

用 IM Microscope方法计算无源互调产物

王海宁, 梁建刚, 王积勤, 张晨新

(空军工程大学导弹学院, 陕西三原 713800)

摘要: 在微波与射频无源互调的研究中, 预测无源互调产物的电平是非常重要的。在 IM Microscope方法的基础上进行了改进, 在预测过程中直接引入输入信号经过非线性器件后输出信号的幅度和相位变化模型, 给出了详细的数学模型, 并实例验证了该方法的正确性。

关键词: 无源互调 (PIM); 无源互调产物 (PIMP); IM Microscope; RF

中图分类号: TN914 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2005)03-0047-03

随着现代通信卫星的发展, 接收机的灵敏度越来越高, 在这种情况下, 无源互调 (Passive Intermodulation, 简称 PIM) 问题变得更加重要。工程中解决 PIM 问题最有意义的方法是实验和对无源互调产物 (PIMP) 功率电平进行预测。PIM 的精确测量需要大量的设备, 这些设备往往都受功率、温度等条件限制。目前国内 PIM 的测量设备很少, 而且只能进行简单的测量。在这种情况下, 对 PIMP 功率电平进行预测变得非常重要。预测的方法很多, 常用的有幂级数法、谐波平衡法和 IM Microscope 方法等。本文在 IM Microscope 方法的基础上进行了改进, 在预测过程中直接引入输入信号经过非线性器件后输出信号的幅度和相位变化模型^[1~4,6], 这样可以减少很多的测量工作。

1 用 IM Microscope 方法计算无源互调产物的基本原理

IM Microscope 方法的提出是为了解决卫星通信系统中的非线性信号的干扰问题^[5], 比如无源互调干扰。同其他方法比较, 该方法的主要优点是可以解决高阶产物的干扰问题, 并且适应的信号范围很广泛。

IM Microscope 方法的基本步骤有两步: 第 1 步, 计算信号通过非线性器件的等效增益 λ_i ; 第 2 步, 从输出信号 $v(t)$ 中减去输入信号 $\sum \lambda_i S_i(t)$, 剩下的部分即为要求解的交调噪声 $\mu(t)$ 。

IM Microscope 方法中所有信号都以带通信号的形式仿真^[6]。中心频率为 f_0 的输入信号为

$$x(t) = x_i(t) \cos(\omega_0 t) - x_q(t) \sin(\omega_0 t), \quad s(t) = A(t) e^{jB(t)} e^{j\omega_0 t} \quad (1)$$

$$A(t) = \sqrt{x_i^2(t) + x_q^2(t)}, \quad B(t) = \arctg\left[\frac{x_q(t)}{x_i(t)}\right], \quad x(t) = \operatorname{Re}\{s(t)\} \quad (2)$$

$$\text{对信号进行采样: } s(t = n\Delta t) = s(n) = [x_i(t = n\Delta t) + jx_q(t = n\Delta t)] e^{j\omega_0 n\Delta t} \quad (3)$$

实际的输出信号可以表示为

$$v(t) = F[A(t)] e^{jB(t) + jG[A(t)]} e^{j\omega_0 t} \quad (4)$$

式中, $F(\cdot)$ 代表信号经过非线性器件后幅度的变化, $G(\cdot)$ 则代表信号经过非线性器件后的相位变化。在实际的应用中, $F(\cdot)$ 和 $G(\cdot)$ 往往是通过实验测量得到的^[5]。

输入 L 路信号时每一路信号经过非线性器件都会发生一定的但未知的幅度和相位变化, 即为等效增益。但是, 所有信号相加却并不能完全代表输出信号, 必须加入一个修正量 $\eta(n)$, 即为交调噪声。所以, 式 (4) 也可以写成:

收稿日期: 2004-09-02

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目 (2002AA837010)

