

基于参考信号的无源互调故障定位技术

谢亚运^{1,2}, 年夫顺², 杨保国²

(1. 中北大学仪器与电子学院, 山西太原 030051; 2. 中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东青岛 266555)

摘 要: 研究了一种基于参考信号的无源互调故障定位技术. 该技术比传统无源互调测量技术多了一个参考信道, 提供参考信号, 解调互调信号相位响应, 同时引入校准技术, 在测量端口构建参考平面, 通过频时转换得到相对于参考平面的时域响应, 有效地进行故障排查. 在此基础上, 仿真故障定位实验验证了理论的正确性, 设计并制造相位参考板, 测试结果与实际值比较表明: 电缆上两个故障位置实际值与测量值之差的绝对值均 $\leq 1\text{m}$, 实际相对误差分别约为 5.1%、2.4%, 证明了这种方法的正确性和可行性. 该技术将克服传统故障定位的不足, 更适应于恶劣的地域环境.

关键词: 无源互调; 故障定位; 参考信号; 校准技术; 参考平面

中图分类号: TM931

文献标识码: A

文章编号: 0372-2112 (2017)04-0832-05

电子学报 URL: <http://www.ejournal.org.cn>

DOI: 10.3969/j.issn.0372-2112.2017.04.010

Fault Location Technology of Passive Inter-Modulation Using Reference Signal

XIE Ya-yun^{1,2}, NIAN Fu-shun², YANG Bao-guo²

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China;

2. The 41st Institute of China Electronic and Technology Corporation, Qingdao, Shandong 266555, China)

Abstract: Passive inter-modulation fault location technology based on the reference signal is researched. The technology has one more reference channel than the traditional passive inter-modulation measurement techniques, to provide a reference signal, to demodulate phase response of the inter-modulation signal, while introducing calibration technology in the measurement port to build the reference plane, Obtained Time domain response relative to the reference plane By the time-frequency conversion and effective troubleshooting. Based on this, the fault location test is simulated to prove the validity of theory, and the phase reference board is designed and fabricated, the experimental results and the actual value showed that: Absolute value of the difference between the actual value and the measured value of two fault location on the cables are $\leq 1\text{m}$, the actual relative error of approximately 5.1%, 2.4%, proves the correctness and feasibility of this approach. The technology will overcome the shortcomings of traditional fault location, adapts to the nasty geographical environment.

Key words: passive inter-modulation; fault location; reference signal; calibration technology; reference plane

1 引言

无源互调 (Passive Inter-Modulation, 简称 PIM) 是近年来卫星通信和个人移动通信等领域迅速发展的必然产物, 与有源互调有着本质性区别. 现今大功率多通道通信系统的不断涌现, 射频系统中各种无源器件非线性引起的 PIM 干扰落在接收机频带内而影响接收机的性能日益严重, 使得人们对 PIM 干扰的研究越来越关注. 尽管 PIM 功率电平很低, 且随着其阶数的增大而迅速减小, 但这足以破坏系统的正常工作, 严重时会使系

统崩溃. 因此, 对 PIM 测试与快速定位的研究具有非常重要的意义.

近年来, PIM 测量技术得到了快速的发展, 但同时也遇到了新的问题, 其中故障排查是关键性技术难题^[1]. 而现有二分法与敲击法故障定位技术, 虽然操作工具简单、定位类型多样, 但第一种方法非常费力和耗时, 尤其是在大量支流电缆连接在统一桅杆的拥挤基站中; 第二种一般为两人的工作, 需一个人爬到天线上敲击定位故障点, 且都具有测量精度低与环境局限性等缺点^[2], 为解决现有故障定位技术的缺陷, 设计了一

种新的无源互调故障定位技术,它具有操作简单、精度高等优点,克服了使用环境恶劣的局限性问题与测量类型狭窄的缺点.同时,这种 PIM 故障定位技术能方便地与矢量网络分析仪等微波毫米波测试系统集成,在同轴电缆网络、移动通信基站、舰载通信等微波系统中有着广泛的应用.

