

用于弹载雷达天线罩测试的微波接收机设计

丁武伟 赵文普

(中航工业空空导弹研究院 洛阳 471009)

摘要: 弹载雷达天线罩是雷达型精确制导导弹的关键组成部分,其主要性能指标直接影响导弹的作战性能。精确、快速、自动的天线罩电性能测试,对天线罩的研制、生产都非常关键。本文介绍了用于弹载雷达天线罩性能测试的微波接收机方案与设计,采用低噪声微波放大器、数字微波移相器、带隔离器的PIN微波开关调制器和带正偏压微波检波器实现了高灵敏度三通道微波接收机,具有高精度和自动调相的特点,从而可精确、快速完成天线罩瞄准角误差信号的测量。

关键词: 导弹;天线罩测试;数控移相器;微波接收机

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1025

The design of microwave receiver for missile radome measurement system

Ding Wuwei Zhao Wenpu

(China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: Missile radome is the key part of precision guided radar missile, and its main parameters directly affect missile operational performance. High precision, high efficiency and automatic performance measurement is very important for radome development and production. This paper introduce a scheme of microwave receiver with digital microwave phase shifter for radome performance measurement, which have characteristic of high accuracy automatic phase shift, thus providing accurately and quickly measurement of missile radome Boresight Error(BSE).

Keywords: missile; radome measurement; digital phase shifter; microwave receiver

1 引言

天线罩是保护天线在恶劣环境条件下能够正常工作的一种设备,在航空、航天、导弹、雷达、通信、导航等无线电系统中得到广泛的应用^[1]。

不同的无线电设备使用的天线以及所处的工作环境差别很大,对天线罩的要求也各不相同。弹载雷达天线罩位于导弹的最前部,既要适应导弹气动力、气动热和飞行过程中的恶劣环境,保证弹载天线的正常工作,又不能影响弹载雷达的精确制导性能,是雷达型精确制导导弹的关键组成部分^[2]。

弹载雷达天线罩的主要性能指标(如透过率、瞄准角误差(BSE)、瞄准角误差斜率等),直接影响导弹的作战性能,因此精确、快速、自动的天线罩电性能测试,对天线罩的研制、生产都非常关键^[3]。

微波接收机是影响天线罩测试设备测试精度和效率的关键部件。早期设备采用波导器件实现,体积大,集成度差;采用带伺服系统的波导移相器,调试难度大、效率低。针对这一问题,提出了采用数控微波移相器的集成电路微

波接收机方案。采用单片微波集成电路技术不仅提高了微波接收机的集成度,各项性能指标也有很大提高。通过高精度D/A技术和线性修正,保证了数控微波移相器的移相精度和重复性,调试难度大大降低,工作效率显著提高。研制出的带数控微波移相器的微波接收机满足精确、快速的天线罩电性能测试要求。

2 天线罩测试系统

射频自动化测试技术的进步推动了射频测试系统从模拟控制向数字控制、由手动测试到自动测试的发展,工作效率大大提高^[4]。

天线罩测试系统的主要部分包括发射装置、接收装置、数采及处理系统,如图1所示。其中的发射装置由反射天线、射频信号源、天线伺服控制系统组成;接收装置由天线、微波接收机、信号调理电路、天线罩转台及伺服控制系统组成;数据采集卡及分析软件组成数采及处理系统,包含在工控计算机中。由工控计算机负责整个系统的协调工作^[5]。