作者简介: 王海宁 (1976-), 男, 山东荣成人, 博士生, 主要从事微波电路与系统研究。

$$v(n) = F[A(n)]e^{jB(n)+jG[A(n)]} = \sum_{i=1}^L \lambda_i s_i(n) + \eta(n) \quad (5)$$

考虑有 L 个随机的 λ_i 满足式(5), 因此, 必须加以限制, 且必须保证 $\eta(n)$ 和 $s_i(n)$ 为正交关系^[5], 有:

$$\eta(n) = v(n) - \sum_{i=1}^L \lambda_i s_i(n) \quad (6)$$

$$\sum_{n=0}^{N-1} \eta(n) s_j^*(n) = \sum_{n=0}^{N-1} v(n) s_j^*(n) - \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=1}^L \lambda_i s_i(n) s_j^*(n) = 0 \quad j = 1, 2, \dots, L \quad (7)$$

2 引入输入信号经过非线性器件后输出信号的幅度和相位变化模型

输入信号为 $u(t) = a(t) \cos[2\pi Ft + \alpha(t)]$, 信号经过非线性器件后, 输出为 $v(u) = v(a \cos \theta)$, $\theta = 2\pi Ft + \alpha(t)$, 其傅里叶展开为

$$v(a \cos \theta) = \frac{1}{2} v_0(a) + v_1(a) \cos \theta + v_2(a) \cos^2 \theta + \dots, v_m(a) = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi v(a \cos \theta) \cos(m\theta) d\theta \quad (8)$$

其中, $v_m(a)$ 称为 $v(u)$ 的 m 阶 Chebyshev 变换^[3]。因为 $F(\cdot)$ 为器件非线性特性 $h(t)$ 的一阶 Chebyshev 变换^[3,5], 所以 $F[A(n)] = \frac{2}{\pi} \int_0^\pi h(a \cos \theta) \cos \theta d\theta$ 。假定输入信号为 M 路正弦变化信号, 利用 Volterra 级数前

N 项表示非线性系统的输出, 级数的每一项可以表示为

$$y_n(t) = \frac{1}{2^2} \sum_{k_1=-M}^M \dots \sum_{k_n=-M}^M E_{k_1} \dots E_{k_n} H_n(\omega_{k_1}, \omega_{k_2}, \dots, \omega_{k_n}) \exp[j(\omega_{k_1}, \omega_{k_2}, \dots, \omega_{k_n})t] \quad (9)$$

去掉频率不同于 ω_1 的频率分量^[4], 则输出信号为

$$y(t) = E_1 | H_1(\omega_1) | \exp[j\psi_1(\omega_1)] (1 + G_3(\omega_1) \cos \theta_3 + G_5(\omega_1) \cos \theta_5)^2 + (G_3(\omega_1) \sin \theta_3 + G_5(\omega_1) \sin \theta_5)^2)^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_1 t + \psi) \quad (10)$$

$$G_3(\omega_1) = \frac{3}{4} E_1^2 \left| \frac{H_3(\omega_1, \omega_1, -\omega_1)}{H_1(\omega_1)} \right|, \quad \theta_3 = \phi_3(\omega_1, \omega_1, -\omega_1) - \phi_1(\omega_1)$$

$$G_5(\omega_1) = \frac{5}{8} E_1^4 \left| \frac{H_5(\omega_1, \omega_1, -\omega_1, -\omega_1)}{H_1(\omega_1)} \right|, \quad \theta_5 = \phi_5(\omega_1, \omega_1, -\omega_1, -\omega_1) - \phi_1(\omega_1)$$

$$\psi = \arctg \frac{G_3(\omega_3) \sin \theta_3 + G_5(\omega_1) \sin \theta_5}{1 + G_3(\omega_3) \cos \theta_3 + G_5(\omega_1) \cos \theta_5} \quad (11)$$

