

文章编号: 2095-4980(2023)03-0257-06

移动通信微波部件无源互调干扰综述

魏 焕, 白 鹤, 胡天存, 王新波, 王 瑞, 崔万照

(中国空间技术研究院西安分院 空间微波技术重点实验室, 陕西 西安 710000)

摘 要: 在地面通信系统中, 基站的微波部件长期暴露在外, 受温度、湿度、污染等因素影响, 原本洁净的部件表面受到氧化、沾污等, 导致接触不良, 产生无源互调(PIM), 干扰通信系统, 导致地面移动通信中PIM的干扰不可避免。卫星通信系统中, 由于通信距离远、平台限制等, 必须采用收发共用模式, 随着接收机灵敏度提升, 对PIM指标要求更高; 因系统高可靠性要求, PIM成为系统成败的关键问题之一。本文介绍了地面移动通信和星载微波部件PIM干扰的特点和研究进展, 以期对PIM研究提供参考。

关键词: 微波部件; 无源互调; 地面移动通信; 卫星通信; 干扰特点; 研究进展

中图分类号: TN820

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022174

Review of Passive Intermodulation interference of mobile communication microwave components

WEI Huan, BAI He, HU Tiancun, WANG Xinbo, WANG Rui, CUI Wanzhao

(National Key Laboratory of Science and Technology on Space Microwave, China Academy of Space Technology(Xi'an), Xi'an Shaanxi 710000, China)

Abstract: In ground communication systems, microwave components of the base station are exposed in air for a period of time, usually influenced by temperatures, humidity, pollution and other factors. The original clean surface of the components is oxidized and contaminated, leading to poor contact and Passive Intermodulation(PIM), which interferes with the communication system. Therefore, PIM is inevitable in ground mobile communication system. In the satellite communication system, due to the long communication distance and platform limitation, the common transceiver mode should be adopted. As the receiver sensitivity increases, the requirements on PIM indexes are more strict. PIM is one of the key problems for realizing the high reliability of system. The characteristics and research progress of PIM interference in ground mobile communication and satellite microwave components are introduced, which can provide a reference for PIM research.

Keywords: microwave components; Passive Intermodulation; ground mobile communication; satellite communication; interference characteristic; research progress

在通信系统的大功率链路中, 输入2个或更多个发射载波时, 产生的谐波信号落入接收通带内造成相互干扰的现象称之为无源互调(PIM)^[1-4]。

无源部件都存在一定程度的非线性特性, 在大功率、多信道系统中, 无源部件的非线性会产生高次谐波, 谐波与工作频率混合会产生一组新的频率, 空域叠加干扰正常频谱, 影响通信系统。以2个频率分别为 f_1 和 f_2 发射载波为例, 由于微波无源部件的非线性, 导致载波信号相互调制, 产生载波频率组合产物 f_{PIM} , f_{PIM} 落入接收通带内造成的干扰现象即为PIM, 如图1所示。PIM存在于任何收发共用的系统中, 地面与空间设备中均存在^[5-9]。

