

# 天线三阶互调干扰的分析与测量

陈立甲 林 澜 杨彩田 邱景辉 王 新

哈尔滨工业大学电信院， 哈尔滨 150010

**摘要：**在大功率多频通信系统中，由天线的非线性引起的三阶互调干扰对收发共用天线通信系统的性能造成严重影响。本文首先从数学上说明非线性系统引起的三阶互调的原因。其次介绍了三阶互调测试系统，并针对特定通信系统的天线进行了测试。测试结果说明，该测试系统可以通过在特定条件下对天线三阶互调的测试，比较不同天线产生三阶互调的大小，确定天线在高功率条件下的性能。

**关键词：**天线，三阶互调，测试系统

## Analysis and Measurement of Antenna 3<sup>rd</sup> Order Intermodulation

CHEN Lijia, LIN Shu, YANG Caitian, QIU Jinghui, WANG Xin

(School of Electronics and Information Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 100010)<sup>1</sup>

**Abstract:** The 3<sup>rd</sup> order intermodulation interference caused by antenna nonlinearity has a serious impact on the performance of the high power multi-frequency communication system, especially when the antenna is shared by the transmitter and the receiver at the same time. How the 3<sup>rd</sup> order intermodulation caused by system nonlinearity was first demonstrated in this paper, and then the designed measurement system was introduced. The experiment was carried out on the antennas of a special communication system. The result also shows that the amplitude of 3<sup>rd</sup> order intermodulation can be compared through measurement and the performance of antennas under high power condition can be determined.

**Keywords:** Antenna; 3<sup>rd</sup> order intermodulation; measurement systems

## 1 引言

在大功率多频通信系统中，由天线的非线性引起的无源互调对收发共用天线通信系统的性能造成严重影响。天线的无源互调干扰问题在卫星通信和移动通信中比较突出，因而受到关注与研究<sup>[1, 2]</sup>。引起天线产生无源互调干扰的原因很多，如：由构成天线材料中含有铁、镍等非线性材料引起<sup>[3]</sup>；由于金属与金属的连接处的非线性引起，如金属间的螺纹连接<sup>[4]</sup>等。在实际研究中发现，天线等无源器件在大功率下的互调干扰与很多参数有关，而且呈现出时变性<sup>[5]</sup>，故很难用理论公式进行精确描述。这给问题的理论研究带来很大困难。因此，在模拟环境或应用环境下的对实际系统进行互调干扰测试成为互调干扰水平是否足够低，是否能保证系统正常工作的

主要依据。综上所述，对天线无源互调干扰的理论分析及实际测量均具有重要意义。

本文首先利用数学模型说明天线的非线性是产生互调的根本原因，但该模型并不能够很好的描述天线的实际情况；其次搭建了天线无源互调干扰的测试系统，该系统除天线外，还可适用于其他非线性系统的互调干扰测试；再次，给出了天线的测试结果及分析；最后给出了本文的结论。

## 2 理论分析

目前，天线互调干扰产生的原因被认为是在大功率下，构成天线的某些部分的非线性引起的。一般情况下，可使用麦克劳林公式来描述一个非线性系统：

$$Y = k_1 X + k_2 X^2 + k_3 X^3 + \Lambda \quad (1)$$

其中:  $X, Y$  分别为输入与输出信号幅度;  $k_1, k_2, k_3$  分别为与系统非线性相关的系数。

当系统被两个频率为  $f_1$  和  $f_2$  的单频信号激励时, 系统的输出将包含许多次谐波信号和互调产物。其中, 互调产物所在的各个频率可表示为:

$$f_{PIM} = mf_1 + nf_2 \quad (2)$$

其中:  $f_{PIM}$  为互调产物发生的频率;  $m, n$  为实数。

如果令  $N$  为互调产物的阶数, 则有,

$$N = |m| + |n| \quad (3)$$

互调产物的幅度随着阶数的增加而减小。一般来说, 当天线的发射功率很高, 且接收机灵敏度很高时, 三阶互调影响最严重, 高阶互调也可能成为造成系统非正常工作的影响因素<sup>[6]</sup>。