式(10)即为系统非线性引起的相位变化, 将式(7)和式(10)带入式(6)中, 并将其展开, 可以得到矩阵形式:

$$H\lambda = W, h_{ij} = \sum s_i(n) s_j^*(n) \\ w_i = \sum_{n=0}^{n-1} v(n) s_i^*(n) = \sum_{n=0}^{n-1} F[A(t)] e^{jB(n)+jG[A(n)]} s_i^*(n), \quad \lambda = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_L]^T \quad (12)$$

3 计算结果

用来验证的器件的非线性模型以及输入、输出和计算的交调噪声的功率谱分别如图1、图2和图3所示(对数坐标), 输入信号的频率分别为 20 MHz 和 20.5 MHz。由此可见该法大大减少了原本在计算过程中需要进行的实验测量工作, 具有较大的理论和实际意义。

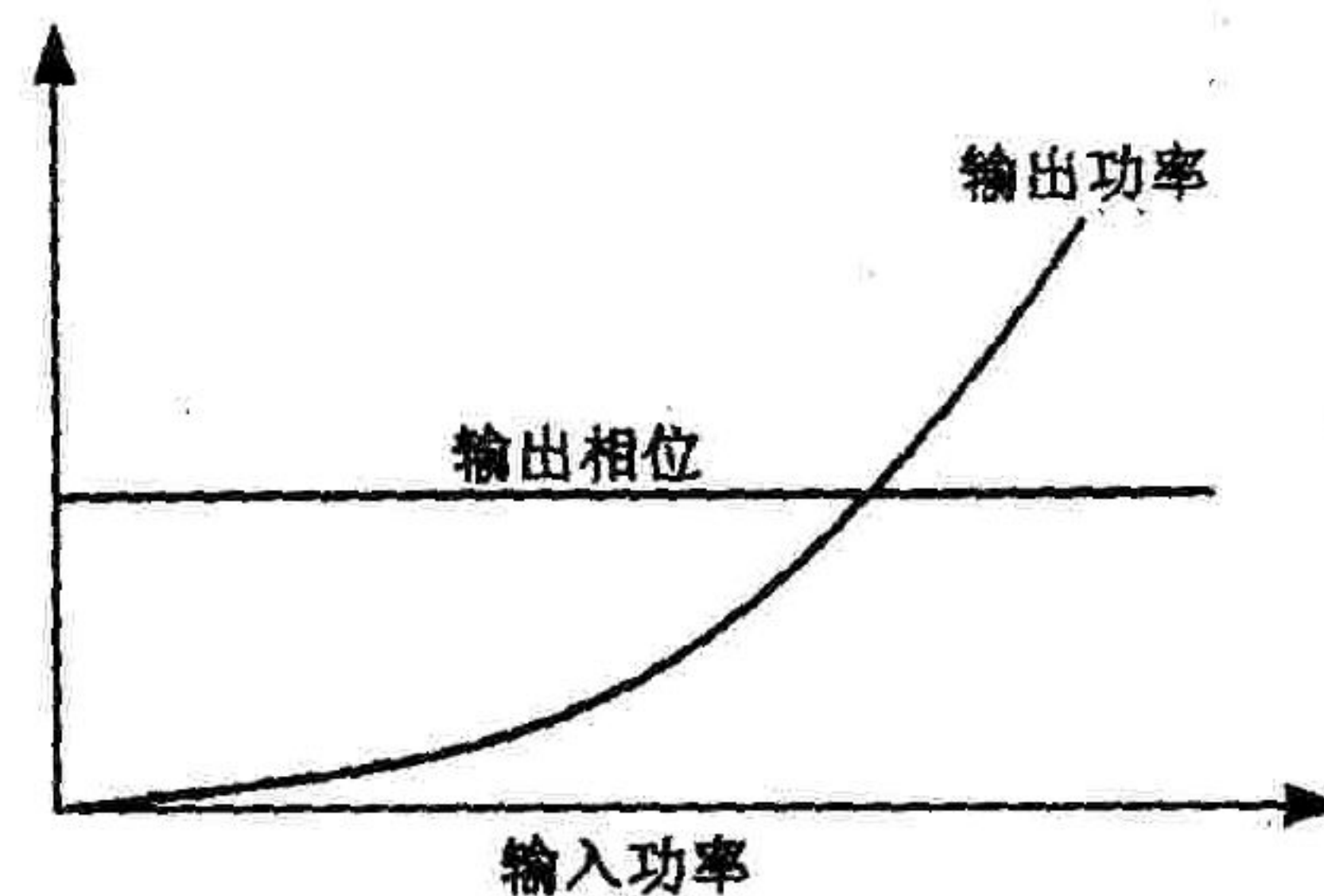


图1 采用器件的非线性示意图

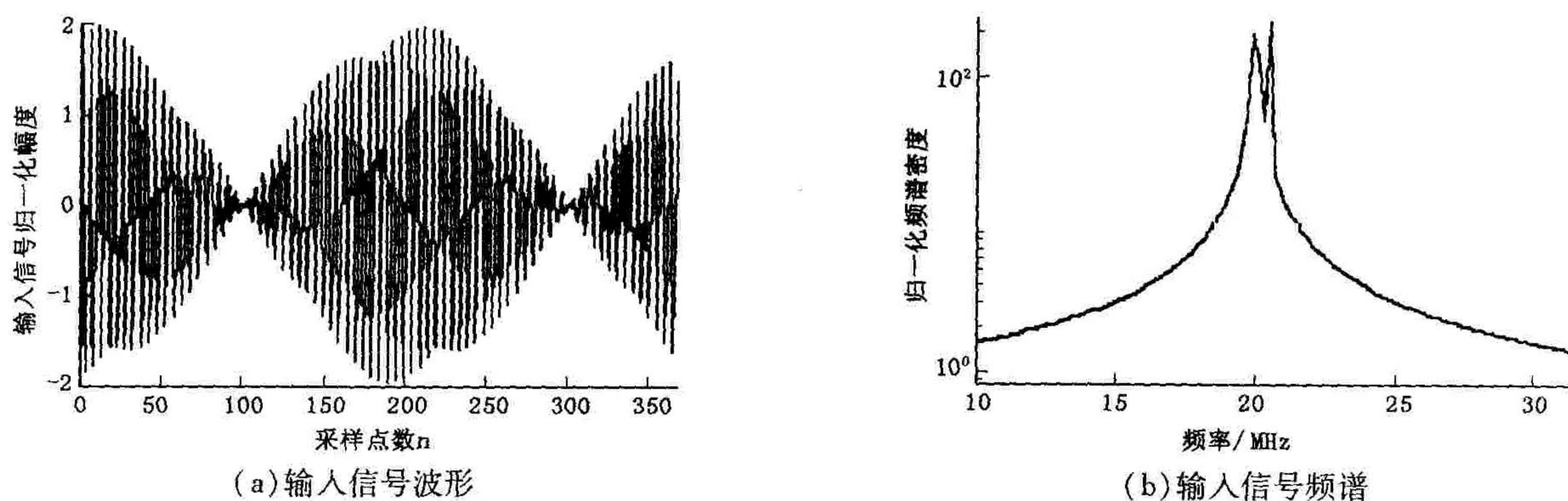


图2 输入信号的波形和频谱

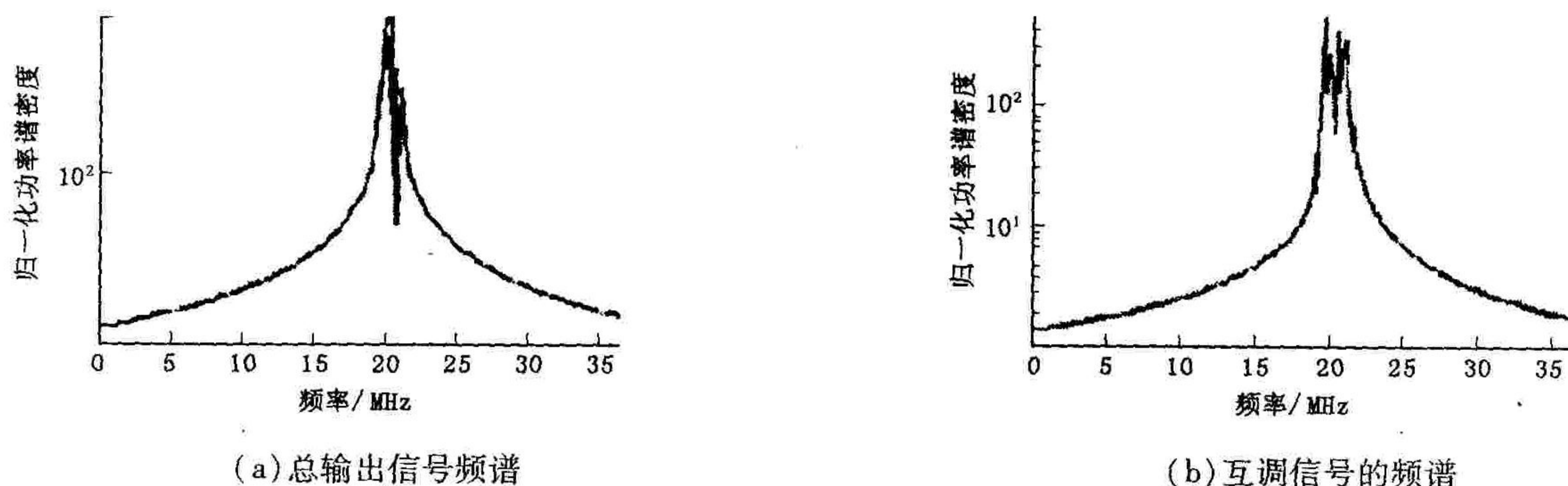


图3 输出信号和互调信号的波形和频谱

参考文献:

- [1] Berman A, Mahle C. Nonlinear Phase Shift in Traveling Wave Tubes as Applied to Multiple Access Communications Satellites[J]. IEEE Transactions on Communication Technology, 1970, 18(1):37-48.
