

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0109- 06

辐射式雷达目标模拟器射频前端设计与集成*

赵 菲, 王生水, 柴舜连, 刘海涛, 毛钧杰
(国防科技大学 电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 完成了辐射式雷达目标射频模拟器射频前端的设计与系统集成, 该模拟器工作于 $L/S/X$ 三个频段, 支持连续波和脉冲工作体制, 具有高精度的多目标生成能力。射频前端的插件结构设计保证了射频前端的电磁兼容性能和功能可扩展性。其测试结果均优于指标要求, 并支持模拟器系统成功完成了实际雷达的目标模拟实验, 验证了模拟器的系统性能。

关键词: 雷达模拟器; 接收机; 发射机; 频率综合器; 数字射频存储(DRFM)

中图分类号: TN957 **文献标识码:** A

Design and Integration of the Front End RF for the Radiated Radar Target Simulator

ZHAO Fei, WANG Sheng-shui, CHAI Shun-lian, LIU Hai-tao, MAO Jun-jie

(College of Electronic Science and Engineering, National Univ. of Defense Technology Changsha 410073, China)

Abstract: The front end RF for radiated radar target simulator was designed and integrated in this paper. This simulator was operated on the $L/S/X$ three bands, and it supported the CW and pulse operation. It generated multi-targets in high precision. The plug module structure design improved the EMC and the extension performance of the RF front end. The measured results of the system are better than the target. Furthermore, this RF front end supports the radar simulator finish the target simulating for the real radar successfully, which verifies the performance of this radar simulator.

Key words: radar simulator; receiver; transmitter; frequency synthesizer; DRFM

雷达信号模拟器是模拟技术与雷达技术相结合的产物。它通过模拟雷达回波信号来考核被试雷达的技战术指标, 并辅助检验雷达的威力和精度^[1]。雷达模拟器根据信号注入方式的不同可分为: 直接注入式模拟器和辐射(注入)式模拟器, 信号注入点越靠前, 模拟越复杂, 越接近于现实^[1]。国外对该领域的研究已有了大量的报导: 美国 KOR Electronics 公司研制了数字化雷达环境模拟器(Digital Radar Environment Simulator), HP 公司生产了基于并行 FASS(Frequency Agile Signal Simulator) 的 X 波段雷达动目标信号模拟器。国内从 20 世纪 90 年代开始相继出现有关雷达信号模拟器的研究报告: 北航和航天部 601 所于 1994 年研制了一种通用型 PD 雷达目标模拟器; 中科大电子工程系于 2000 年研制了毫米波目标模拟器^[2]。在过去的 10 年里我国已经在雷达信号模拟的理论研究、设计实现等方面取得了一些令人瞩目的成果。但从总体来看, 与国际先进水平相比, 在雷达信号模拟的全面性、系统的通用性、可扩充性、兼容性以及产品化等方面还有一定的差距。

本文研制的辐射式雷达目标射频模拟器射频前端覆盖 $L/S/X$ 三个工作频段, 提高了雷达测试的通用性; 多目标模拟精度高, 最大程度还原了模拟目标完整性和真实性; 各频段对应的射频前端采用插件形式, 改善了系统的灵活性及可扩充性。