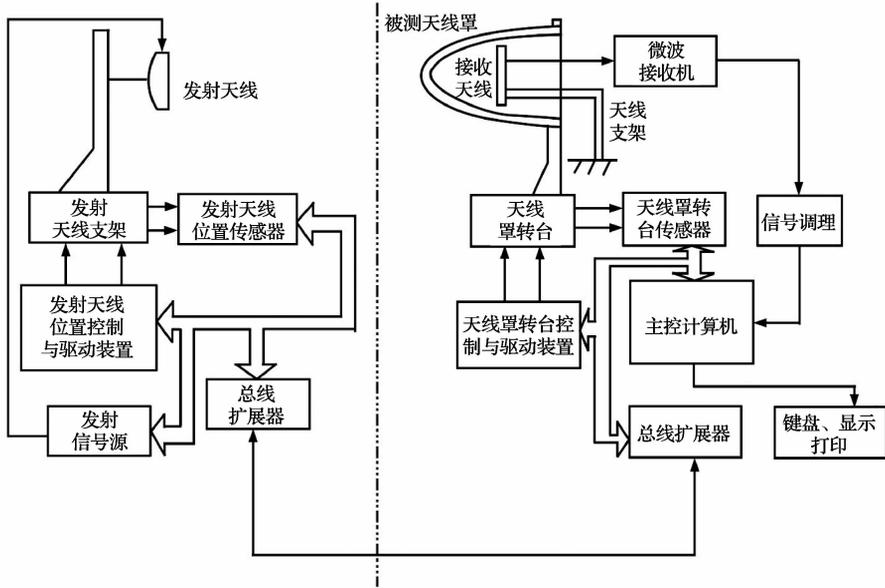


图 1 天线罩测试系统组成

发射装置不仅要提供频率、功率可调,按规定波形调制的微波信号,而且要使发射天线在方位和俯仰方向上能够运动,实现发射天线电轴必须对准接收天线电轴的要求,以便建立发射天线与接收天线位置坐标系之间的对应关系。

天线罩测试系统的性能、测量误差主要由接收装置决定。接收装置由微波接收机、信号调理电路、天线罩转台及伺服控制系统组成。微波接收机对接收天线输出的微弱射频信号进行放大、检波和解调,再送入信号调理电路进一步放大和滤波,最后送给数采及处理系统。天线罩转台及伺服控制系统按设定的步长控制天线罩在规定的测

量平面和角度范围内进行角度扫描运动,测量系统最终完成对天线罩电性能参数的采集和测试。

3 微波接收机技术方案

3.1 功能组成

天线罩测试设备微波接收机的功能是从接收天线输出的微波信号中分离出天线罩瞄准角误差信号,由低噪声微波放大器、数控微波移相器、PIN 微波开关调制器、隔离器、二合一微波合路器、波导双 T 电桥、微波检波器、前置低频放大器以及电源等部分组成,如图 2 所示。

