

文章编号: 2095-4980(2023)07-0877-05

一种相位可调的多载波无源互调测试方法

李砚平, 郭鲁川, 彭璐, 秦臻

(空间电子信息技术研究院, 陕西 西安 710100)

摘要: 随着多波束卫星通信技术的发展, 收发共用技术被广泛应用, 微波无源器件大功率引发的无源互调(PIM)效应面临着挑战。本文根据多波束卫星通信工作模式, 在双载波测试PIM的基础上设计了一种相位可调的多输入多输出多载波PIM测试方法。考虑多载波叠加效应, 开展了多载波PIM理论分析。组建的7路测试系统通过了 $-60\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 天线馈源PIM试验, PIM电平稳定在 -155 dBm 以下。此测试系统已用于星载部件多载波无源互调性能检测。

关键词: 卫星通信; 无源互调; 多载波; 检测

中图分类号: TN820.1⁺4; V474

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2022234

A method for Passive Intermodulation measurements based on phase adjustable multicarrier

LI Yanping, GUO Luchuan, PENG Lu, QIN Zhen

(Academy of Space Electronic Information Technology, Xi'an Shaanxi 710100, China)

Abstract: With the development of multi-beam satellites communication and the wide application of transmit-receive technology, Passive Intermodulation(PIM) has become more seriously in the high power passive components. A PIM measurement method for phase adjustable Multiple-Input Multiple-Output(MIMO) multicarrier is presented based on that for dual carriers test according to the working mode of multi-beam satellites communication. Theories as well as experiments demonstrate the potentials and usefulness of the method. The experiments are conducted by the designed 7-channel test system under $-60\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$, and the PIM power level is below -155 dBm . The proposed test system has been applied to the multi-carrier components of satellites.

Keywords: satellites communication; Passive Intermodulation; multi-carrier; detection

随着高质量多媒体业务的需求增长和地面移动通信速率的提高, 卫星通信成为地面移动通信网络以及未来空地一体化信息网络中的重要组成部分^[1]。移动通信卫星中, 采用多波束和收发共用的通信模式^[2], 多载波无源互调(PIM)成为卫星研制中需要验证的重要指标。目前地面和星载大量使用的2路载波测试无源系统已无法满足要求, 急需相位可调的多输入多输出多载波测试系统。

PIM是指大功率微波无源部件的非线性导致的载波频率的组合产物落入接收通带内造成干扰的现象^[2]。PIM电平相对低时, 会造成接收信号低噪抬高, 接收机信噪比降低, 误码率升高, 灵敏度下降; PIM电平较高时, 整个通信系统的正常工作会受到影响, 只能降低功率使用或分通道使用; 严重时接收信号被互调产物淹没, 造成通道阻塞, 通信中断, 整个系统处于瘫痪状态。从1975年起, 美国在将近10年时间里发射了5个移动通信卫星, 其中4个都受到了PIM的严重影响^[3]。国内某型号移动通信卫星在轨运行至测控区时, 由于PIM问题导致终端自动增益控制异常跳变, 接收链路间断失锁。信号异常跳动导致上行指令和注入数据异常, 被迫打开备份链路终端, 对飞行器安全构成极大隐患^[3]。

随着通信功率容量增大, 通道数增加, 由于电热力多物理场耦合发生的非线性效应导致的PIM效应成为突出问题。目前除了在前期设计和工艺加工阶段控制之外, 最有效的方法是根据测试进行验证和评估^[4-7]。根据信号矢量合成原理, 测量得到的PIM幅度值的矢量信号是所有PIM发生位置点的矢量信号形式的叠加。双载波测

收稿日期: 2022-11-27; 修回日期: 2023-03-15

基金项目: 重点实验室基金2021-JCJQ-LB-006资助项目(614241112101)

试 PIM 的方法因为成本低廉, 运算简便, 工程实验测量相对比较容易, 前期关于 PIM 的研究测试验证大多采用双载波, 即用 2 个通道的中心频率点的谱线来近似多载波的频谱。早期的信号制式属于窄带, 随着带宽增加, 此种验证对于多波束的工作模式存在局限性。

本文针对多载波的通信工作模式, 在双载波测试 PIM 的基础上, 提出一种相位可调的多输入多输出多载波 PIM 测试系统。根据系统的波束形成方式, 组建了 7 路相位 360° 可调的多输入多输出 PIM 测试系统, 可有效测试多波束状态的 PIM 性能。同时针对 7 元天线馈源阵列开展了试验验证, 组建的测试系统通过了 7 路 -60~60 °C 试验, PIM 电平稳定在 -155 dBm。

