

# 功率计误差对六端口反射计精度影响的蒙特卡洛计算机模拟\*

顾浩然

(华东师范大学电子科学技术系)

## 提 要

功率计检测误差对六端口反射计的测量精度影响是非常大的。对于一个实际的反射计,由于整个系统比较复杂,用常规方法很难估算出功率计检测误差对反射计的测量精度的影响。本文引用了一种概率统计方法——蒙特卡洛(Monte Carlo)法对六端口反射计的测量精度进行数值计算。并且用一个 $x$ 波段的六端口反射计作为例子,给出了计算结果与直方图。用这种方法可以为六端口反射计的合理设计提供依据。

### 1. 六端口网络与功率检测值的关系

考察图1所示的线性六端口网络,其③、④、⑤、⑥端口的出射波 $b_j$ 与②端口的入射波 $a_2$ ,出射波 $b_2$ 的关系可表示为:

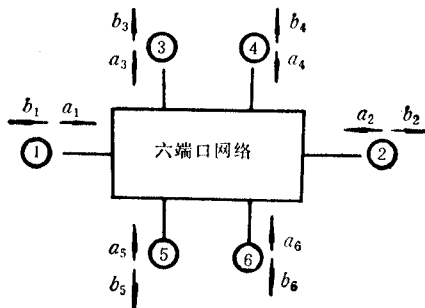


图 1

$$b_j = M_j a_2 + N_j b_2, \quad j = 3, 4, 5, 6, \quad (1)$$

其中 $M_j$ 和 $N_j$ 是仅仅与六端口网络以及检测器有关的参数。由(1)式得第 $j$ 端口的输出功率为:

$$P_j = |M_j a_2 + N_j b_2|^2. \quad (2)$$

如果用③端口的输出功率值对④、⑤、⑥端口的输出功率值归一化可得:

$$p_i = \frac{P_{i+3}}{P_3} = q_i \left| \frac{1 + A_i \Gamma}{1 + A_0 \Gamma} \right|^2, \quad (3)$$

\* 1985年10月29日收到,1987年2月16日修改定稿。

式中  $i = 1, 2, 3$ ;  $A_0 = c_0 + jd_0$ ;  $A_i = c_i + jd_i$ ;  $\Gamma = a_2/b_2 = X + jY$ , 为被测负载的复反射系数。

在(3)式中共有 11 个待定常数。若由(3)式解出被测负载的复反射系数  $\Gamma = X + jY$ , 则得其实部和虚部分别为:

$$X = \frac{u_0 + u_1 p_1 + u_2 p_2 + u_3 p_3}{1 + c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3}, \quad (4)$$

$$Y = \frac{V_0 + V_1 p_1 + V_2 p_2 + V_3 p_3}{1 + c_1 p_1 + c_2 p_2 + c_3 p_3}, \quad (5)$$

式中  $c_i, u_i$  及  $V_i$  称为六端口反射计的校准常数, 可按一定的校准程序(例如文献[1]提供的方法)求出。

## 2. 功率计精度对反射计测量精度影响的蒙特卡洛分析法

由上一节(4)式和(5)式可以看出, 功率计读数的精度对校准后的六端口反射计的测量精度起着决定性作用。功率计读出值是非标准正态分布的随机量, 可以用下式表达:

$$P_{r,j} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i - \frac{n}{2}}{\sqrt{\frac{n}{12}}} \sigma_a + P_j, \quad (6)$$

式中  $P_j$  为  $P_{r,j}$  的数学期望,  $j = 3, 4, 5, 6$ ,  $r$  为重复测量序号;  $\sigma_a$  为功率计读数的均方差;  $n_i$  为 0 与 1 之间的随机数。如果取  $n = 12$ , 则(6)式成为:

$$P_{r,j} = \left( \sum_{i=1}^{12} \eta_i - 6 \right) \sigma_a + P_j. \quad (7)$$