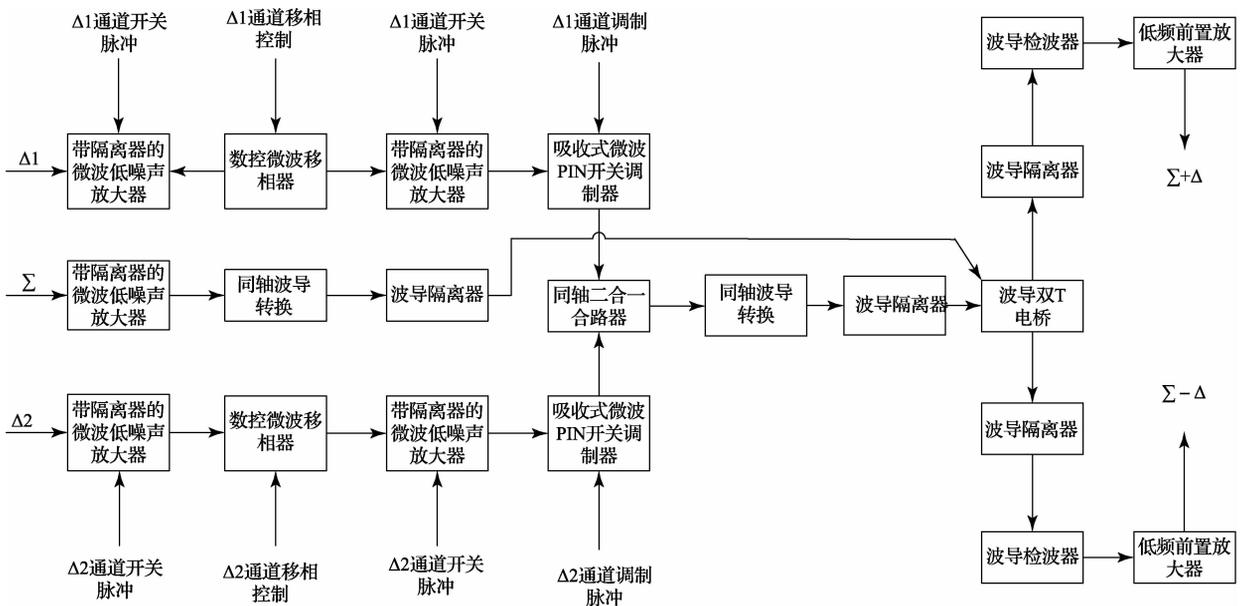


图 2 微波接收机原理框图

3.2 主要技术指标

- 1) 工作频率: $f_0 \pm 250$ MHz;
- 2) 接收机灵敏度: 小于 -50 dBm;
- 3) 相位调整范围: $0 \sim 360^\circ$;
- 4) 相位调整精度: 小于 2° ;
- 5) 通道隔离度: 大于 55 dB;
- 6) PIN 开关的通断比不小于 18 dB;
- 7) Σ 、 Δ_i ($i=1,2$) 输入端 USWR < 2 。

3.3 工作原理

其工作原理是首先对来自接收天线的三路(Σ 、 Δ_1 和 Δ_2)微波信号进行放大,其中和路信号 Σ 经放大、转换后直接进入魔T后分成两路等幅同相的信号,两个差路信号(Δ_1 和 Δ_2)经放大、移相、调制、转换后通过合路器分时进入波导双T电桥后分成两路等幅反相的信号,在双T电桥中对 Δ 信号与 Σ 信号进行加减,并对所生成的 $\Sigma + \Delta$ 信号和 $\Sigma - \Delta$ 信号进行检波放大后,送至信号调理电路进行处理。

微波低噪声放大器由同步器脉冲控制的专用电源供电。在系统工作过程中,只有对 Σ 通道的放大器始终是供给 $+6$ V电源,而对 Δ_1 和 Δ_2 通道的放大器则是轮流供电 $+6$ V。

4 微波接收机设计

由于天线罩测试设备需要对接收装置进行调相,设计中采用 $0 \sim 360^\circ$ 数控移相器,相位调整精度小于 1° 。数控移相器具有控制方便,精度高的特点,可实现自动调相功能,但插损较大,需要进行幅度补偿。

由于两个差路是分时工作,设计中采用带驱动器的微带PIN开关调制器,其关断比可达 60 dB,可以满足系统对通道隔离 55 dB的要求,与二合一微波合路器一同实现分时功能。

由于接收机采用直接检波工作方式,且检波器前通道增益不高,因此,接收机灵敏度取决于检波器的灵敏度,我们采用带正偏置的二极管微波检波器,检波灵敏度为 -55 dBm,可以满足系统要求。

为消除各通道间的信号互相干扰,增加通道间的隔离度,低噪声放大器和PIN开关调制器内部均采用内置隔离器,同时采用高隔离度的波导隔离器,来保证系统正常工作。

4.1 低噪声放大器

主要技术指标:

- | | |
|--------|-------------------|
| 工作频率 | $f_0 \pm 250$ MHz |
| 增益 | 21 ± 1 dB |
| 噪声系数 | 3.0 dB |
| 输入驻波系数 | 1.5 |

随着半导体技术和微组装技术的快速发展,微波集成电路由混合集成向单片集成发展,使得微波接收机的体积越来越小,可靠性大大提高^[6]。微波低噪声放大器作为微波接收机的关键器件,其性能对整个接收系统的灵敏度和动态范围有着重要影响^[7]。为满足主要技术要求,放大器采用单片微波集成低噪声放大器 MMIC 芯片加微带隔离器的形式。选用 UMS 公司的 CHA2090 宽带 GaAs 低噪声放大器芯片,增益 23 ± 1 dB,噪声系数 2.0 dB;微带隔离器采用俄罗斯器件,插入损耗 0.6 dB,隔离度 19 dB,输入驻波 1.3 。放大器采用 MCM 工艺和气密措施,保证产品的可靠性。

4.2 10 bit 数控移相器

主要技术指标:

- | | |
|-----------|------------------------------------|
| 工作频率 | $f_0 \pm 250$ MHz |
| 插入相移及步进 | $360^\circ/0.5^\circ$ (10 bit TTL) |
| 相移重复性(恒温) | $< 0.5^\circ$ |
| 转换速度 | $< 1 \mu s$ |
| 插入损耗 | < 12 dB |
| 输入功率 | > 200 mW |

由于带宽、体积和转换速度的限制,数控移相器通常采用反射式电调变容管移相器,具有相位连续可调的优点,因此相移步进可以做得很小,主要取决于控制电压的最小步进^[8]。

反射式电调变容管移相器的工作原理见图3。移相器的输入信号经过近似纯电抗负载的变容二极管,全部反射回来,反射信号的相位由电抗的大小决定。由于变容二极管的电抗受电压控制,则反射信号的相位可随电压变化而变化。

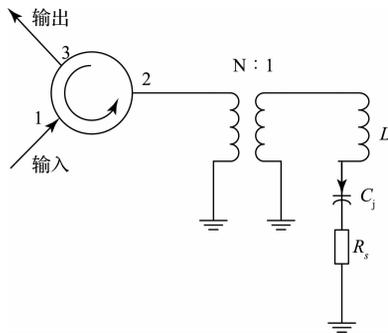


图3 反射式电调变容管移相器原理图

由图3可以看出,输出端反射系数为 $\Gamma = \frac{jX - Z_0}{jX + Z_0} = |\Gamma| e^{j\theta}$, 其中 $X = XL - XC$, 则反射系数相位 $\theta = \arctg\left(\frac{2(X/Z_0)}{(X/Z_0)^2 - 1}\right)$, 反射系数相位与电抗负载 X/Z_0 的关系如图4所示呈线性关系。

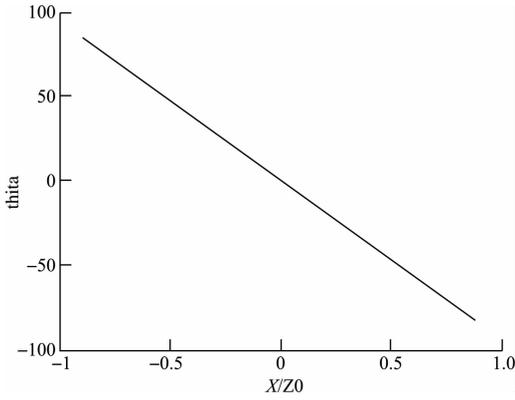


图 4 反射系数相位与电抗负载 X/Z_0 关系曲线

单级电路的频响已能达到系统要求,在频带内单级相移均大于 120° ,插入损耗小于 4 dB,因此要实现 360° 相移,需用三级电路来完成。级联对于增大带宽,改善相移随频率的变化都极为重要的作用。数控移相器还包括 D/A 变换器和电压变换网络,D/A 变换器将计算机传来的控制码转换为控制电压,再经电压变换网络进行线性修正后用于控制相移器^[9]。

采用 10 bit TTL 控制,理论上可以达到 0.35° 的相移步

进。采用单元电路级联的形式,移相范围可以达到 360° 。由于采用变容管芯片,不含引线电感和封装电容,可以使移相器的带宽大大提高,可达倍频程。

4.3 吸收式 PIN 开关调制器

采用带驱动器的微带吸收式 PIN 开关调制器,具有体积小,调制度高,速度快的特点^[10]。现有的吸收式 PIN 开关调制器采用三级并联开关级联的形式,插损小于 2 dB,调制度可达 60 dB,转换速度小于 $0.1 \mu\text{s}$ 。其原理图如图 5 所示。