- [2] Shimbo O. Effects of Intermodulation, AM-PM Conversion and Additive Noise in Multicarrier TWT Systems[J]. Proc. IEEE, 1971, 59(2):230-238.
- [3] Blachman N. Detectors, Bandpass Nonlinearities, and Their Optimization; Inversion of the Chebyshev Transform[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1971, 17(4):398-404.
- [4] Jordan H A, Vazquez L H. A Novel Representation of AM-PM Conversion[J]. Electromagnetic Compatibility, 1995, Symposium Record, (8):14-18.
- [5] Arnstein D S, Vuong X T, Cotner C B, et al. The IM Microscope; A New Approach to Nonlinear Analysis of Signals in Satellite Communications Systems[J]. COMAST Technical Review, 1992, 22(1):93-121.
- [6] Helstrom C W. Statistical Theory of Signal Detection[A]. Oxford, England Pergamon Press:1968.
- [7] 梁建刚,王光明,王积勤. 微波多级放大器电路拓扑优化[J]. 空军工程大学学报(自然科学版)2001, 2(6):41-43.

(编辑:田新华)

Calculation of PIMP by IM Microscope Method

WANG Hai - ning, LIANG Jian - gang, WANG Ji - qin, ZHANG Chen-xin

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The prediction of PIMP is very important in the research of microwave and RF PIM. The effects of PIM noise in devices or systems can be directly observed. Using the method of IM Microscope, many problems that can be solved by other methods can be handled. In this paper, an improved method on the base of IM Microscope is described. The model of output signal amplitude and phase distortion is introduced and the detailed math models are presented. By using this method many measurements in laboratory can be reduced.

Key words : passive intermodulation (PIM) ; passive intermodulation product (PIMP) ; IM Microscope; RF