

# 高精度相位特性测量系统设计与实现

周良将<sup>1,2</sup> 梁兴东<sup>1</sup> 丁赤飏<sup>1</sup>

(1 中国科学院电子学研究所 微波成像技术国防重点实验室 北京 100190

2 中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘 要:** 元器件、模块和接收通道的相位特性(相-频特性、相位-温度特性等)是射频系统设计中需要考虑的一个重要指标;本文提出了一种基于带通采样定理,使用数据采集系统和数字信号处理方法的高精度相位特性测量系统,描述了该系统的设计方案和采用的相位检测方法,通过实际系统测量对系统的性能进行了验证。该系统在宽温度范围内可以测量工作频率在 500MHz 以下元器件、模块以及输出信号频率低于 500MHz 的接收通道的相位特性,亦可用于单频信号的高精度相位测量。实际测试结果表明测量分辨力可达到 0.025 度(RMS)。

**关键字:** 高精度, 相位特性, 测量。

**中图分类号:** TM933.3

**文献标识码:** B

## Design and Implementation of High resolution Phase Character Measure System

Zhou Liangjiang<sup>1,2</sup> Liang Xingdong<sup>1</sup> Ding Chibiao<sup>1</sup>

(1Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** A high resolution phase character measure system scheme, based on sub-sampling and digital signal processing, purpose for phase character measurement of radar RF modules and receivers, is proposed in this paper. The impact of noise in the system, such as A/D quantization noise and thermal noise, are investigated. The system is designed and implemented and the performance of experimental system is verified by experiment. The results show that the system has a resolution of 0.025 degree (RMS) under the frequency of 500MHz.

**Key words:** high resolution, phase measurement, system design.

## 1 引言

射频系统设计中,滤波器、放大器等元器件和模块的相位特性(如频率-相位特性、频率-温度特性等)是需要考虑的一个重要参数。对于高性能接收机,特别是多通道接收机,接收通道间的相位一致性是一项重要的考查指标。在一些对系统相位特性要求较高的系统中,如干涉合成孔径雷达系统,对器件的相位特性测量精度要求很高,在百分之一度的量级<sup>[1]</sup>。一般的测量仪器难以满足测试的需求。

本文设计、实现了一个高精度的相位特性测量系统,该系统使用双通道数据采集系统,基于带通采样定理,分别采相位测量信号和相位参考信号,通过信号检测算法比较两个信号的相位,实现对被测目标的相位特性测量。实际应用测试

表明该系统对相位测量的随机误差小于 0.025 度(RMS)。该系统亦可用于单频信号的相位测量。

## 2 系统方案

### 2.1 系统组成

针对不同的测量对象,需要采用不同的测量系统组成方式,图 1 所示为滤波器、放大器等器件的相位特性测量系统组成。图 2 所示为多通道接收机相位特性测量系统组成。但是,各种测量组成方案中的关键组成部分由三部分组成:微波信号源、A/D 变换(数据采集系统)和相位检测。各部分的主要功能为:

#### ● 微波信号源

在器件相位特性测量中,微波信号源产生单频正弦信号输出至被测器件和数据采集系统作为相位测量信号和相位参考信号。在多通道接收机

一致性测量中，微波信号源为每一个通道产生输入信号。两路信号间相位比较即可获取被测对象的相位特性，还可消除信号源相位噪声对测量的影响。

● A/D 变换（数据采集系统）

数据采集系统对相位测量信号和相位参考信号，或每个通道的输出信号进行采样、量化，输出至相位检测模块进行相位检测。为了降低系统的成本，可采用较低速率的数据采集系统基于带通采样定理对测量信号采样<sup>[3]</sup>。