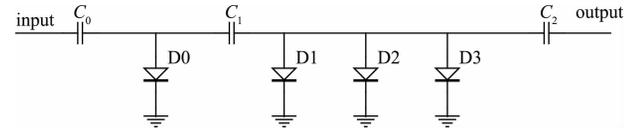


图 5 PIN 开关原理图

其中 D1, D2, D3 用来保证达到 60 dB 的调制度, D0 用于输入端匹配。 C_0, C_1, C_2 起到隔直的作用。

4.4 微波检波器

微波检波器由于非线性特性,它具有“解调”作用,可以把射频脉冲的包络解调成原来的视频脉冲调制波形^[11]。典型的检波器原理图如图 6 所示。

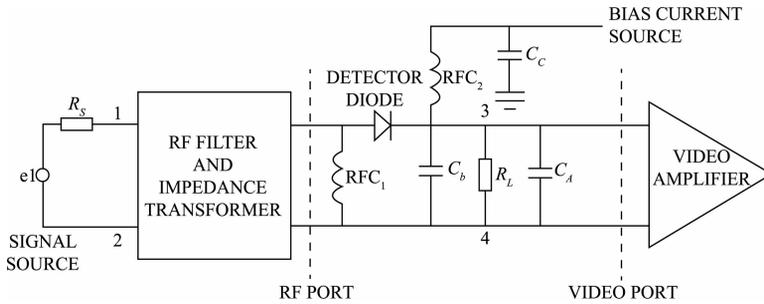
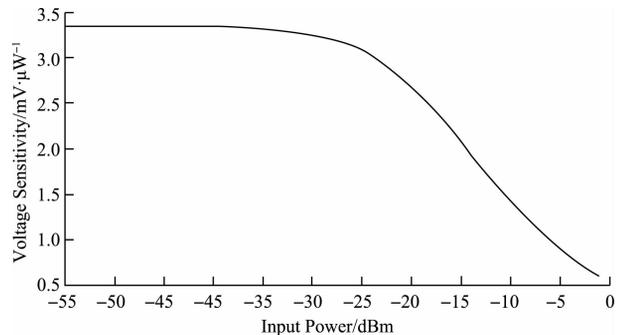


图 6 检波器原理图

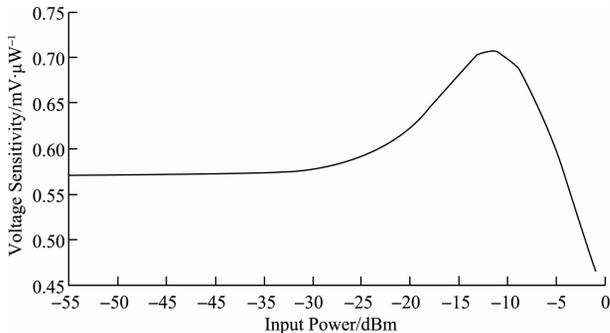
其中 R_L 为视频负载电阻, RFC1 和 RFC2 为射频扼流圈,为检波二极管提供直流回路,同时对射频开路,不对输入信号产生影响。 C_b 和 C_A 用于使检波二极管射频接地,同时起低通滤波的作用。

小信号检波器为平方率检波,其输出电压与输入射频功率成正比。可采用加偏置电流的方式,使微波检波器电压灵敏度提高。零偏置时,检波器的电压灵敏度为 $0.57 \text{ mV}/\mu\text{W}$ 左右;当偏置电流为 $20 \mu\text{A}$ 时,检波器的电压灵敏度为 $3.33 \text{ mV}/\mu\text{W}$ 左右,电压灵敏度提高了,如图 7 所示。



(2) 二极管正偏置时灵敏度

图 7 检波器二极管不同偏置时的电压灵敏度



(1) 二极管零偏置时灵敏度

5 结 论

用于弹载雷达天线罩测试的可调微波接收机采用先进的数控移相器,移相范围宽,移相精度高,控制方便,可实现相位的自动调整,满足了自动化测试的要求,并保证了测试的精度。采用带驱动器的 PIN 开关调制器,提高了开关的关断比,改善了系统的通道隔离度,满足了满足

系统对通道隔离 55 dB 的要求,从而可精确、快速实现天线罩瞄准角误差信号的测量。

参考文献

- [1] 杜耀惟. 天线罩电信设计方法[M]. 北京:国防工业出版社,1993:1-9.
- [2] 宋银锁. 空空导弹天线罩发展展望[J]. 航空兵器, 2005, 3(6):19-23.
- [3] 宋银锁. 高性能导弹天线罩测试系统[J]. 微波学报, 2007, 23(8): 28-30.
- [4] 陈玉华,刘鑫正,蔡成亮,等. 射频全自动化测试系统的设计与实现[J]. 电子测量技术, 2013, 36(9): 9-13.
- [5] 毛武军,李朝伟,崔炳喆,等. 天线罩测试系统设计[J]. 航空兵器, 2010,1(2):40-43.
- [6] 李佩,陈兴国,朱华顺. 一种雷达微波接收机电路的集成化设计与实现[J]. 微电子学, 2005, 35(4):441-444.