1 多载波 PIM 理论分析

多载波调制技术广泛用于卫星通信中, 通信典型应用中, N 个时域多载波信号幅度为 V_i , 相位为 φ_i , 载波的频率相差为 Δf_k , 多载波信号可表示为^[8-9]:

$$v(t) = \sum_{i=1}^N V_i e^{j\{2\pi[f_0 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta f_k]t + \varphi_i\}} \quad (1)$$

若初始相位 $\varphi_i = 0$, 频率间隔相同 $\Delta f_k = \Delta f$, 载波等幅分布时, $V_i = V_0$ (V_0 为初始载波幅度), 则:

$$v(t) = V_0 \sum_{i=1}^N e^{j\{2\pi[f_0 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta f_k]t + \varphi_i\}} = V_0 \frac{\sin(\pi N \Delta f t)}{\sin(\pi \Delta f t)} e^{j2\pi f_0 t} \quad (2)$$

式中 f_0 为初始载波。

在均匀待测波导腔体中假设存在 N 个 PIM 点位, 距离其入射端口对应点分别为 x_1, x_2, \dots, x_N 。对于任意 PIM 位置点, 可以得到单个 PIM 点的矢量形式信号 $S_i(k_{\text{PIM}})$:

$$S_i(k_{\text{PIM}}) = A_i e^{j\Delta\varphi_i(k_{\text{PIM}})} \quad (3)$$

式中: A_i 为特定阶数的 PIM 信号幅度; $\Delta\varphi_i(k_{\text{PIM}})$ 为距离入射端口 x_i 所产生的特定阶数的 PIM 信号到器件端口的相移; PIM 信号波矢量 k_{PIM} 随相干激励信号源的频率变化而发生线性变化。

根据矢量合成原理, 测量得到的 PIM 幅度值 A_n 和相位差值 φ_n 合成的矢量信号等于所有 PIM 发生位置点的 PIM 矢量信号的叠加:

$$A(k_{\text{PIM}}) e^{j\varphi_i(k_{\text{PIM}})} = \sum_{i=1}^N A_i e^{j\Delta\varphi_i(k_{\text{PIM}})} \quad (4)$$

从以上分析可以看出, 无论载波的信号形式如何, 只有在器件端口处测量 PIM 分量合成的 PIM 信号, 才能真正反映出此种多载波信号产生的 PIM 的信号矢量大小和对通信卫星的影响^[10-11]。单口径多馈源多波束天线是实现移动卫星通信系统的灵活性、大容量和抗干扰性的重要方法。目前采用高增益低旁瓣多波束设计, 用来提升系统的通信容量和资源复用能力。多个馈源形成的常用的波束馈源簇方式有 4 路、6 路和 7 路馈源束, 其中 7 馈源波束形成方式性能更优。馈源簇存在一定程度的相互交叠时, 收发共用的制式会引起 PIM 问题。

2 多载波 PIM 测试方法及结果

针对多波束的卫星通信工作模式, 在双载波 PIM 测试的基础上, 设计了如图 1 所示的相位可调的多载波 PIM 测试系统, 可以调节多个频率载波相位输入, 输出多个不同频率的载波信号, 测试多个多载波波束的信号在空间和反射面交叠产生的 PIM 信号。

图 1 中, 信号源 1, 2, ..., N 为产生的多路载波, 通过相位调整系统, 能够调整每一路的信号相位。 N 路信号源信号经过 N 路功分合成网络后形成相位可以调节的多载波信号, 多载波信号经过带宽满足要求的功率放大器放大后, 通过发射滤波器滤除高阶谐波和杂波分量。经过处理后的多载波信号通过双工器的发射端送入被测件。 N 路功分合成网络实现测试多载波信号的幅度合成和相位调整, 测试系统的主要技术特点如下。

2.1 多路输入信号可以 360° 调节相位

相位调节系统采用 0°~360° 可调节移相器组成的网络, 可以调节信号源信号的相位, 其原理如图 2 所示。可以等间隔相位调整每一路相位, 也可以随机调整每一路相位, 调整相位的同时观测 PIM 输出。在信号源后端调