● 相位检测

相位检测模块采用数字信号处理技术，对数据采集系统获取的两路测量信号进行相位检测和相位比较，以获取高精度的相位测量。

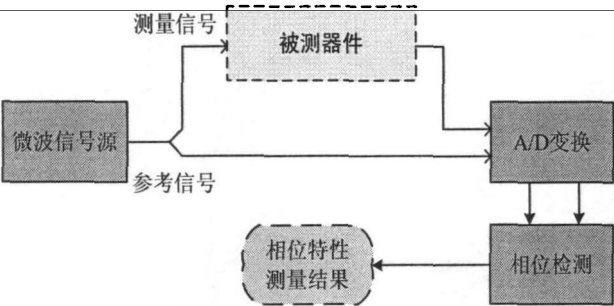


图 1 器件相位特性测量系统组成

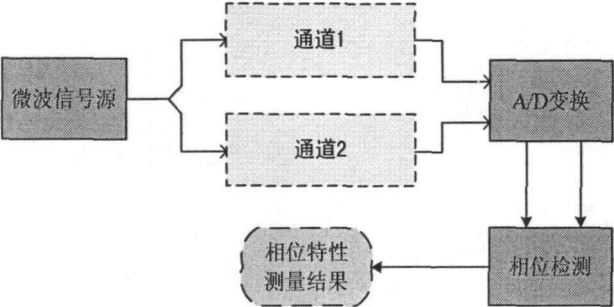


图 2 多通道相位特性测量系统组成

2.2 相位检测方法

在相位特性测量系统中，相位检测模块所处理的测量信号和参考信号均为单频正弦信号。为了简化测量系统的复杂度和实现高精度相位检测，采用了数字鉴相方法实现相位检测。对正弦信号相位检测的数字信号处理方法有多种，如基于 DFT 相位检测方法<sup>[5][7]</sup>、基于相关函数的相位检测的方法<sup>[6]</sup>等。本系统中，采用了基于正交变换的相位检测方法。数字正交变换法原理<sup>[1]</sup>如下：

设观测到的相位测量信号和相位参考信号分

别为：

$$S_T(t) = V_T \sin(2\pi f_0 t - \varphi_T) \tag{1}$$

$$S_R(t) = V_R \sin(2\pi f_0 t - \varphi_R) \tag{2}$$

对该信号进行采样，采样频率  $f_s = 1/T_s < f_0$ ，采样点数为  $N_0$ ，且  $N_0$  满足使  $\text{mod}(f_0, f_s) \cdot N_0$  为一整数。经过 A/D 量化后的信号为：

$$S_T(n) = V_T \sin(2\pi f_0 T_s n - \varphi_T) = V_T \sin(2\pi n / N - \varphi_T) \tag{3}$$

$$S_R(n) = V_R \sin(2\pi f_0 T_s n - \varphi_R) = V_R \sin(2\pi n / N - \varphi_R) \tag{4}$$

对  $S_T(t)$  进行数字正交变换，设：

$$\begin{aligned} a &= \frac{2}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} S_T(n) \cos(\frac{2\pi n}{N}) \\ &= \frac{V_T}{N_0} \{ \sum_{n=0}^{N_0-1} \sin(4\pi n / N - \varphi_T) + \sum_{n=0}^{N_0-1} \sin(-\varphi_T) \} \tag{5} \\ &= -V_T \sin \varphi_T \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} b &= \frac{2}{N_0} \sum_{n=0}^{N_0-1} S_T(n) \sin(\frac{2\pi n}{N}) \\ &= \frac{V_T}{N_0} \{ \sum_{n=0}^{N_0-1} \cos(4\pi n / N - \varphi_T) + \sum_{n=0}^{N_0-1} \cos(-\varphi_T) \} \tag{6} \\ &= V_T \cos \varphi_T \end{aligned}$$