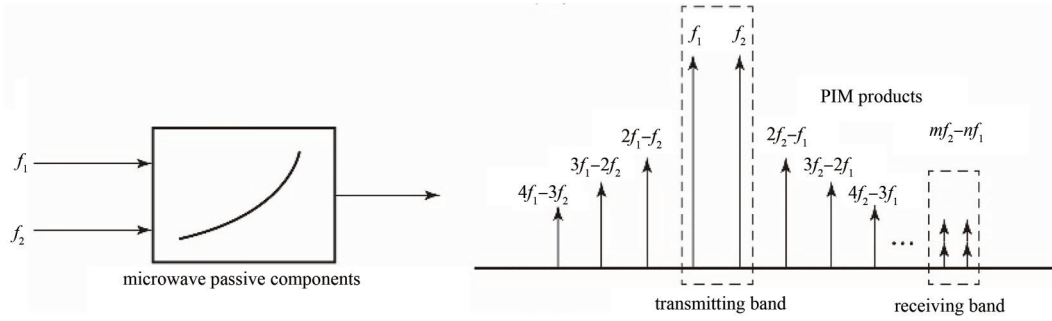


Fig.1 Distribution map of the PIM interference spectrum

图1 PIM干扰频谱分布

1 地面移动通信中微波部件PIM干扰

天线质量的好坏直接影响移动通信网络的质量和终端用户的感知，PIM是衡量移动通信系统性能的重要参数。PIM典型特点为：发射大功率、接收小功率。通常情况下，对于地面移动通信，要求发射功率为 20 W/43 dBm，接收信号为 0.01 pW/-110 dBm，即发射与接收信号相差 15 个数量级。随着移动通信的接收机灵敏度提高，PIM对通信系统会造成严重影响，PIM干扰影响的示意图如图 2 所示，尽管二者相比差距大，但量级小的苍蝇产生的干扰却会对飞机起飞带来巨大的干扰。

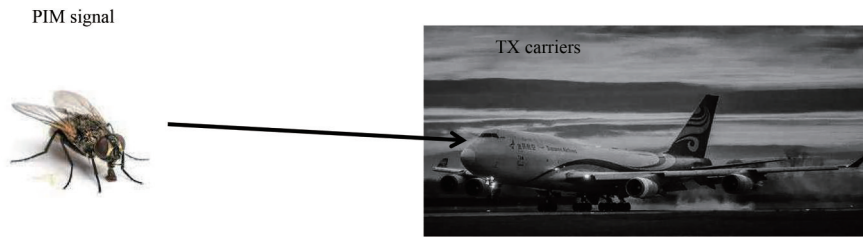


Fig.2 Sketch map of PIM disturbing influence(analogy)

图 2 PIM干扰影响的示意图(类比)

1.1 地面通信系统中PIM干扰的特点

PIM干扰可能在一个通信系统内部同时出现，表现为单纯的系统内频率混合产生的干扰。但在多个系统共用通信硬件资源条件下，若单个系统内部频率间产生干扰，则系统间的杂散频谱会对其他系统工作产生影响。典型的PIM干扰分布如图 3 所示。移动通信系统中，无源微波部件非线性带来的干扰会对系统性能产生较大影响，在多系统合路或相邻站点建设中影响更严重。

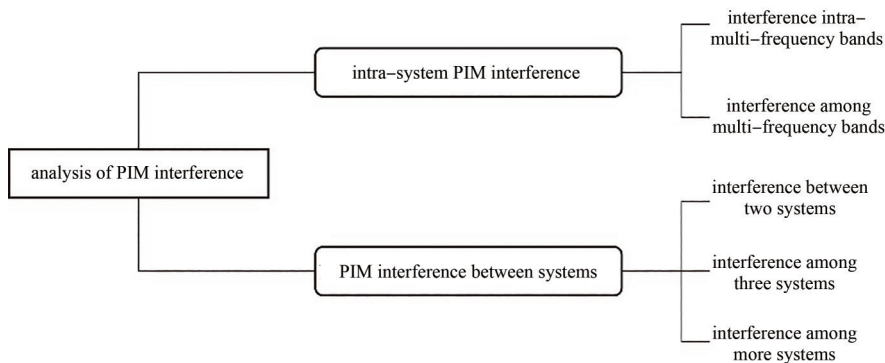


Fig.3 Interference distribution of typical PIM

图 3 典型PIM干扰分布

PIM干扰落入通信接收频段会降低整个通信系统的信噪比，随着接收机灵敏度的提高及发射机功率的增大，PIM干扰将直接影响通信质量、系统稳定性和信道容量。随着 5G 与 4G, 3G, 2G 等通信体制工作频率的交叠，基站数量如雨后春笋式增加。为避免重复建设导致资源浪费问题，移动通信建设单位在铁塔公司协调下建设基站，多系统合路场景越来越多。对于PIM，在收发共用的系统中，发射信号和接收信号同时经过收发双工器、大功