整相位(后端采用信号分路合成系统)，调节任意一路信号相位，都会对多路输出产生影响。对于多载波工作的系统可以验证输入信号相位对 PIM 的影响。

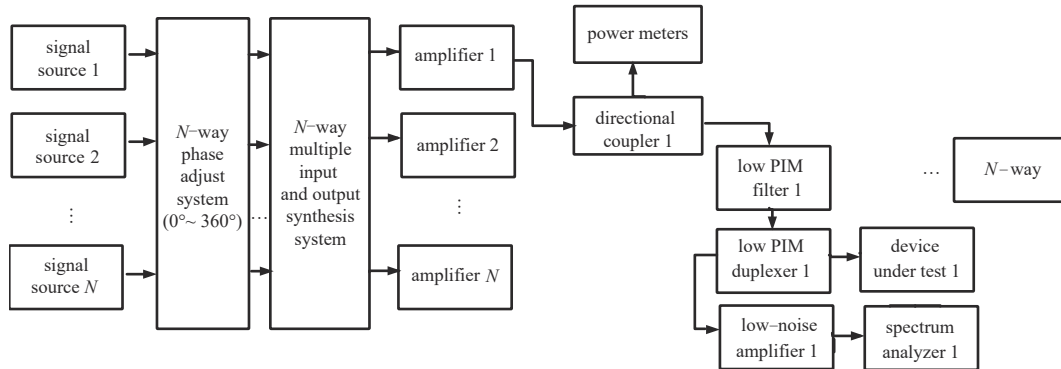


Fig.1 Block diagram of N -carrier PIM test
图 1 N 个载波测试无源互调原理框图

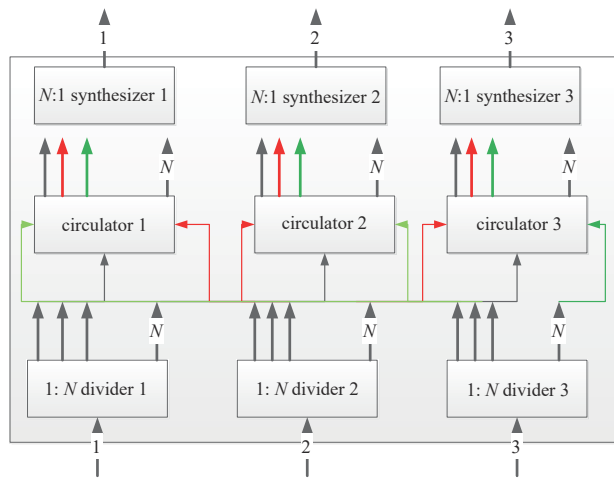


Fig.2 N -carrier input signal synthetic system(example for 3 input and 3 output)
图 2 N 路多输入信号合成系统(3入3出为例)

2.2 多载波信号合成系统可以实现任意路数和信号大小调节

为实现每一路大功率信号都是多载波信号，设计了多信号输入系统。先将信号源的信号等分成 N 路，然后通过隔离器再将 N 路信号送入合成器，合成 N 路不同频率的信号，合成的信号送入功率放大器放大，进入后续的 PIM 测试系统，实现可以调节相位的多输入信号，原理见图 2。可以通过控制信号源的路数，随意调整输入和输出信号的路数。每一路信号的大小可以通过信号源电平控制调整，信号调节范围大，调整自如，可以在 2 路和 3 路之间自由切换。

信号源可以灵活控制每路载波信号的幅度(功率放大器在线性区内)，功率分配自由，测试的工作模式灵活。采用相位合成系统，可以实现信号路数任意组合，信号合成后通过放大器放大，多路信号送入双工器输入端，送入测试件，产生阶数固定的 PIM 信号通过双工器的接收端接收测试。信号合成的路数为测试的产品端口数，通过控制信号源端的频率，不但可以实现试件工作范围内的信号组合产生的 PIM，同时可以灵活调整信号的功率大小。这对于多波束卫星工作模式是一种有效的验证，完成的模式组合测试如图 3 所示(以 7 个馈源 feed 为例)。

图 3 中，信号源 1 至信号源 7 发射 7 个载波信号 $f_1 \sim f_7$ ，通过 7 个连续波高功率放大器将信号放大。输出和反射功率大小用连接功率计的 2 个双定向耦合器进行监测，最后经过 2 个带通滤波器分别加载到各自的发射馈源上。接收部分由一个低 PIM 滤波器、低噪声放大器和高灵敏度的频谱仪组成，低噪声放大器将 PIM 产物放大后送入频谱仪，通过工控机采集测试 PIM 数值。