2 无源互调基本理论与测量

2.1 基本理论

无源互调现象是两个或多个不同频率的大功率信号混合输入到电缆、连接器等无源器件中,由于器件非线性使其相互调制产生互调产物.实际上,所有无源器件都存在一定程度的非线性,当输入功率较小时,这些器件的非线性程度较弱,可以忽略其非线性而近似为线性器件,但当输入功率逐渐变大时,与接收信号相比,非线性因素造成的影响比较大,不能忽略^[3].这些极其微弱的互调信号一旦进入接收系统的接收频段,很难用滤波器滤除,并且滤波器本身也是无源器件,降低接收机的灵敏度,对系统造成强烈的干扰.

为了不失一般性,假设信号源产生两个有固定间隔的连续波(CW)调制信号 f_1 和 f_2 ,并合成双音信号,如式(1).

$$V_{in} = A_1 \cos(2\pi f_1 t) + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \Delta\varphi) \quad (1)$$

式中, V_{in} 为合成的双音信号, A_1 和 A_2 是两个激励信号的幅度, $\Delta\varphi$ 是两个信号初始相位差.假设非线性器件的传输函数可用一个 n 阶幂级数表示为^[3]

$$V_o = a_0 + a_1 V_{in} + a_2 V_{in}^2 + a_3 V_{in}^3 + \dots \quad (2)$$

式中, V_o 是输出信号, $a_0, a_1, a_2, a_3, \dots$ 是依赖于非线性器件特性的系数.将式(1)代入式(2)并整理,可得到 V_o 的频谱,如图1所示,频谱是由两个激励信号、许多新产生的谐波信号以及互调信号组成.而互调信号可以表示为

$$f_{PIM} = mf_1 + nf_2 \quad (3)$$

式中, m 和 n 均为整数,可为正整数、负整数和零, $order = |m| + |n|$ 定义为互调信号的阶数.

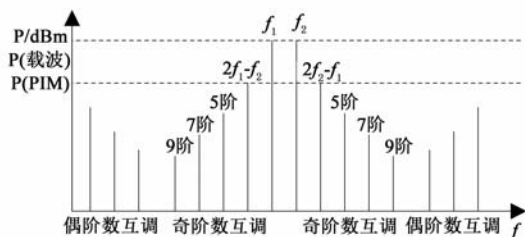


图1 PIM干扰信号的频谱

2.2 PIM互调测量

无源互调产物不可预知性很强,不遵循特定的规律,需通过大量实验才能获得比较准确的结果.测量单

端口器件时,如天线、负载等,用反射式测量;测量双端口或多端口器件时,如双工器、定向耦合器等,用传输式测量.

图2描述了典型PIM反射互调测量系统^[4].两个载频信号 f_1 和 f_2 分别经过功率放大器进入合路器 P_1 和 P_2 端,合成双音信号后,从 P_3 端输出,再经滤波和双工器,得到纯净的大功率双音载频信号(IEC推荐两路信号源输出信号功率均为43dBm),该大功率双音载频信号注入到被测器件(DUT)中,互调产物被反射回双工器 P_4 端,而双音信号则被低互调负载吸收掉,其中落入到接收频段的互调产物从 P_5 端被引导到接收机,接收机读数即为最终的反射互调测试结果.

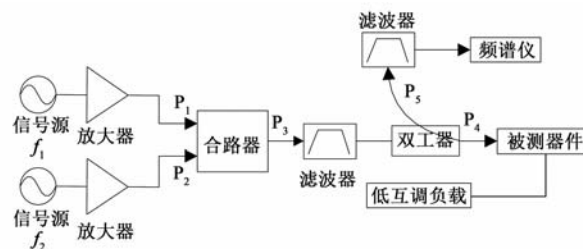


图2 典型PIM反射互调测量系统

图3为传输互调测量原理框图.其原理和反射式测量原理相似,区别在于 P_3 端合成的双音信号经滤波后先注入到DUT,再经双工器分离出互调信号引导到接收机.