率电缆、天线馈源和收发共用天线等。典型的地面移动通信系统中易发生无源互调的微波部件如图4所示^[10-14]。

引起PIM非线性主要有2种类型：接触非线性(松动的连接、污染氧化的金属连接接头)、材料非线性(大块材,如铁磁成分、碳纤维等材料,表现出电流-电压非线性特性)。地面移动通信系统中PIM来源分布广,基站在长期使用过程中,由于环境污染,腐蚀、氧化等很容易使无源微波部件产生互调干扰。发射信号不同载波间的PIM产物落入接收频带,将和接收信号同时进入接收机,干扰通信系统,传统的滤波与隔离方法无法解决,因此PIM成为整个通信系统链路影响通信质量的关键问题。

1.2 地面通信系统中PIM干扰研究进展

现代移动通信网络中,一般通过一副发射天线发射几个频道(每个频道的功率为几瓦到数十瓦之间),发射天线同时作为接收天线使用(收发共用状态),或至少位于某个接收天线附近,因此必须确保接收通道不受发射通道的影响。表面看,似乎不可能出现问题,因为各自的通道严格地相互隔离。但由于天线系统中部组件存在非线性电阻,在一定时期内几个载波通道的电流同时流过非线性电阻,可能很快以混合频率形式形成干扰,干扰信号直接或间接到达接收通道,或通过发射天线到达接收天线。随着城市快速发展,地面移动通信网络负荷的增大,多系统合路已普遍存在,典型城市基站如图5所示,不同频段的发射与接收天线布局紧密,促进了多频段PIM干扰的形成。

随着技术发展与服务质量提升,移动通信运营商也不断提高通信基站建设的要求,PIM作为无源微波部件性能的关键指标被重视。2014年,中国移动通信公司开展了质量提升行动,抽测了东部、中部和西部地区的2 057件天线及无源部件,其中智能天线合格率为91%;双频电调的双极化天线合格率最低,只有约30%。主要原因是互调抑制指标的合格率较低^[15]。随着地面移动通信基站和终端的大量普及使用,高指标无源互调器件和电路的低成本批量制造也面临严峻挑战。

近年来,随着移动通信系统和无线互连技术的高速发展,更大功率、更高灵敏度以及功能更复杂的集成射频前端使得无源互调效应愈来愈显著,无源互调引起的通信系统可靠性问题日益严重;同时,随着5G发展,频率提高,传输信号在传播过程中快速衰减,因此基站间的距离必须减小至百米量级。快速增长的基站数量增加了通信系统间干扰的可能性,随着通信频率的增高,以及语音和数据信号容量的增加,以前对接收信号产生影响较小的因素也越来越被重视,PIM干扰为其中之一。针对PIM问题,国内相关学者组织开展了多届“中国移动通信无源互调研讨会”,校企联合共同商讨PIM问题及解决途径;企业界也开始重视PIM指标,中国移动通信公司等对PIM指标提高了要求,建立了《中国移动通信企业标准》等一系列标准,对PIM指标做出了特别要求,2022年更新了典型大功率微波部件的PIM测量标准^[16]。欧盟国家的移动通信系统相关标准中也将PIM作为必须考核的指标。

2 星载微波部件PIM干扰

2.1 星载微波部件PIM干扰的特点

所有收发共用的通信系统中都存在PIM,即地面与空间设备中均存在。星载微波部件通信如图6所示,由图可知,卫星通信设备存在距离远、衰减大的问题。发射功率与接收机灵敏度比值要求高,在卫星通信系统中



Fig.4 Microwave components prone to PIM in typical ground mobile communication systems

图4 典型的地面移动通信系统中易发生无源互调的微波部件



Fig.5 Typical urban base station

图5 典型的城市基站

PIM 要求更高, PIM 是关系系统成败的关键问题之一。卫星通信系统中, 当星载微波部件 PIM 电平较低时, 可使接收通带内本底电平抬高, 接收机信噪比降低, 误码率升高; 当 PIM 电平进一步增高时, 会影响整个通信系统的正常工作, 被迫降低功率使用, 或分通道使用; 严重时 PIM 产物将淹没接收信号, 导致通道阻塞, 通信中断, 整个系统处于瘫痪状态^[17-19]。