此测试系统通过信号源控制载波的数量和大小，可以测试带宽范围内任意数量的多载波分布，也可以测试双载波，应用灵活度较高。本文选用 7 路载波展开测试，在频率范围等间隔选取 7 个频率点，总功率为 17 W，

测试试验件为天线馈源，测试结果如图 4 所示。

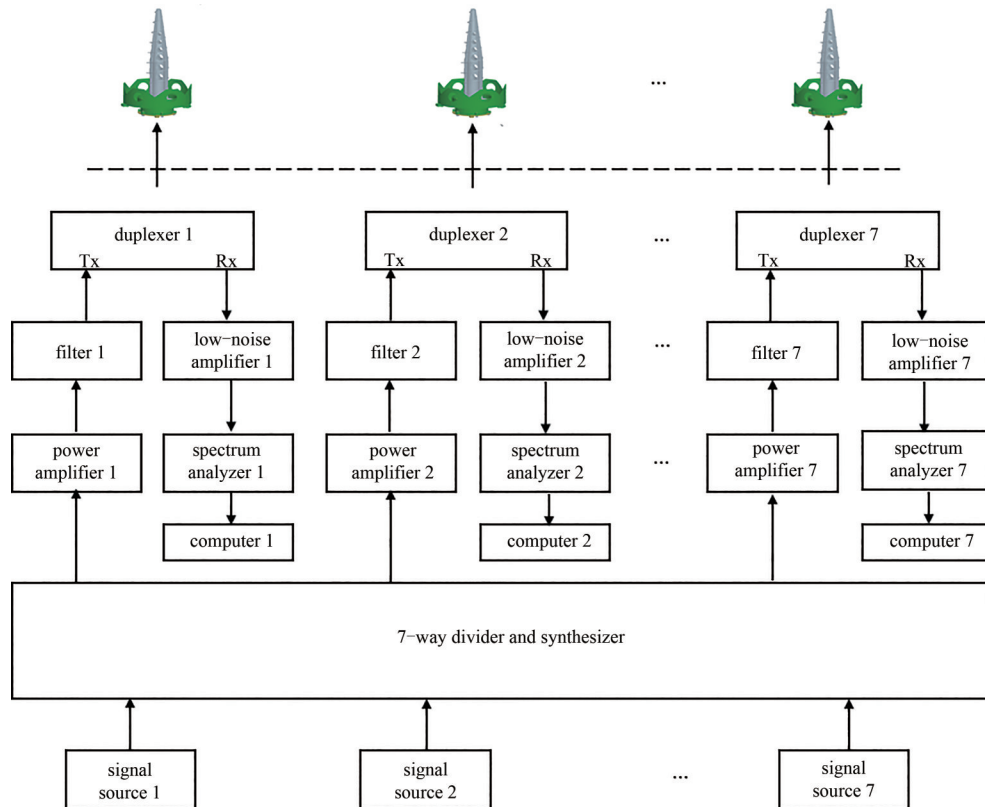


Fig.3 Diagram of phase adjustable 7-carrier MIMO PIM test system

图 3 7路相位可调多输入多输出无源互调测试系统示意图

图 4 中，数据采集的时间间隔为 1 s，横坐标表示采集点数，右侧纵坐标表示温度，本次试验温度范围 $-60\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，左侧的纵坐标表示 PIM 电平，范围 $-200\sim -120\text{ dBm}$ 。从图中可以看出，在 8 个半 $-60\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度循环时间范围内，测试的馈源 PIM 电平保持恒定的数据，没有随温度出现大幅度的变化，保持恒定的 -155 dBm 。

3 结论

目前双载波测试受带宽增加影响，存在局限性。本文设计了一种多载波 PIM 测试方法，运用了多输入和多输出的相位幅度调整系统，实现了幅度和相位的灵活调整，同时经过多馈源的功率配置要求，组建了 7 路相位可调的测试系统，局限性是调节频率遍历性时，存在费时费力问题，后期研究如果采用电子开关的自动切换系统，可以解决此问题。多载波测试 PIM 面临门槛高，功放升级，弱信号检测等成本和技术问题。