对于每个功率计都可以按(7)式模拟产生非标准正态分布的随机量, 再用这些值代入(4)式和(5)式来计算  $X, Y$  值<sup>[2]</sup>。如果用计算机模拟产生  $M$  组  $P_{r,j}$  值就有  $M$  组  $X_r, Y_r$ 。由此得到  $M$  个反射系数的模  $|\Gamma_r|$  或  $M$  个驻波系数  $S_r$ , 并作出  $|\Gamma|$  值的直方图, 由  $|\Gamma|$  值在直方图中的集中度可以方便地估算出系统的测量精度。

## 3. 实例

用我们自己制作的 X 波段波导型六端口反射计作为分析实例, 工作频率取 9.3GHz, 11 个校准系数为:

$$c_1 = -4.59795E - 03, \quad c_2 = -0.55043, \quad c_3 = 0.291075;$$

$$u_0 = 1.65477, \quad u_1 = 0.540778, \quad u_2 = -1.97919, \quad u_3 = -1.15687;$$

$$V_0 = 2.1347, \quad V_1 = 0.961133, \quad V_2 = -4.64855, \quad V_3 = 0.348413.$$

(1) 反射计测试端接偏置短路器 功率计读出值  $P_3, P_4, P_5, P_6$  的数学期望值分别为 0.5052, 0.5224, 0.2692, 0.4732; 反射系数  $|\Gamma|$  为 0.9934,  $\angle\Gamma$  为  $85.56^\circ$ 。

(a) 设功率计精度为  $\pm 5\%$ , 计算机作 200 次模拟后, 分析结果如图 2 所示。由图 2 得出系统测量精度差于  $\pm 0.05$ 。