典型的地面宽带码分多址(Wideband Code Division Multiple Access, WCDMA)通信系统, 其发射功率一般为 43 dBm, 接收机对 PIM 电平指标的要求为 -110 dBm, 发射功率与 PIM 电平相差 153 dB; 但在卫星通信系统中, 由于星地之间距离远, 衰减大, 要求星上发射功率增大, 接收灵敏度提高, 发射功率与 PIM 电平差比地面要求更高。超大发射功率与极高接收灵敏度共存条件下, 微波部件中存在的极弱的非线性也能够导致 PIM 干扰信号淹没接收信号, 典型的 PIM 指标需要抑制到相对载波功率 -200 dBc 以下才能保障系统的正常运作。一般地面系统出现 PIM 问题时, 可采用发射与接收天线分开的方法解决, 但星载微波部件受空间平台资源的限制, 很难采用地面的措施来避免这一问题, 一旦出现, 将产生严重影响。

卫星有效载荷中通常能够产生 PIM 的微波部件包括: 收发双工器、电缆接头、波导法兰以及各种天线馈源与反射面^[20-23]。

2.2 星载微波部件 PIM 研究进展

目前国际主流的移动通信卫星采用大型网状天线, 且采用收发共用技术, PIM 成为系统研制的关键问题之一。

美国通信卫星 MILSTAR-II 为避免 13 阶 PIM 产物落入接收频段, 超高频(Ultra High Frequency, UHF)频段采用了收发分开的方案; 欧洲海事卫星 MARECS 的 43 阶 PIM 产物、国际通信卫星 INTELSAT 的 27 阶 PIM 产物均对卫星接收信号形成干扰, 导致卫星载荷降低功率使用, 甚至报废; 澳大利亚 2003 年发射的 OPTUS C1 卫星, 由于事先没有对整个卫星进行 PIM 约束和风险评估, 导致 3 阶和 23 阶 PIM 均落入接收频带, 问题相当棘手^[24]。2005 年以后, 美国 Space Systems Loral, Orbital Sciences Corporation 以及欧洲 Astrium 公司通过定性评估与反复试验相结合, 在工程上解决了大功率载荷 PIM 的难题, 部分卫星采用了收发共用模式, 图 7 为美国直播卫星和移动通信卫星, 均采用收发共用技术。

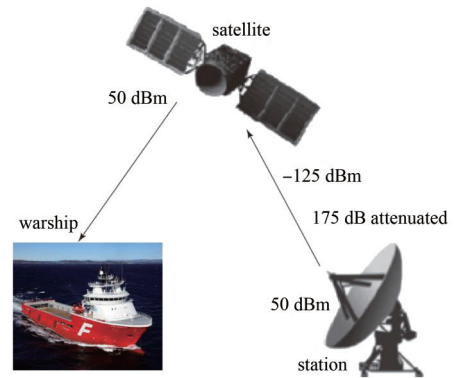


Fig.6 Sketch map of communication link between satellites and ground components
图 6 星地通信链路示意图