- [7] 丁君,张龙,丁武伟. Ku 波段低噪声放大器的设计[J]. 火力与指挥控制, 2009,34(11): 158-160.
- [8] 张加民,田小建,孙伟,等. 宽频带微波移相器的优化设计[J]. 微电子学, 2000, 30(2): 103-105.
- [9] 徐立松,李佩玥,葛川,等. 高精度 DA 电路的设计与实现[J]. 国外电子测量技术, 2014,33(12): 21-25.
- [10] 王立发,杨瑞霞,吴景峰. 宽带 pin 二极管单刀双掷开关的设计与实现[J]. 半导体技术, 2011, 36(3):238-241.
- [11] 张治平. 宽带微波检波器的研制[J]. 上海航天, 1995 (2): 17-21.

作者简介

丁武伟,硕士,研究员,主要研究方向为微波毫米波收发技术及雷达导引技术等。

E-mail:dingwuwei@163.com

(上接第 44 页)

参考文献

- [1] 徐伟. 高速通信电路系统背板过孔影响因素的研究[J]. 电子科学, 2010(19): 10-12.
- [2] 倪芸,姚晓东. 高速并行总线信号完整性分析设计[J]. 电子测量技术, 2013, 36(4): 106-110.
- [3] 赵玲宝,陈清华. 差分过孔的高频特性仿真分析[J]. 电讯技术, 2014, 54(4): 518-523.
- [4] 郝慈怀,颜学龙. 高速互联中信号完整性测试单元分析[J]. 国外电子测量技术, 2010, 29(5): 38-42.
- [5] 彭文均. HFSS 和 CST 应用于过孔模型的协同仿真研究[J]. 舰船电子工程, 2012, 32(4): 90-92.
- [6] 王红飞,陈蓓. 过孔多余短柱对信号完整性的影响[J]. 印制电路信息, 2013(4): 40-43.
- [7] WU B, LEUNG T. Modeling multiple vias with arbitrary shape of antipads and pads in high speed interconnect circuits [J]. MiroWave and Wireless Components Letters,2009(19): 12-14.
- [8] 蔡国发,章杰,林培杰. 差分对信号完整性分析[J]. 电子测量技术, 2012, 35(1): 38-41.
- [9] 丁同浩,李玉山. 传输线耦合下的差分对共模特性分析[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(7): 1485-1492.
- [10] CAO Y Z, ZHANG Q J. Neural network techniques for fast parametric modeling of vias on multilayered circuit packages [C]. IEEE Electrical Design of Advanced Packaging & Systems Symposium.

Singapore, 2010(10): 1-4.

- [11] 莫剑冬,谢永超,王建甫. 过孔特性阻抗分析及其对信号质量的影响[J]. 机电元件, 2015, 35(2): 32-36.
- [12] 余凯,胡新星,刘丰. 高速信号过孔对信号影响素研究[J]. 印制电路信息, 2014(6): 20-22.
- [13] 窦建华,徐兰天,杨学志. 测量匹配网络 S 参数的转换模型[J]. 电子测量与仪器学报, 2011, 25(2): 191-197.
- [14] 赵志超. 高速差分传输线模型的分析与设计[D]. 西安:西安电子科技大学, 2012: 31-32.
- [15] 李轶敏,顾长青. 多层印制板的高速过孔仿真分析[J]. 仪器仪表用户, 2009, 16(2): 105-106.
- [16] 侯莹莹,关丹丹. 高速 PCB 中的过孔设计研究[J]. 电子与封装, 2009, 9(8): 20-23.

作者简介

麻勤勤,1989 年出生,硕士研究生,主要研究方向为信号完整性,雷达电磁兼容技术。

E-mail: zjl_pursue@163.com

石和荣,1965 年出生,研究员,高级工程师,主要研究方向为雷达信号处理平台设计。

孟宏峰,1990 年出生,硕士研究生,主要研究方向为雷达数据处理。