在系统稳定情况下, 麦克劳林展开式所描述的低阶互调产物的规律与实际情况吻合的较好, 例如文献[7]指出, 三阶互调功率与输入信号功率的关系的实际测量结果和公式基本相符, 为 3dB/dB 左右。更高阶的情况还没有报道。应该指出, 公式 (1) 所描述的是一个无记忆非线性系统。实际系统可能是有记忆非线性系统, 并且公式 (1) 中的系数, 可能与时间和输入信号功率相关。这在本文天线系统实测中可以得到说明。

### 3 测试系统分析与搭建

天线产生的互调干扰包括两部分: 天线的非线性可以在辐射出去的信号中产生互调产物, 也可以从天线向馈电端反射互调产物。在收发共用天线的通信系统中, 后一项对系统接收机造成主要影响。这里着重关心天线反射到馈电端互调干扰的测量。当然所搭建的系统能够测量各种非线性系统的互调。

非线性系统的互调干扰一般在等功率下的两个不同频率的单频信号作为输入的条件下测试。图 1 给出了测试系统的框图。如图, 两个信号源产生特定频率的信号, 经过功率放大器放大后, 分别通过各自的滤波器进行滤波; 功率合成器将两个高功率信号合成一路输出, 经过功率计进入双工器; 双工器的输出端, 一路接待测天线, 一路接频谱分析仪, 待测天线置于非谐振腔内。

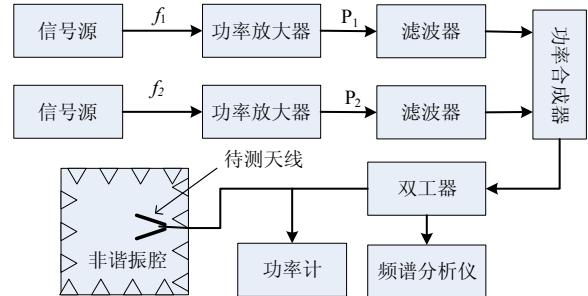


图 1 天线无源互调测试系统框图

图 2 给出了实际测试系统的照片。图中: (a) 为频谱仪; (b) 和 (c) 为信号发生器; (g, d) 为功率计; (e) 和 (f) 为线性功率放大器; (h) 为双工器; (i) 为滤波器。

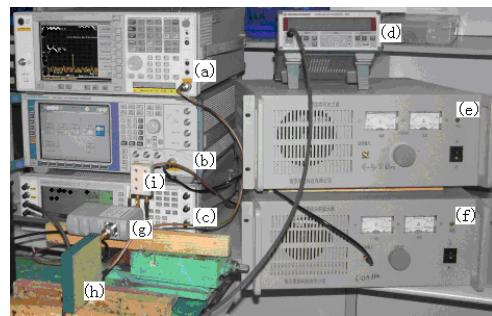


图 2 天线无源互调实际测试系统

## 4 天线三阶互调的测试及结果分析

### 4.1 天线及测试条件

两个信号源产生频率分别为 2.4GHz 和 2.45GHz 的正弦信号, 经过功率放大器放大后, 一个信号的功率为 40dBm, 另一个信号的功率为 15dBm。信号的功率与天线的实际工作条件接近。这里没有对两个信号为相等功率情况进行测试。

### 4.2 测试及结果分析

待测天线为实际通信系统的带反射面的振子天线。分别对 A 和 B 两种天线进行测量, 天线 A 比天线 B 的尺寸略大, 但结构相同。最初测试系统的设备间均使用长度为 0.9 米的同轴电缆连接, 测试过程中发现所测得的三阶互调的幅值不稳定。最后将滤波器与功率合成器及双工器之间的电缆去掉直接相连后, 系统才比较稳定。因此, 在该测试系统中尽量减少电缆的使用数量, 并选用低互调的电缆。

在实际测量过程中还发现, 观察一定的时间,

天线的三阶互调幅度随时间变化，甚至抖动，偶尔三阶互调呈现出宽频干扰特性。这些现象说明，麦克劳林公式不能精确描述天线的非线性所产生的三阶互调情况。如果将麦克劳林公式中的各项系数改写为与时间和输入功率有关的系数，才能够描述天线互调的真实情况，但这些系数的确定非常困难。