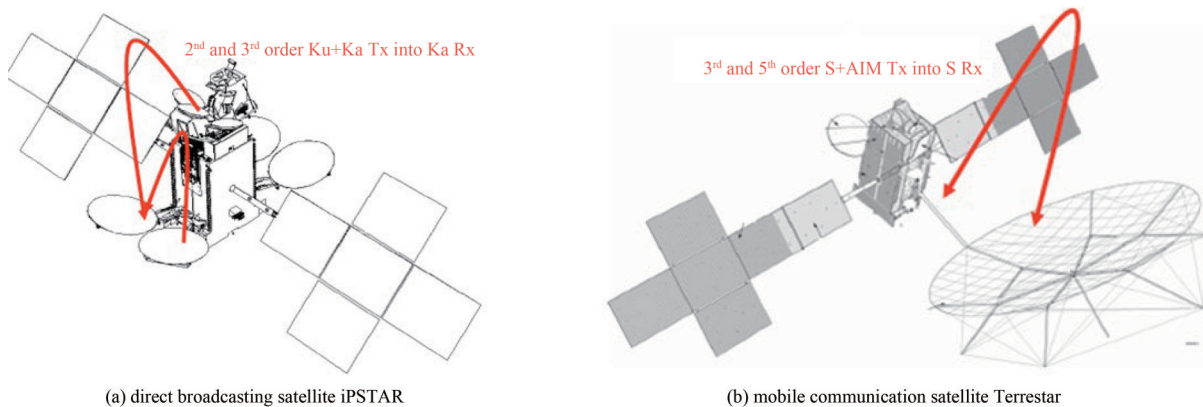


Fig.7 American satellites equipped with transceiver common antenna
图 7 美国采用收发共用天线的卫星

星载部件通常采用多通道合成发射, 多载波 PIM 研究成为重要内容。随着测量分析技术的提升, 国内外也开展了多载波 PIM 的分析与测量, 典型的四载波通道系统如图 8 所示, 4 路发射信号在经过放大器后, 输入多工器(Output Multiplex, OMUX)合成, 通过收发双工器, 完成大信号发射与小信号接收。

欧洲空间局大功率射频实验室研究了 Ku 频段四载波 PIM 干扰^[25], 其测试频率与 3 阶 PIM 分布如表 1 所示。测量结果显示: 在 $0^\circ \sim 360^\circ$ 范围内改变载波相位, 3 阶 PIM 的功率电平最大差距约 20 dB; 随着载波数量增加, 相对对 PIM 功率电平的影响会更加凸显。因此, 对于载波数较多的通信系统, 对多载波 PIM 的分析与评估需考虑

相位的影响。

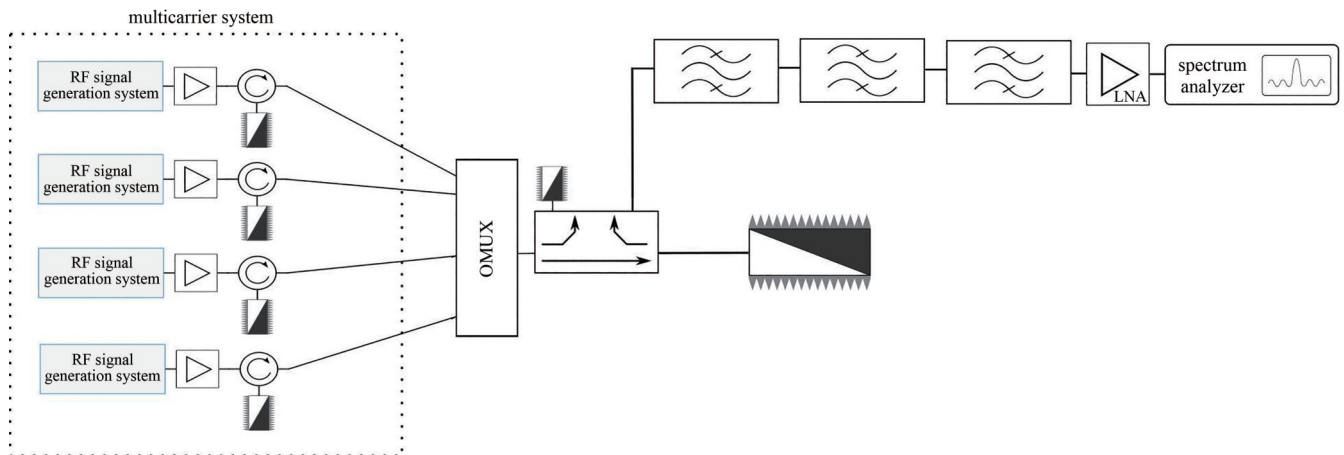


Fig.8 Schematic of the PIM measurement set-up based on the multicarrier facility

图 8 基于多载波设备的 PIM 测量的原理图

表 1 四载波与其 3 阶 PIM 频率分布

Table1 Distribution of four carriers and 3rd order PIM

carrier frequency/GHz				3rd order PIM frequency/GHz
f_1	f_2	f_3	f_4	
10.713 5	10.812 5	11.109 5	11.208 5	11.604 5