可得相位为  $\varphi_T = \arctg(\frac{-a}{b})$ ，同理可计算得  $\varphi_R$ ，则被测对象的相位特性为：

$$\varphi_p(t) = \varphi_T - \varphi_R \tag{7}$$

2.3 相位测量精度

在相位特性测量系统中，采用测量的随机误差来表征测量精度，影响相位测量精度的主要因素为测量系统中的噪声。对于本测量系统，系统中的噪声来源主要为两部分：热噪声  $P_{thermal}$  和 A/D 量化噪声  $P_{quant}$ 。热噪声为：

$$P_{thermal} = K \cdot T \cdot B \cdot NF \tag{8}$$

其中， $K$  为波尔兹曼常数， $B$  被测对象噪声带宽， $T$  为被测对象工作温度， $NF$  为被测对象噪声系数。

A/D 量化噪声功率可表示为：

$$P_{quant} = \frac{P_m}{6(2^m)^2 K^2} \tag{9}$$

其中  $m$  位 A/D 量化位数， $K$ = 输入信号幅度 /AD 满量程采样幅度， $P_m$  输入 A/D 的信号功率。假设测量系统中的测量信号功率为  $P_s$ ，则信

噪比  $SNR = \frac{P_s}{P_{thermal} + P_{quant}}$ ，假设所用通道均具有相同的信噪比，则相位测量精度可表示为<sup>[4][6]</sup>：

$$\sigma_{\varphi}^2 = \frac{1}{Na \cdot N_0} \left( \frac{1}{2SNR_T} + \frac{1}{2SNR_R} \right)$$

(10)

其中  $Na$  为多次测量累积平均次数， $SNR_T$  和  $SNR_R$  分别为两路测量信号的信噪比。图 3 所示为采用 SystemVue 软件对相位特性测量系统仿真分析结果与(10)式计算结果的对比。

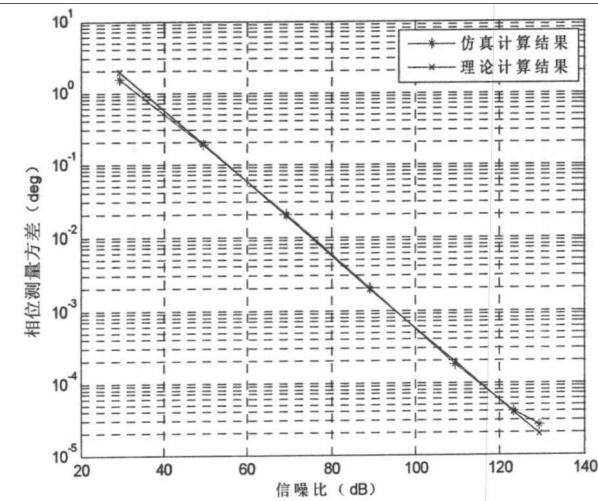


图 3 相位测量精度仿真分析与理论计算结果  
(其中  $f_s = 30MHz$ ， $f_0 = 200MHz$ ， $N_0 = 300$ ， $Na = 1$ ，假设两路信号信噪比相同)

3 系统实现与测试结果

基于前节所述分析，设计和实现了相位特性测量系统，设计参数如表 1 所示。

表 1 相位特性测量系统参数

| 参数           | 值                       |
|--------------|-------------------------|
| 微波信号源        | Agilent8267D<br>HP8648B |
| 相位测量信号幅度     | 0.15V                   |
| 相位参考信号幅度     | 1.5V                    |
| A/D 变换位数     | 10                      |
| A/D 满量程幅度    | 2.0V                    |
| 采样频率         | 30MHz                   |
| 数据采样长度 $N_0$ | 6000                    |
| 测量累积次数 $Na$  | 1                       |

根据上述参数，电缆相位测量系统的测量均方根差为 0.0263 度。

图 4 为相位特性测量系统对某器件 512 次测量的测量结果，测量所采用的测量信号频率为 200MHz。表 2 为相位特性测量系统处于恒温环境下长时间多次测量，用测量结果的均方根差来评价电缆相位测量系统的测量精度。而长时间观测中，均方根差的变化用于评价系统的工作稳定性。测量结果表明，相位特性测量系统工作稳定，实现了高精度的相位测量。