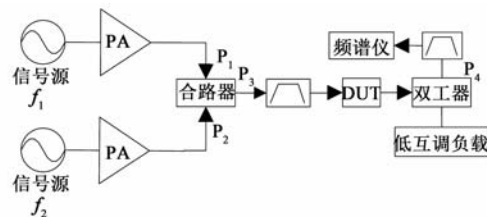


图3 传输互调测量原理框图

3 无源互调故障定位测量

3.1 PIM故障定位原理

如图4为PIM干扰故障定位测量系统的工作原理图.其中虚框部分为PIM参考模块选件,可以进行三阶、五阶等互调信号定位,但高阶互调信号较弱、带宽较窄,所以测量精度低,同样灵敏度情况下三阶互调更易于定位.

现以三阶PIM信号为例.如图4由频率参考板调节源1、源2及本振源LO模块,生成 f_1, f_2 测试信号和 $2f_2 - f_1 - f_0$ 本振信号.

放大后的两路信号 f_1, f_2 经合路器、双工器形成测试所需的+43dBm双音信号,并加载于被测器件,产生PIM反射干扰信号 $2f_2 - f_1$,再由双工器分离后进入接收机A通道,与本振信号下变频,得到中频信号 f_0 .

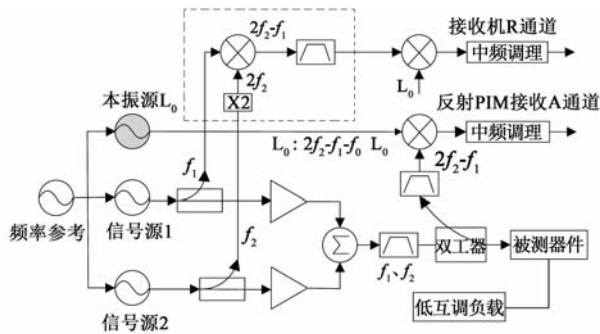


图4 PIM干扰故障定位测量系统

$$H = A \exp[j(\omega_0 \tau + \varphi_H)] \quad (4)$$

式中, A 为三阶 PIM 信号功率, ω_0 为三阶 PIM 信号角频率, φ_H 为三阶 PIM 信号相位, 其中 $\omega_0 = 2\pi f_0$, 系统设置的中频频率 f_0 为 7.606MHz.

源 2 信号在进入功放之前耦合出一路信号 f_2 , 在三阶 PIM 信号参考模块二倍频后与源 1 信号耦合出的信号 f_1 差频, 使用滤波器滤除杂波, 形成三阶 PIM 参考信号 $2f_2 - f_1$, 进入接收机 R 通道, 得到信号

$$R = B \exp[j(\omega_0 \tau + \varphi_R)] \quad (5)$$

式中, B 为三阶 PIM 参考信号功率, ω_0 为三阶 PIM 参考信号角频率, φ_R 为三阶 PIM 参考信号相位.

两信号在接收机进行处理, 得到三阶 PIM 干扰信号相对于相位参考模块的频率响应

$$S = R * H / |R| \quad (6)$$

把式(4)与式(5)代入到式(6)中, 得到如下的表达式

$$S = A \exp[j(\varphi_H - \varphi_R)] \quad (7)$$

式中, A 为三阶 PIM 信号功率, $\varphi_H - \varphi_R$ 为三阶 PIM 干扰信号相对于参考信号在一个频率跨度上的绝对相位^[6]. 通过频-时转换理论, 得到时域响应, 再根据时域响应中对应的最大值, 得到故障点相对于虚拟平面的电长度.

测量时, 首先在测量端进行功率校准, 使得双音信号功率为 $2 \times 43.0\text{dBm}$; 其次在测量端接互调标准件, 如图 5 虚线部分, 进行相位校准, 得到测量端相对于 PIM 信号参考模块的电长度, 使得相位参考平面处于测量端; 再次在测量端接 DUT (如电缆、天线等), 如图 5 中电缆与天线部分, 得到 DUT 相对于 PIM 信号参考模块的电长度; 最后根据校准技术, 得到 DUT 相对于测量端的电长度, 进而求出故障点到测量端的实际距离.