近年来，随着工程问题的牵引，我国在 PIM 研究方面也取得了一定的进展。与地面微波部件研究方法不同，星载微波部件由于平台空间与质量限制，主要开展了 PIM 产生机理、分析评价方法、抑制技术等方面研究工作。在 PIM 分析评价方法方面：针对大型网状天线，提出了一种基于实际编织形式的网状反射面天线的 PIM 预测方法，并分析了金属网张力、表面粗糙度、温度和其他因素对网状发射面天线的 PIM 影响规律。在 PIM 抑制技术方面：提出了非接触式人工电磁带隙材料及其无源互调抑制技术，设计的相关结构件已用于 PIM 检测系统中，降低了系统本底 PIM，实现了高灵敏度 PIM 检测。我国首颗移动通信卫星采用了国际主流的新型网状天线，在研制过程中也遇到 13 阶 PIM 落入接收通道的问题，经过多年技术攻关，最终攻克了网状天线的 PIM 问题。

3 结论

本文分别介绍了地面移动通信和卫星通信的微波部件两类无源互调。地面移动通信网络复杂且影响因素多，国内研究虽起步较晚，但主要研究单位已将 PIM 指标纳入微波部件相关标准中，并不断重视起来。卫星通信微波部件由于通信距离远，PIM 指标要求更高。在“天-地-物”一体化通信发展趋势和频谱资源日益紧张背景下，PIM 问题将越发凸显，需要不断深入研究与高度重视。

参考文献：

[1] 崔万照,李军,魏焕,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 Wanzhao, LI Jun, WEI Huan, et al. Mechanism analysis and detection technology of passive intermodulation in satellite microwave components[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press, 2020.)

[2] CUI Wanzhao,LI Jun,WEI Huan,et al. Passive intermodulation:concepts and technology[M]. Bocaraton:CRC Press & Beijing Institute of Technology Press, 2022.

[3] 叶鸣,贺永宁,孙勤奋,等. 大功率条件下的无源互调干扰问题综述[J]. 空间电子技术, 2013,10(1):75-83. (YE Ming,HE Yongning, SUN Qinfen, et al. Review of passive intermodulation interference problem under high power signals[J]. Space Electronic Technology, 2013,10(1):75-83.)

[4] 王海宁,梁建刚,王积勤,等. 高功率微波条件下的无源互调问题综述[J]. 微波学报, 2005,21(z1):1-6. (WANG Haining,LIANG Jiangan,WANG Jiqin,et al, Review of passive intermodulation in HPM condition[J]. Journal of Microwares, 2005,21(z1):1-6.)

[5] 张世全,葛德彪. 通信系统无源非线性引起的互调干扰[J]. 陕西师范大学学报(自然科学版), 2004,32(1):58-62. (ZHANG Shiquan,GE Debiao. Intermodulation interference due to passive nonlinearity in communication systems[J]. Journal of Shaanxi Normal University(Natural Science Edition), 2004,32(1):58-62.)