对两种型号的天线分别测试过程中，还对同轴电缆在不同连接状态（接头连接松状态、紧状态）下进行了测试。表 1 给出了测试结果。表 1 中的测量数据为多次测量结果的平均值。测试条件中的正常连接为同轴电缆与天线直接相连，加铜/钢关节指天线和同轴电缆通过铜/钢关节连接、铜关节松是指铜关节与天线之间的连接稍有松弛。对带关节情况的测试是因为天线的正常工作条件所要求的。

从表 1 可以看出，对天线的三阶互调有较大影响。从表中还可以看出，在天线的同轴电缆分别使用铜关节和不锈钢关节对三阶互调的影响使用不锈钢关节造成高的三阶互调。这也验证了铁磁性材料会加大互调产物的结论。

表 1 天线三阶互调测试结果

| 天线序号 | 测试条件 | 天线 A 三阶互调 (Bm) | 天线 B 三阶互调 (dBm) |
|------|------|----------------|-----------------|
| 1    | 正常连接 | -12.0          | -110.1          |
| 2    | 加铜关节 | -12.8          | -113.1          |
| 3    | 铜关节松 | -8.9           | -99.1           |
| 4    | 加钢关节 | -9.3           | -80.1           |

本次试验还对 A 型天线由于不同装配工艺不同进行测量，结果如表 2 所示。其中，天线 1, 2 的电源馈线由经验较丰富的人员进行焊接，天线 3, 4 由其他人员焊接。可以看出天线 1, 2 的三阶互调远远低于天线 3, 4 的三阶互调。说明天线装配工艺的重

要性。

通过对天线的互调干扰的测试过程和测试结果的分析，可以认为减小天线在大功率下呈现的非线性以降低互调干扰，在天线及馈电的电缆上应该不使用非线性材料，如铁、镍等；天线的金属与金属的连接应防止松滑，尽量少使用螺纹连接，如果条件允许，最好焊接；由于所测试的天线为同轴电缆馈电，同轴电缆的弯曲程度应该尽量低，以免在电缆的连接处造成较大的应力，形成互调干扰产生的隐患。

表 2 不同装配工艺下的测试结果

| 天线序号 | 天线 A 三阶互调 (dBm) |
|------|-----------------|
| 1    | -122.8          |
| 2    | -121.0          |
| 3    | -117.0          |
| 4    | -104.3          |

## 5 结论

本文首先说明天线非线性是三阶互调产生的原因，并表明天线在相对稳定的状态下，其非线性引起的互调产物可由常系数的麦克劳林公式来说明。但是在一般情况下，麦克劳林公式的系数应该是与时间和输入功率等条件相关的变量。之后介绍了互调测试系统，并针对特定通信系统的天线进行了测试。通过对多种条件下天线三阶互调干扰的测试及数据分析，说明了对天线的三阶互调造成重要影响的几个因素。测试结果也说明，天线无源互调干扰测试系统为衡量天线在高功率下的非线性大小提供了依据。

## 参 考 文 献

- [1] G.H. Schennum, G. Rosati, Minimizing passive intermodulation product generation in high power satellites, Aerospace Applications Conference, 1996.
- [2] Sami Hienonen, and et al, Near-field scanner for the detection of passive intermodulation sources in base station antennas, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol. 46, No. 4, Nov. 2004
- [3] P. L. Lui and A. D. Rawlins, Passive non-linearities in antenna systems, IEE Colloquium on Passive Intermodulation Products in Antennas and Related Structures, Jun 1989
- [4] John Sanford, Passive intermodulation considerations in antenna design, Antennas and Propagation Society International Symposium, Ann Arbor, MI, USA Jun. 1993

- [5] Y. Patenaude, and et al, Antenna PIM measurements and associated test facilities, Proceedings of the IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium 2001, vol. 4, Boston, July 8–13, 2001
- [6] W. J. Hall, and et al, The control of passive intermodulation products in spacecraft antennas, IEE electronics division colloquium on passive intermodulation products and related structures 1989
- [7] V. Golikov, S. Hienonen, P. Vainikainen, Passive intermodulation distortion measurements in mobile communication antennas, 54th Vehicular Technology Conference (VTC Fall 2001), vol.4, Atlantic City, New Jersey, USA, 7-11 October 2001

