术正朝着多维度、智能化的方向发展, 为通信系统在复杂环境下的稳定运行和性能优化提供技术支撑。随着通信技术的不断更新和应用场景的日渐复杂, 无源互调干扰抑制将与智能算法及新型材料结合, 推动干扰抑制朝着更高精度、更

强适应性发展, 为未来通信系统的性能提升开辟新路径。

1) 非接触式设计是被动抑制无源互调未来的主要趋势, 能有效消除不良金属电接触导致的接触非线性, 从而获得稳定的低 PIM 特性, 具有良好的应用前景。

2) PIM 信号的主动抑制方法中, 对 PIM 信号进行对消是主要手段, 多采用数字抑制的方法, 在后续的研究中, 可以将模拟与数字抑制相结合以实现更高强度的抑制效果。

3) 随着人工智能算法在卫星及地面通信系统的应用, 许多学者开始利用人工智能相关的新兴方法对 PIM

进行抑制,在建模精度和网络参数等方面展现出了更好的性能,具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [ 1 ] 田露. 星上无源互调干扰数字抑制技术研究[D]. 北京:北京理工大学,2017.  
TIAN L. Digital suppression technique of passive intermodulation interference for satellite systems [ D ]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2017.
- [ 2 ] 赵培. 无线通信 UHF 频段的无源互调干扰研究[D]. 北京:北京邮电大学,2015.  
ZHAO P. A study of passive intermodulation interference in the UHF band for wireless communications [ D ]. Beijing:Beijing University of Posts and Telecommunications, 2015.
- [ 3 ] 王小丽,陈翔,李军,等. 航天微波部件的无源互调抑制方法研究进展[J]. 中国空间科学技术,2021,41(2):1-9.  
WANG X L, CHEN X, LI J, et al. Recent research advances of passive intermodulation suppression methods for aerospace microwave components[J]. Chinese Space Science and Technology,2021,41(2):1-9.
- [ 4 ] 丁亚玲,徐云东,张玉山. 卫星无源互调抑制及测量方法研究[J]. 上海航天,2015,32(2):54-58.  
DING Y L, XU Y D, ZHANG Y SH. Passive intermodulation mitigation technique and measurement method for satellite [ J ]. Aerospace Shanghai, 2015, 32 ( 2 ): 54-58.
- [ 5 ] WANG R, CUI W Z, CHEN X, et al. Experimental analysis of passive intermodulation at TNC coaxial connectors [ C ]. 2017 11th European Conference on Antennas and Propagation ( EUCAP ). IEEE, 2017: 2383-2386.
- [ 6 ] GONG J F, LIU N, YUAN X N. Passive intermodulation of single carrier transceiver duplex communication system[C]. 2018 Eighth International Conference on Instrumentation & Measurement, Computer, Communication and Control ( IMCCC ). IEEE, 2018:275-278.
- [ 7 ] SMACCHIA D, SOTO P, BORIA V E, et al. Advanced compact setups for passive intermodulation measurements of satellite hardware [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2018, 66 ( 2 ): 700-710.
- [ 8 ] GUO H, MAKKI B, SVENSSON T. Rate adaptation in predictor antenna systems [ J ]. IEEE Wireless Communications Letters, 2020, 9(4):448-451.
- [ 9 ] CHEN X, HE Y N, CUI W Z. Broadband dual-port intermodulation generator for passive intermodulation measurements [ J ]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2017, 27(5):518-520.
- [ 10 ] ZHANG K, LI T J, JIANG J. Passive intermodulation of contact nonlinearity on microwave connectors [ J ]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(2):513-519.
- [ 11 ] BI L Y, GAO J C, LUO J Y, et al. A novel nonlinear model for passive intermodulation in coaxial connectors [ J ]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2021, 31(9):1027-1030.
- [ 12 ] JIN Q Y, GAO J C, BI L Y, et al. The impact of contact pressure on passive intermodulation in coaxial connectors [ J ]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020, 30(2):177-180.
- [ 13 ] YANG H P, WEN H, QI Y H, et al. An equivalent circuit model to analyze passive intermodulation of loose contact coaxial connectors [ J ]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2018, 60(5):1180-1189.
- [ 14 ] WILKERSON J R, KILGORE I M, GARD K G. Passive intermodulation distortion in antennas [ J ]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(2):474-482.
- [ 15 ] 罗一锋. 舰船通信系统的无源互调研究[J]. 现代电子技术, 2010, 33(23):39-44.  
LUO Y F. Approach to passive intermodulation in ship communication system [ J ]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(23):39-44.
- [ 16 ] 郑淑梅. 临近空间宽带射频前端技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.  
ZHENG SH M. Study RF front-end technology near space[D]. Xi'an: Xidian University, 2009.
- [ 17 ] 鲍艳,王露霞,刘超,等. 基于接触非线性的无源互调抑制技术研究进展[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2023, 21(3):291-300, 316.  
BAO Y, WANG L X, LIU CH, et al. Research progress of suppression technology of passive intermodulation based on contact nonlinearity [ J ]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2023, 21 ( 3 ): 291-300, 316.
- [ 18 ] 江洁. 微波器件无源互调的力热电效应研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2016.  
JIANG J. On mechanical-thermal-electrical effect of passive intermodulation in microwave devices [ D ]. Xi'an: Xidian University, 2016.
- [ 19 ] 仇国庆,顾逸霏. 基于区间证据推理的继电器接触系统故障检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(6):126-133.  
CHOU G Q, GU Y F. Fault detection of relay contact system based on interval evidence reasoning [ J ]. Journal