- [6] LUI P L. Passive intermodulation interference in communication systems[J]. *Electronics & Communication Engineering Journal*, 1990,2(3):109–118.
- [7] HOEBER C F, POLLARD D L, NICHOLAS R R. Passive intermodulation product generation in high power communications satellites[C]// 11th Conference on Communication Satellite Systems. California, USA: [s.n.], 1986:361–374.
- [8] 宋强强, 崔万照, 杨晶, 等. 中国空间大功率微波部件微放电抑制表面处理技术最新进展[J]. *中国空间科学技术*, 2019,39(3):43–45. (SONG Qiangqiang, CUI Wanzhao, YANG Jing, et al. Recent advances of multipactor suppression by surface treatment for high power microwave components in China [J]. *Chinese Space Science and Technology*, 2019,39(3):43–45.)
- [9] 张世全. 微波与射频频段无源互调干扰研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2004. (ZHANG Shiquan. Study of passive intermodulation interference at microwave and RF frequencies[D]. Xi'an, China: Xidian University, 2004.)
- [10] 叶鸣, 贺永宁, 王新波, 等. 基于粗糙表面模型的微波波导连接的无源互调研究[J]. *微波学报*, 2010,26(4):65–69. (YE Ming, HE Yongning, WANG Xinbo, et al. Study of passive intermodulation of microwave waveguide connection based on rough surface model[J]. *Journal of Microwaves*, 2010,26(4):65–69.)
- [11] 江洁, 李团结, 梅宇健, 等. 微波负载电热耦合的无源互调分析[J]. *西安电子科技大学学报*, 2016,43(3):179–184. (JIANG Jie, LI Tuanjie, MEI Yujian, et al. Passive intermodulation analysis of coupled electro-thermal microwave loads[J]. *Journal of Xidian University* 2016,43(3):179–184.)
- [12] 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 Qi, DI Xuefeng, LI Qiuqiang, et al. A design of low-passive intermodulation coaxial filter in S-band[J]. *Space Electronic Technology*, 2017,14(6):49–53.)
- [13] 叶鸣, 吴驰, 贺永宁, 等. S波段波导同轴转换器的无源互调特性实验研究[J]. *电波科学学报*, 2015,30(1):183–187. (YE Ming, WU Chi, HE Yongning, et al. Experimental research on passive intermodulation characteristics of S-band waveguide to coaxial adapter[J]. *Chinese Journal of Radio Science*, 2015,30(1):183–187.)
- [14] WILKERSON J R, KILGORE I M, GARD K G, et al. Passive intermodulation distortion in antennas[J]. *IEEE Transactions on Antennas & Propagation*, 2015,63(2):474–482.
- [15] 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 Pei. Study of passive intermodulation interference in UHF band of wireless communication systems[D]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications, 2015.)
- [16] 国家标准化管理委员会. GB/T 21021.1–2021 无源射频和微波元器件的互调电平测量[S]. 2021. (Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 21021.1–2021 Intermodulation level measurement for passive RF and microwave devices[S]. 2021.)
- [17] SINGH R, HUNSAKER E. PIM risk assessment and mitigation in communication satellites[C]// Proceedings of 22nd AIAA International Communications Satellite Systems Conference. Monterey, California: USA: [s.n.], 2004:1–16.
- [18] CHEN Xiang, SUN Dongquan, CUI Wanzhao, et al. A folded contactless waveguide flange for low passive intermodulation applications[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2018,28(10):864–866.
- [19] 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 Xiaoli, CHEN Xiang, LI Jun, 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.)
- [20] CHEN Xiong, HE Yongning, CUI Wanzhao. Broadband dual-port intermodulation generator for passive intermodulation measurements[J]. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2017,27(5):518–520.
- [21] 陈翔, 双龙龙, 孙冬全, 等. 悬置非接触式低无源互调波导法兰转换方法[J]. *西安交通大学学报*, 2020,54(5):117–123. (CHEN Xiang, SHUANG Longlong, SUN Dongquan, et al. Suspended contactless low passive intermodulation transition of waveguide flange[J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020,54(5):117–123.)
- [22] BOLLI Pietro, SELLERI Stefano, PELOSI Giuseppe. Passive intermodulation on large reflector antennas[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2002,44(5):13–20.
- [23] HIENONEN Sami, VAINIKAINEN Pertti, RAISANEN Anti V. Sensitivity measurements of a passive intermodulation near-field scanner[J]. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 2003,45(4):124–129.