本系统主要利用反射法校准来确定参考平面进行定位, 而传输法无法确定固定参考平面, 暂不考虑传输法定位. 所以进行 PIM 反射互调故障定位, 真实物理长

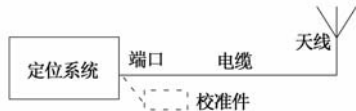


图5 定位测试原理图

度是信号传播长度的一半, 根据电磁波传递式(8)可得到故障位置^[8].

$$L = \frac{1}{2} c V_p * \Delta T \quad (8)$$

式中, $V_p = 1/\sqrt{\epsilon_r}$ (%) 为电缆相速度, ϵ_r 为电缆相对介电常数, c 为电磁波传播速度, ΔT 为故障点到测量端的电长度.

根据式(8)得知, 无源互调故障定位测量系统的定位精度与介质的介电常数、相位测量的准确度、接收机的灵敏度、相位参考模块的稳定度、AM-PM 等有关, 所以可以从以上几个方面提高定位精度, 实际上利用故障位置的实测值与测量值之差的绝对值估计系统定位测量误差.

$$\Delta \delta = \frac{|L - L_0|}{L_0} \quad (9)$$

式中, L 为故障位置测量值, L_0 为故障位置实际值, $\Delta \delta$ 为系统定位测量实际相对误差.

3.2 相位参考模块

为实现图 4 设计的测量原理, 进行了信号相位参考模块的优化设计. 利用倍频器、混频器、滤波器等微波器件集成一个相位参考模块.

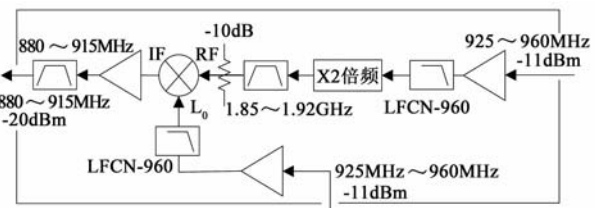


图6 互调参考信号构建框图

如图 6 为相位参考模块设计原理图, 其基本工作原理是频率 925 ~ 960MHz、功率 -11dBm 的基波经放大、滤波后, 进行二倍频, 再经滤波滤除二次谐波等杂波; 然后与同一基波信号混频后产生如式(3)、频段为 880 ~ 915MHz、功率为 -20dBm 的 PIM 参考信号.

4 仿真及测试结果分析

4.1 仿真实验

为了验证所提出的定位技术的有效性, 进行了前期的仿真与设计测试, 利用 MATLAB 软件对互调故障定位进行仿真, 其中设定环境与实验测试环境基本一致, 进行同一线路不同故障点的对比仿真, 如图 7 为仿真对比图.

从图 7 中可以得到两个校准后的电长度为 $0.057\mu\text{s}$ 、 $0.133\mu\text{s}$, 从而求出故障点理论距离; 由于无源互调的随机性与不确定性, 无法仿真出故障处的互调值, 而第二个故障点的互调值较大些, 这是由于第二个互调值是前面互调的叠加.