- of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(6):126-133.
- [20] 李砚平,柴继泽,杨晓敏,等. 高低温环境下测试卫星天线无源互调的系统[J]. 空间电子技术, 2022, 19(1):19-23.  
LI Y P, CHAI J Z, YANG X M, et al. Systems to test the passive intermodulation of satellite antenna in high and low temperature environment [J]. Space Electronic Technology, 2022, 19(1):19-23.
- [21] JIN Q Y, FENG Q Y. Passive intermodulation distortion in connectors with nonlinear interaction in electrical contacts and magnetic materials[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2021, 70(2):1119-1131.
- [22] 黄文美,郭万里,郭萍萍,等. 基于多目标遗传算法的高频磁致伸缩换能器优化设计[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(1):111-119.  
HUANG W M, GUO W L, GUO P P, et al. Optimization design of high frequency magnetostrictive transducer based on the multi-objective genetic algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(1):111-119.
- [23] 孙丽红. 微波波导连接器无源互调的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2017.  
SUN L H. Study on passive intermodulation of microwave waveguide connector[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [24] 李军,徐卓,马小飞,等. 微波器件联接扭矩与无源互调间的关系[J]. 西安电子科技大学学报, 2017, 44(2):185-190.  
LI J, XU ZH, MA X F, et al. Relation between torque and passive intermodulation in microwave devices [J]. Journal of Xidian University, 2017, 44(2):185-190.
- [25] 崔万照,李军,魏焱,等. 航天器微波部件无源互调机理分析与检测技术[M]. 北京:北京理工大学出版社, 2020.  
CUI W ZH, LI J, WEI H, et al. Mechanism Analysis and Detection Technology of Passive Intermodulation in Satellite Microwave Components [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2020.
- [26] JUNG H, TONGUZ O K. Random spacing channel assignment to reduce the nonlinear intermodulation distortion in cellular mobile communications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 1999, 48(5):1666-1675.
- [27] HWANG B, TONGUZ O K. A generalized suboptimum unequally spaced channel allocation technique. I. In IM/DD WDM systems [J]. IEEE Transactions on Communications, 1998, 46(8):1027-37.
- [28] WANG M, LI S H, BALDEMAIR R, et al. Dynamic cancellation of passive intermodulation; US Patent 9 026 064 B2 [P]. 2015-05.
- [29] WEN Y, SUN Y J, HUANG K. Research on passive intermodulation of spacecraft wireless communication system [C]. 2020 Information Communication Technologies Conference (ICTC). IEEE, 2020; 29-31.
- [30] JIANG J, LI T J, LIU Y C. Passive inter-modulation scattering analysis of reflector considering contact nonlinearity [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2013, 26(2):463-9.
- [31] KOZLOV D, SHITVOV A P, BULJA S, et al. Practical mitigation of passive intermodulation in microstrip circuits[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2020, 62(1):163-172.
- [32] 王琪,狄学峰,李秋强,等. S频段低无源互调同轴滤波器设计[J]. 空间电子技术, 2017, 14(6):49-53.  
WANG Q, DI X F, LI Q Q, et al. A design of low-passive intermodulation coaxial filter in S-band [J]. Space Electronic Technology, 2017, 14(6):49-53.
- [33] 王小丽,陈翔,崔万照. 空间大功率微波器件无源互调最新研究进展[J]. 空间电子技术, 2020, 17(5):1-10.  
WANG X L, CHEN X, CUI W ZH. Recent research advances of passive intermodulation for high-power microwave components [J]. Space Electronic Technology, 2020, 17(5):1-10.
- [34] CHRISTIANSON A, HENRIE J, CHAPPELL W J. Matching network design for passive intermodulation distortion reduction [C]. 2013 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI). IEEE, 2013; 2247-2248.
- [35] 张可越,陈雄,赵小龙,等. 基于液体金属的接触 PIM 抑制方法和实验验证[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6):1-6.  
ZHANG K Y, CHEN X, ZHAO X L, et al. Liquid metal based contact PIM suppression schemes and experimental study[J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(6):1-6.
- [36] KOZLOV D, BULJA S, LUNDY R, et al. Mitigation of passive intermodulation on planar microstrip circuits with distributed current-driven nonlinearities [C]. 2018 48th European Microwave Conference (EuMC). IEEE, 2018; 1029-1032.
- [37] 李韵,崔万照,张洪太,等. 星载大功率复杂微波部件微放电效应数值模拟[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(2):73-80.  
LI Y, CUI W ZH, ZHANG H T, et al. A novel simulation