(b) 设功率计精度为  $\pm 1\%$ , 计算机作 200 次模拟后, 分析结果如图 3 所示。由图 3 得出系统测量精度为  $\pm 0.02$ 。

(c) 设功率计精度为  $\pm 0.5\%$ , 计算机作 200 次模拟后, 分析结果如图 4 所示。由图

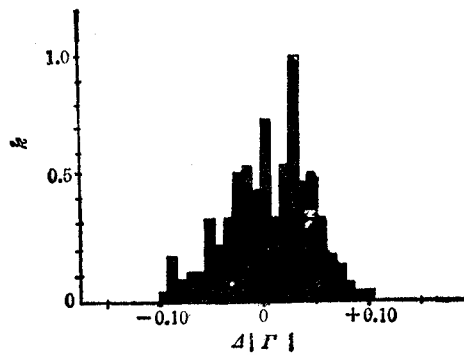


图 2

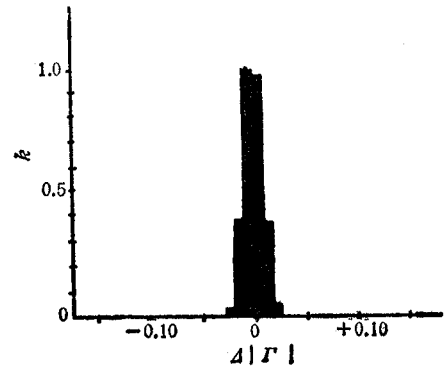


图 3

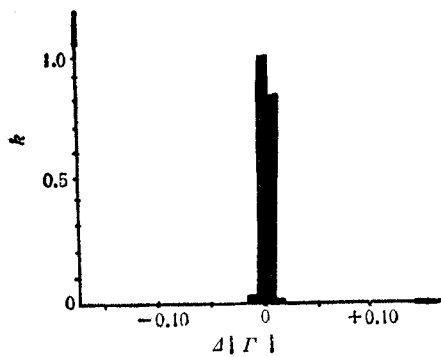


图 4

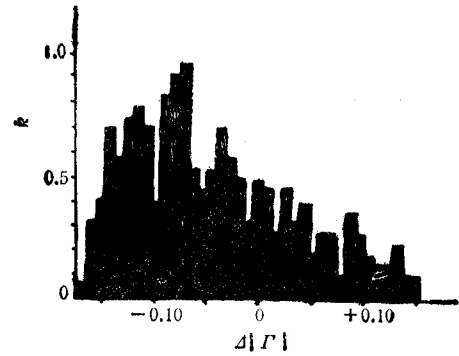


图 5

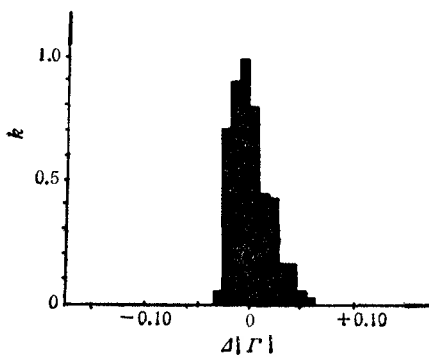


图 6

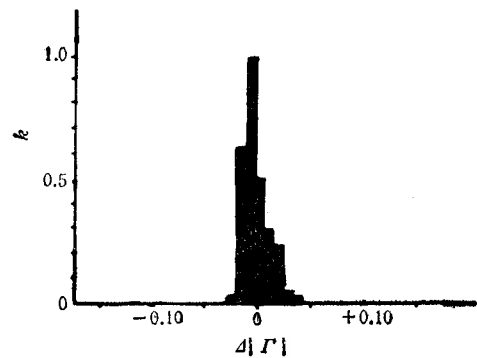


图 7

4 得出系统测量精度为  $\pm 0.01$ 。

(2) 反射计测试端接匹配负载 功率计读出值  $P_3, P_4, P_5, P_6$  的数学期望值分别为 0.5055, 0.4953, 0.3604, 0.3409; 反射系数  $|\Gamma|$  为 0.0093,  $\angle \Gamma$  为  $204.4^\circ$ 。

(a) 设功率计精度为  $\pm 5\%$ , 计算机作 400 次模拟后, 分析结果如图 5 所示。由图 5 得出系统的测量精度差于  $\pm 0.10$ 。

(b) 设功率计精度为  $\pm 1\%$ , 计算机作 200 次模拟后, 分析结果如图 6 所示。由图 6

得出系统的测量精度为  $\pm 0.04$ 。

(c) 设功率计精度为  $\pm 0.5\%$ , 计算机作 200 次模拟后, 分析结果如图 7 所示, 由图 7 得出系统的测量精度为  $\pm 0.02$ 。

在我们的 X 波段六端口反射计中使用 GX2B 型小功率计作为功率检测器, 对大反射负载反射系数模值的测量误差在  $\pm 0.03$  左右。当然提高功率计的测量精度能够改善六端口反射计的测量精度, 但是随着功率计测量精度的提高, 功率计本身的价格可能要成倍增长, 在这种情况下就有必要设法提高六端口网络本身的素质<sup>[3]</sup>。在研制一个六端口反射计的过程中, 如果用本文介绍的蒙特卡洛分析法对系统的测量精度进行估算, 再由估算结果和实际条件决定选用哪一种功率计作为六端口系统的检测器必然会收到较好的效果。

### 参 考 文 献

- [1] S. H. Li and R. G. Bosisio "Calibration of Multiport Reflectometers by Means of Four Open/Short Circuits" *IEEE Trans. on MTT*, **MTT-30** (1982), 1805.
- [2] 清华大学无线电电子学系, "微波电路的计算机辅助设计", 1983 年, 第 186—206 页。
- [3] 顾浩然、安同一, 华东师范大学学报, 1983 年, 第 4 期, 第 63—68 页。

## MONTE CARLO SIMULATION ANALYSIS OF EFFECT OF POWERMETER ERRORS ON MEASURING ACCURACY OF SIX-PORT REFLECTOR

Gu Haoran

(Department of Electronics Science and Technology, East China Normal University)

It is important that the powermeter errors will exert a tremendous influence on the measuring accuracy of six-port reflector. To estimate this influence is very difficult. In this paper, Monte Carlo simulation analysis is used. As a practical example of X band six-port reflector, it gives a set of computing results and diagrams. With this method it will provide scientific basis for designing six-port reflectors.