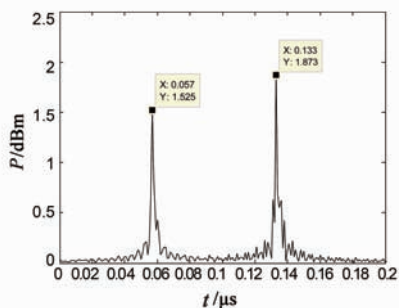


图7 不同故障点仿真对比图

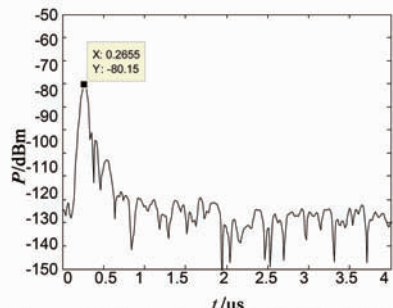


图10 测量端相对PIM参考模块的虚拟电长度

4.2 系统搭建与测试分析

如图 8 所示,按图 6 原理制作了 PIM 相位参考板,并把 PIM 相位参考板组装到测量系统中,为系统提供三阶 PIM 参考信号。

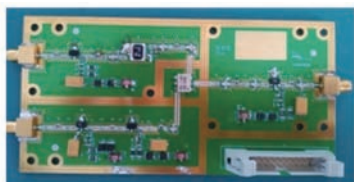


图8 PIM相位参考板实物图

PIM 相位参考板中左边两端为本振与射频信号输入端,右边为中频输出端,插排为相位参考板提供 +9V 电压,使得板子正常工作,产生三阶 PIM 参考信号。

按照图 4 工作原理搭建 PIM 故障定位测试系统,如图 9 所示,选定电缆 ε_r 为 1.38 ~ 1.74,设定相速度 $V_p = 0.85$ 。连接好仪器后,首先在测量端进行功率校准,使得双音信号功率为 $2 \times 43.0\text{dBm}$ 。



图9 故障定位测试系统及校准环境

其次依据图 5 虚线部分进行如图 9 所示的校准,在测量端接 -80dBm 的互调标准件,进行相位校准,得到测量端相对于 PIM 信号参考模块的虚拟电长度 t_0 ,如图 10 所示。

从图 10 中可以看出,在电长度 $t_0 = 0.2655\mu\text{s}$ 处存在互调最大点,即测量端相对参考平面的电长度,使用程序自动编入接收机中待处理;而该点互调值 -80.15dBm ,与校准件标准值基本一致,间接地证明了原理与实验的正确性。

然后人为地构建一条故障电缆,并且两个故障位置分别在距电缆输入端约为 7.6m 与 18m 处,按照图 5 实线部分连接被测电缆,如图 11 定位测试图所示。



图11 被测电缆故障定位测试

测试后可得到三阶 PIM 干扰信号相对参考模块的频率响应 S ,如图 12 所示。

图 12 中(a)为 PIM 故障产生的互调值;(b)为 PIM 信号相对参考信号在一个频率跨度上的绝对相位 $\varphi_H - \varphi_R$,利用时频转换得到 PIM 信号相对参考信号的电长度 t 。

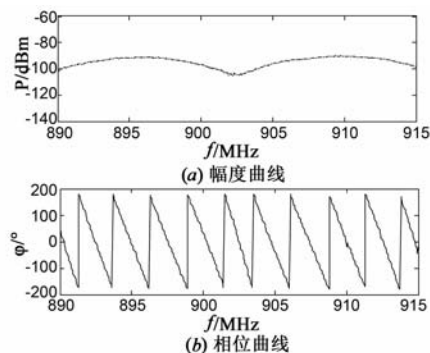


图12 PIM信号相对参考模块的频率响应

最后根据校准技术与数据补偿,在接收机内部进行的数据处理,如式(10),得到电缆故障点相对于测量端的电长度 ΔT 曲线,如图 13 所示。

$$\Delta T = t - t_0 \quad (10)$$

由图 13 可以看出该电缆有两个故障点,而两个互调功率最大时对应的时间为故障点到测量端的电长度,即 $\Delta T_1 = 0.0627\mu\text{s}$, $\Delta T_2 = 0.1378\mu\text{s}$;第二个故障点的互调值较大些,这与理论仿真结果基本一致,说明了该定位测试实验的正确性。

分别将电长度 ΔT_1 、 ΔT_2 、速度因子 $V_p = \sqrt{\varepsilon_0/\varepsilon_r}$ =

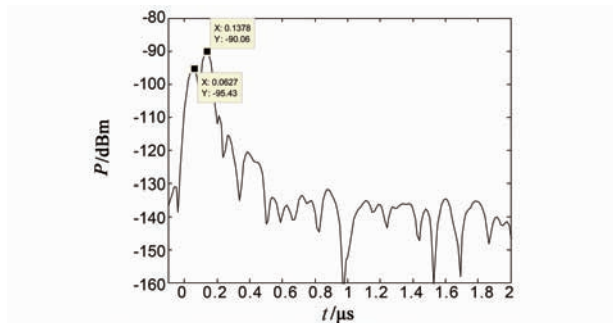


图13 电缆故障点相对测量端的电长度曲线

0.85 等参数代入式(8),得两个故障相对测量端的距离约为 $L_1 = 7.99\text{m}$, $L_2 = 17.57\text{m}$.