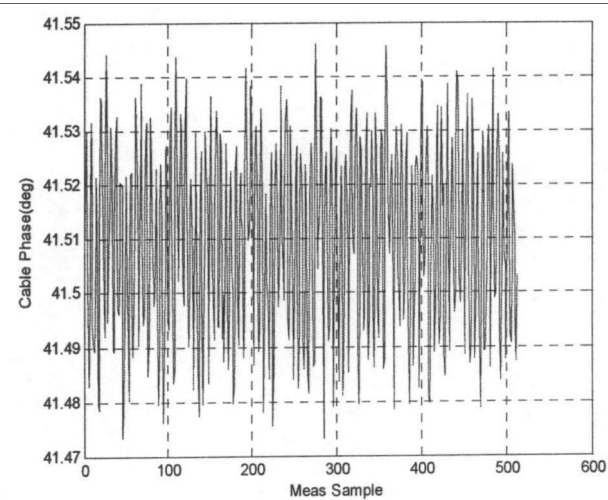


图 4 相位测量结果

表 2 相位测量系统测量结果

| 序号   | 测量时间  | 均值 (deg) | 均方根差 (deg) |
|------|-------|----------|------------|
| 1    | 11:39 | 41.5624  | 0.0129     |
| 2    | 11:46 | 41.5304  | 0.0190     |
| 3    | 11:51 | 41.5097  | 0.0167     |
| 4    | 11:56 | 41.5236  | 0.0067     |
| 均方根差 |       | 0.0223   |            |

4 结论

针对射频系统设计中的对器件、模块和子系统相位特性高精度测量的需求，本文提出了一个基于带通采样定理，采用数据采集和数字信号处理技术实现的高精度的相位特性测量系统方案。

对该系统方案进行了理论分析、设计和实现。对实际系统的测试结果表明，系统相位测量的随机误差为 0.0223 度 (RMS)。理论分析表明通过优化系统参数设计还可以获得更好的性能，系统的工作频率范围亦可扩展到更高频段。

参考文献:

[1] Marian Werner, Martin Haeusler, X-SAR/SRTM instrument phase error calibration, Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2001. IGARSS '01.

[2] Kenneth K. Clarke, Donald T. Hess, Phase measurement, traceability, and verification theory and practice, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 39, No. 1, 1990, p52-55

[3] 徐捷, 孟嘉, 黄高明, 杨绿溪, 欠采样条件下的正弦信号时差估计, 航天电子对抗[J], 2005 年 4 月, 21 (4), 22-24

[4] 宋长宝, 李志刚, 竺小松, 基于数字正交变换的相位差测量方法及误差分析, 电路与系统学报[J], 2006, 11 (2), 143-146。

[5] 江亚群, 何怡刚, 基于加窗 DFT 的相位差高精度测量算法, 电路与系统学报[J], 2005, 10 (2), 112-116。

[6] 张毅刚, 付平, 王丽, 采用数字相关法测量相位差, 计量学报[J], 2000, 21 (3), 216-221。

[7] 齐国清, 贾欣乐, 基于 DFT 相位的正弦波频率和初相的高精度估计方法, 电子学报[J], 2001 年 9 月, 29 (9), 1164-1167

[8] Steven M. Kay, Fundamentals of Statistical Signal Processing Volume I: Estimation Theory, published by Pearson Education[M]. 1993

作者简介:

**周良将** 男, 1981 年生, 中科院电子所信号与信息处理专业博士研究生, 主要研究方向是合成孔径雷达系统设计、系统误差补偿及其相关信号处理技术。

**梁兴东** 男, 1973 年生, 中科院电子所研究员, 主要研究方向包括雷达系统设计及雷达信号处理技术等。

**丁赤飏** 男, 1969 年生, 中科院电子所研究员, 博士生导师, 主要研究方向包括: 先进合成孔径雷达系统和信号处理技术、数字信号处理、信息系统技术等。