- method of multipactor in complex components for satellite application[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017,37(2):73-80.
- [38] 王琪,崔万照. 应用于航天器的低无源互调滤波器分析[J]. 中国空间科学技术,2020,40(3):8-12.  
WANG Q, CUI W ZH. Analysis of low passive intermodulation filter used in spacecraft [J]. Chinese Space Science and Technology, 2020,40(3):8-12.
- [39] DALLAIRE J, SENECHAL G, RICHARD S. The Alphasat-XL antenna feed array[C]. 2009 3rd European Conference on Antennas and Propagation. IEEE, 2009: 585-588.
- [40] 李殷乔,雷继兆,佟金成,等. 通信卫星无源互调控制及验证研究[J]. 空间电子技术,2017,14(2):47-51.  
LI Y Q, LEI J ZH, TONG J CH, et al. Investigation on PIM mitigation and verification in communications satellites[J]. Chinese Space Science and Technology, 2017,14(2):47-51.
- [41] VICENTE C, HARTNAGEL H L. Passive-intermodulation analysis between rough rectangular waveguide flanges[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005,53(8):2515-2525.
- [42] HENRIE J, CHRISTIANSON A, CHAPPELL W J. Linear-nonlinear interaction's effect on the power dependence of nonlinear distortion products[J]. Applied Physics Letters, 2009,94(11):114101.
- [43] YANG H, HUANG W, WEN H, et al. Improved design of flange mount coaxial connector with low passive intermodulation distortion [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022,71:1-7.
- [44] 李霄泉,崔万照,胡天存,等. 无源互调抑制技术研究现状及发展趋势[J]. 空间电子技术,2017,14(4):1-6.  
LI X X, CUI W ZH, HU T C, et al. Review of passive intermodulation techniques and development trend [J]. Chinese Space Science and Technology, 2017,14(4):1-6.
- [45] CHEN X, SUN D Q, CUI W Z, et al. A folded contactless waveguide flange for low passive-intermodulation applications [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2018,28(10):864-866.
- [46] CHEN X, CUI W Z, HE Y N, et al. Low passive-intermodulation contactless waveguide adapter based on gap waveguide technology [C]. 2019 13th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2019:1-2.
- [47] CHEN X, CUI W Z, SUN D Q, et al. Novel compact waveguide flange adapter for passive intermodulation measurement systems [C]. 2020 14th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP). IEEE, 2020:1-4.
- [48] KEEHR E A, HAJIMIRI A. Successive regeneration and adaptive cancellation of higher order intermodulation products in rf receivers [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2011, 59(5):1379-1396.
- [49] JIN Q Y, GAO J C, HUANG H, et al. Mitigation methods for passive intermodulation distortion in circuit systems using signal compensation [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2020,30(2):205-208.
- [50] CHEN X, YU M, POMMERENKE D J. Electrical intermodulation tuner by multiple nonlinearities superposition using star topology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020,69(7):3951-3953.
- [51] CHEN X, ZHANG P, YU M, et al. Compact passive intermodulation mitigation method using planar nonlinearity injection [C]. 2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC). IEEE, 2020:849-851.
- [52] TIAN L, HAN H C, CAO W H. The Adaptive suppression of passive intermodulation of digital satellite transceivers [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2017,30(3):1154-1160.
- [53] OU J, TIAN L, LIU J C, et al. Passive intermodulation interference suppression through sparse discrete fractional Fourier transform [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2018,1060.
- [54] LIANG B Z, BU X Y, LI M C, et al. A novel RTRLNN model for passive intermodulation cancellation in satellite communications [C]. 2018 14th International Wireless Communications & Mobile Computing Conference (IWCMC). IEEE, 2018.
- [55] 安金坤,田林,丁凯. 一种扩频测控链路中 PIM 的全盲抑制算法[J]. 中国空间科学技术, 2016,36(4):47-50.  
AN J K, TIAN L, DING K. A full-blind PIM suppression algorithm for spread spectrum TT & C link [J]. Chinese Space Science and Technology, 2016,36(4):47-50.
- [56] 田露,胡天存,崔万照,等. 一种无源互调信号时延、频率和相位估计装置与方法:CN105306405A[P/OL]. 2015-9-10.  
TIAN L, HU T C, CUI W ZH, et al. A passive intermodulation signal time delay, frequency and phase estimation device and method A passive intermodulation signal time delay, frequency and phase estimation device and method:CN105306405A[P/OL]. 2015-9-10.