由此可知,电缆上两个故障位置实际值与测量值之差的绝对值约为 0.39m 与 0.43m,根据式(9)得到系统定位测量实际相对误差分别约为 5.1%、2.4%.

通过图 13 测试结果与图 7 仿真分析可知:理论电长度比测量值要小些,但仿真与测试结果误差不超过 1m,实际值与测试、仿真结果基本吻合,定位位置基本一致,证明了该方法的正确性和可行性.而在工作频段内,仿真数据、测量结果与实际值三者均存在稍微的误差,这是由于故障点在建模与仿真的过程中,边界条件设置过于理想,而实际的整机加工精度、互调值、介质的均匀性以及材料特性等影响没有考虑造成的.

5 总结

本文在介绍了无源互调测试工作原理的基础上,利用相位参考理论、频时转换理论与故障定位技术相结合的方法,设计了一种新的无源互调故障定位技术.实际制作相位参考模块并搭建了测量系统,测量结果表明该无源互调故障定位技术,不但加工简单、精度高,而且克服了传统故障定位的不足,适合应用于恶劣的地域环境.

参考文献

- [1] S Hienonen, V Golikov, P Vainikainen. Near-field scanner for the detection of passive intermodulation sources in base station antennas[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2004, 46(4): 661 - 667.
- [2] J C Mantovani, H W Denny. Technique for locating passive inter-modulation interference source [A]. IEEE National Symposium on Electromagnetic Compatibility [C]. IEEE, 1987. 311 - 315.

- [3] 王海宁,梁建刚,王积勤. 大功率微波条件下的 PIM 问题综述[J]. 微波学报, 2005, 21(增刊): 1 - 6.
Wang Hai-ning, Liang Jian-gang, Wang Jiqin. Review of passive inter-modulation interference problem under high power signals[J]. Journal of Microwaves, 2005, 21: 1 - 6. (in Chinese)
- [4] J Miall. Vector measurements of passive inter-modulation products [A]. Conference on Precision Electromagnetic Measurements [C]. 2004. 420 - 421.
- [5] Joel P Dunsmore. Handbook of Microwaves Component Measurements; with Advance VNA Techniques [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2014.
- [6] 张厥盛,郑继禹,万心平. 锁相技术[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2011.
Zhang Jue-sheng, Zheng Ji-yu, Wan Xin-ping. The Technology of Phase Locked [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2011. (in Chinese)
- [7] 杨小牛,楼才义,徐建良. 软件无线电原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2001.
Yang Xiao-niu, Lou Cai-yi, Xu Jian-liang. The Principle and Application of Software Radio [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2001. (in Chinese)
- [8] Selli S, P Bolli, G Pelosi. A time-domain physical optics heuristic approach to passive inter-modulation scattering [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2001, 43(2): 203 - 209.

作者简介



谢亚运 男, 1989 年生, 安徽宿州人. 现就读于中北大学仪器与电子学院, 硕士研究生. 研究方向: 射频微波电路设计、测试计量技术与仪器.
E-mail: 15135168131@163.com



年夫顺 男, 1962 年生, 安徽怀远人. 1989 年毕业于西安交通大学获硕士学位. 中国电子科技集团公司第 41 研究所总工程师、研究员级高工、首席科学家. 主要研究领域: 微波毫米波测试技术、微波毫米波电路设计与制造技术、天线与雷达散射截面测试技术、电磁材料测试技术、太赫兹测试技术.