参考文献：

- [1] 何雯,王显煜,王平等. 星载可移动多馈源单口径多波束天线研究[J]. 空间电子技术, 2022,19(5):36-47. (HE Wen,WANG Xianyu,WANG Ping,et al. Research on movable multi-feed single aperture multi-beam antenna for space borne[J]. Space Electronic Technology, 2022,19(5):36-47.)
- [2] 李森,蔡洋,曹玉凡等. 波束扫描反射阵列天线偏焦特性[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2022,20(10):1058-1063. (LI Sen, CAI Yang,CAO Yufan,et al. Defocus characteristics of beam scanning reflectarray antenna[J]. Journal of Terahertz Science and

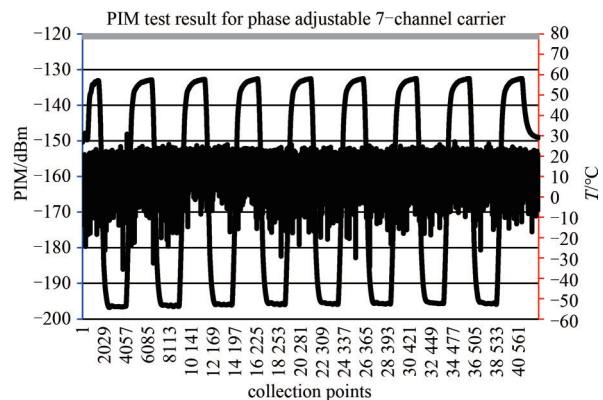


Fig.4 PIM test results for 7-carrier antenna feed under the cycling temperature

图 4 7 个载波测试天线馈源无源互调温度循环结果图

- Electronic Information Technology, 2022,20(10):1058–1063.)
- [3] 魏焕,王新波,白鹤,等. 大功率微波部件无源互调分析与实验验证[J]. 中国空间科学技术, 2021,41(1):100–105. (WEI Huan, WANG Xinbo, BAI He, et al. Analysis and experiment on multicarrier passive intermodulation in high power component[J]. Chinese Space Science and Technology, 2021,41(1):100–105.)
- [4] 张世全. 无源互调干扰导论[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014:150–159. (ZHANG Shiquan. Introduction to passive intermodulation interference[M]. Xi'an,China:Xidian University Press, 2014:150–159.)
- [5] 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 Yinqiao, LEI Jizhao, TONG Jincheng, et al. Investigation on PIM mitigation and verification in communications satellites[J]. Space Electronic Technology, 2017,14(2):47–51.)
- [6] 李砚平,王海林,郭鲁川,等. 一种微振动条件下金属网天线反射面的PIM测试方法[J]. 空间电子技术, 2018,15(3):45–48. (LI Yanping, WANG Hailin, GUO Luchuan, et al. Detection of passive intermodulation for metal mesh under micro-vibration[J]. Space Electronic Technology, 2018,15(3):45–48.)
- [7] 崔万兆,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, 2021. (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, 2021.)
- [8] ENG K Y, YUE O C. High-order intermodulation effects in digital satellite channels[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1981, AES-17(3):438–445.
- [9] AL-MUDHAFAR A, HARTNAGEL H L. Passive intermodulation effects on bit error rates in communication satellites[C]// The 7th International Workshop on Multipactor, Corona and Passive Intermodulation in Space RF Hardware. Valencia, Spain: [s.n.], 2011.
- [10] 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 Xiaoli, CHEN Xiang, CUI Wanzhao. Recent research advances of passive intermodulation for high-power microwave components[J]. Space Electronic Technology, 2020,17(5):1–10.)
- [11] 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.)

作者简介:

李砚平(1979–), 女, 硕士, 研究员, 主要研究方向为空间特殊效应微放电、无源互调测试技术. email: 1312711622@qq.com.

郭鲁川(1984–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为空间特殊效应微放电、无源互调测试技术.

彭璐(1981–), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为空间特殊效应微放电、无源互调测试技术.

秦臻(1986–), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为航天测试技术.

(上接第855页)

作者简介:

张蕾(1982–), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为空间天线馈电系统、天线无源互调技术和大功率技术. email: 120777926@qq.com.

丁伟(1980–), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为星载多波束天线技术.

吕庆立(1980–), 男, 本科, 研究员, 主要研究方向为星载天线设计技术.

施锦文(1981–), 男, 硕士, 研究员, 主要研究方向为阵列馈电反射面天线技术.

王海林(1984–), 男, 工程师, 主要研究方向为微放电与无源互调测试技术.

周强(1991–), 男, 工程师, 主要研究方向为微放电与无源互调测试技术.