- [57] 田露,王帅,卜祥元,等. 一种基于自适应滤波的无源互调干扰抑制方法;CN103986482A[P/OL]. 2014-5-27.  
TIAN L, WANG SH, BU X Y, et al. A passive intermodulation interference suppression method based on adaptive filtering;CN103986482A[P/OL]. 2014-5-27.
- [58] 田露,杨凯,安建平,等. 一种基于导频信号的无源互调干扰抵消方法;CN105049067A[P/OL]. 2015-8-31.  
TIAN L, YANG K, AN J P, et al. A passive intermodulation interference cancellation method based on guide frequency signals;CN105049067A[P/OL]. 2015-8-31.
- [59] 王磊,莫宁·谢尔盖,库里雪夫·迪米特雷,等. 射频模块的无源互调 PIM 干扰抵消方法及相关装置;CN104283580A[P/OL]. 2014-9-30.  
WANG L, MO N · X E G, KU L X F · D M T L, et al. Passive intermodulation PIM interference cancellation method for RF modules and related devices; CN104283580A[P/OL]. 2014-9-30.
- [60] 张序琦. 基于数字信号处理的无源互调干扰抵消[D]. 北京:北京理工大学,2016.  
ZHANG X Q. The compensation of passive intermodulation based on digital signal processing [D]. Beijing:Beijing Institute of Technology,2016.
- [61] REJEB M B, MOREAU J M, DUNSMORE J, et al. RF receiver characterization and spurious-free dynamic range enhancement for PIM/weakly nonlinear device measurements [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2016, 64(11):4030-4038.
- [62] ERNET T, PAUL M, AND WEIHUA Y. Facilitation of passive intermodulation cancellation via machine learning;US 20190007078A1[P]. 2019-01-22.
- [63] JIN Q Y, GAO J C, FLOWERS G T, et al. Identification and location of PIM faults in radio-frequency circuits with multiple coaxial connectors using a neural network approach [J]. IET Microwaves & Propagation, 2019, 13(7):881-887.
- [64] JANG B, IM S, KIM C, et al. Modeling of passive intermodulation distortion using the neural networks and the cubic volterra filter[C]. 2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC). IEEE, 2019;1042-1046.
- [65] TREVISIO F, TRINCHERO R, CANAVERO F G. Machine learning-based uncertainty quantification of passive intermodulation in aluminum contact [C]. 2022 3rd URSI Atlantic and Asia Pacific Radio Science Meeting (AT-AP-RASC). IEEE, 2022;1-4.
- [66] 白春江,陈翔,何鋈,等. 基于小波神经网络的 PIM 功率时间序列预测[J]. 空间电子技术, 2023, 20(6): 22-29.  
BAI CH J, CHEN X, HE Y, et al. Prediction of passive intermodulation based on wavelet neural network [J]. Space Electronic Technology, 2023, 20(6):22-29.
- [67] BANERJEE S, UPPULURI P K, N R S, et al. Self-supervised reinforcement learning for proactive prediction of passive intermodulation [C]. 2023 15th International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS). IEEE, 2023;309-313.
- [68] LIN H W, MA H J, YANG J, et al. Air-induced passive intermodulation modeling method based on CNN-LSTM-FIR neural network [C]. 2024 5th Information Communication Technologies Conference (ICTC). IEEE, 2024;12-17.

## 作者简介



肖慧卿,北京信息科技大学硕士研究生,主要研究方向为干扰抑制。

E-mail: 2023020503@bistu.edu.cn

Xiao Huiqing is currently a M. Sc. candidate at Beijing Information Science & Technology University. Her main research interest includes interference suppression.



田露(通信作者),分别在 2011 年和 2017 年于北京理工大学获得学士学位和博士学位,现为北京信息科技大学现代测控技术教育部重点实验室副教授,主要研究方向为无线通信与干扰抑制。

E-mail: tianlu@bistu.edu.cn

Tian Lu (Corresponding author) received her B. Sc. and Ph. D. degrees from Beijing Institute of Technology in 2011 and 2017, respectively. She is currently an associate professor with the Key Laboratory of Modern Measurement and Control Technology, Ministry of Education, Beijing Information Science and Technology University. Her main research interests include wireless communication and interference suppression.