作者简介：

陈立甲,男,博士,讲师,主要研究方向为MIMO通信、自适应信号处理、被动毫米波成像技术等;林澍,男,博士,讲师,主要研究方向为天线小型化及分形天线技术;杨彩田,女,副教授,主要研究方向为天线及RFID技术;邱景辉,男,教授,博导,主要研究方向为超宽带天线技术、高功率电磁脉冲技术、机载弹载天线技术、被动毫米波成像技术、邻近空间高速飞行器通信技术等。

## 如何学习天线设计

天线设计理论晦涩高深，让许多工程师望而却步，然而实际工程或实际工作中在设计天线时却很少用到这些高深晦涩的理论。实际上，我们只需要懂得最基本的天线和射频基础知识，借助于 HFSS、CST 软件或者测试仪器就可以设计出工作性能良好的各类天线。

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))专注于微波射频和天线设计人才的培养，推出了一系列天线设计培训视频课程。我们的视频培训课程，化繁为简，直观易学，可以帮助您快速学习掌握天线设计的真谛，让天线设计不再难…



### HFSS 天线设计培训课程套装

套装包含 6 门视频课程和 1 本图书，课程从基础讲起，内容由浅入深，理论介绍和实际操作讲解相结合，全面系统的讲解了 HFSS 天线设计的全过程。是国内最全面、最专业的 HFSS 天线设计课程，可以帮助你快速学习掌握如何使用 HFSS 软件进行天线设计，让天线设计不再难…

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/122.html>

### CST 天线设计视频培训课程套装

套装包含 5 门视频培训课程，由经验丰富的专家授课，旨在帮助您从零开始，全面系统地学习掌握 CST 微波工作室的功能应用和使用 CST 微波工作室进行天线设计实际过程和具体操作。视频课程，边操作边讲解，直观易学；购买套装同时赠送 3 个月在线答疑，帮您解答学习中遇到的问题，让您学习无忧。

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/cst/127.html>



### 13.56MHz NFC/RFID 线圈天线设计培训课程套装

套装包含 4 门视频培训课程，培训将 13.56MHz 线圈天线设计原理和仿真设计实践相结合，全面系统地讲解了 13.56MHz 线圈天线的工作原理、设计方法、设计考量以及使用 HFSS 和 CST 仿真分析线圈天线的具体操作，同时还介绍了 13.56MHz 线圈天线匹配电路的设计和调试。通过该套课程的学习，可以帮助您快速学习掌握 13.56MHz 线圈天线及其匹配电路的原理、设计和调试…

详情浏览: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/116.html>



## 关于易迪拓培训:

易迪拓培训([www.edatop.com](http://www.edatop.com))由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立,一直致力于专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养;后于 2006 年整合合并微波 EDA 网([www.mweda.com](http://www.mweda.com)),现已发展成为国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地,成功推出多套微波射频以及天线设计经典培训课程和 **ADS**、**HFSS** 等专业软件使用培训课程,广受客户好评;并先后与人民邮电出版社、电子工业出版社合作出版了多本专业图书,帮助数万名工程师提升了专业技术能力。客户遍布中兴通讯、研通高频、埃威航电、国人通信等多家国内知名公司,以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

## 我们的课程优势:

- ※ 成立于 2004 年, 10 多年丰富的行业经验
- ※ 一直专注于微波射频和天线设计工程师的培养, 更了解该行业对人才的要求
- ※ 视频课程、既能达到了现场培训的效果, 又能免除您舟车劳顿的辛苦, 学习工作两不误
- ※ 经验丰富的一线资深工程师主讲, 结合实际工程案例, 直观、实用、易学

## 联系我们:

- ※ 易迪拓培训官网: <http://www.edatop.com>
- ※ 微波 EDA 网: <http://www.mweda.com>
- ※ 官方淘宝店: <http://shop36920890.taobao.com>