1 射频系统设计

1.1 模拟器系统结构

该模拟器采用数字射频存储(Data Radio Frequency Memory, DRFM) 方案实现。主要由控制计算机、接

* 收稿日期: 2010- 02- 05

作者简介: 赵菲(1983-), 男, 博士生。

收机、发射机、全波段频率综合器、收发天线、DRFM 单元组成,如图 1 所示。

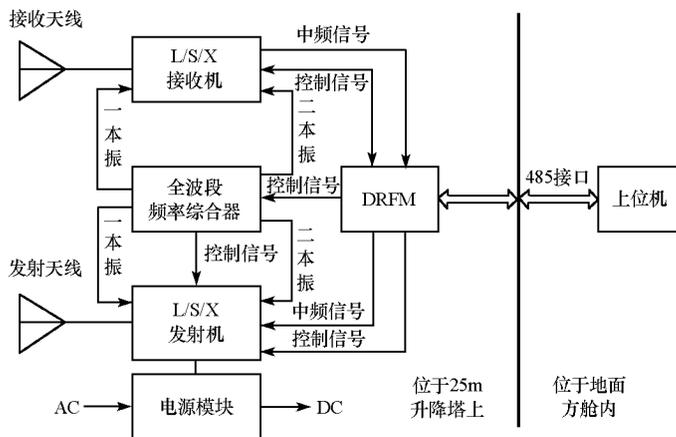


图 1 辐射式雷达目标模拟器系统框图

Fig. 1 Radiated radar target simulator system block diagram

被测雷达辐射的射频信号经过接收天线送到接收机,接收机完成射频信号的放大,通过下变频将射频信号转化为中频信号提供给 DRFM;DRFM 完成中频信号的采集、存储,并根据要求生成所需目标和地杂波信号,调制在数字中频信号上,通过数模转换输出模拟中频信号送给发射机;发射机通过上变频将中频信号转换为射频信号,功率放大后通过发射天线辐射出去,照射被测雷达。为了保证模拟器发射信号的频率与接收信号频率一致,需要高稳定度的频率合成器,为发射机和接收机提供上变频和下变频所需的本振信号。为实现模拟器上述功能,要求模拟器射频前端性能指标如下:

- (1) 信号波形: 脉冲调制信号、脉冲压缩信号、连续波信号;
- (2) 射频工作频率: L 波段带宽 200MHz, S 波段带宽 1.4GHz, X 波段带宽 2.2GHz;
- (3) 中频带宽: (40 ± 6) MHz;
- (4) 脉冲重频范围: 30~10 000Hz; 脉冲宽度: 0.3~300 μ s;
- (5) 接收机输入信号动态范围: 60dB; 发射机输出信号动态范围: 80dB;
- (6) 功能指标: 模拟目标距离: 240m~360km; 距离精度: ≤ 10 m;
- (7) 模拟目标速度: -2000~2000m/s; 速度精度: ≤ 0.6 m/s。

1.2 收发分系统设计

接收机分系统由分别工作于 L、S、X 波段的三部接收插件组成,每部插件采用相同的功能模块划分,每个插件均由宽带射频模块、射频下变频模块和中频下变频模块构成,如图 2 所示。其功能是接收雷达发射的 L、S 或 X 频段宽带射频信号,经滤波、增益控制和放大后分为两路,一路经对数检波放大器检出雷达射频脉冲,并与检波电平信号进行比较,生成视频检波信号,作为 DRFM 的同步信号;另一路转换为中频信号,经低通滤波后送给 DRFM 处理。

发射机同样由分别工作于三个波段、功能模块划分相似的三部发射插件组成。每个插件均由中频上变频模块、宽带射频上变频模块和宽带功率放大模块构成,如图 3 所示。由于发射机发射波形调制方式及脉冲频率多样,因此发射机系统采用基于 MMIC 固态电路的主振多级放大式设计方案^[4-9]。其负责将 DRFM 输出的信号经混频、放大和幅度控制,形成最终的 L/S/X 频段宽带射频信号,经发射天线辐射到空间。

2 关键技术

辐射式多目标雷达模拟器射频前端,作为整个模拟器系统的关键子系统,要求其系统产生信号频谱纯净,以保证生成良好的模拟目标信号质量;要求信号稳定度高,以便准确反演被测雷达的性能参数;要求具有大的动态范围,以支持 DRFM 控制模拟目标信号幅度调节;最后要求整机具有较高的集成化程度,以便于户外架设操作。针对该系统上述要求,研究了以下关键技术。

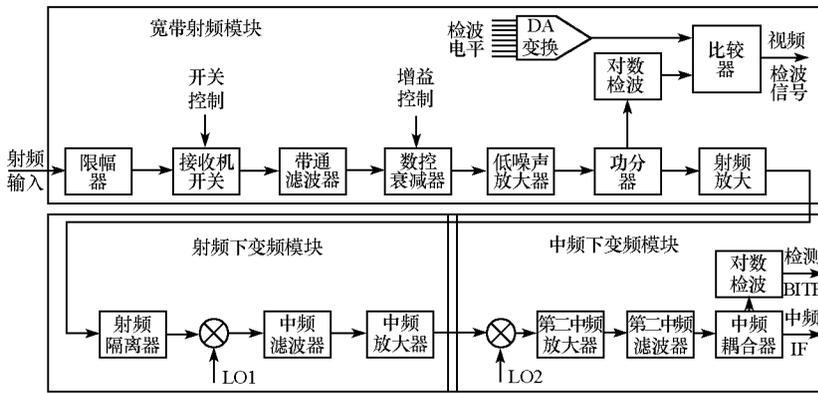


图2 模拟器接收机系统框图

Fig. 2 Simulator receiver system block diagram

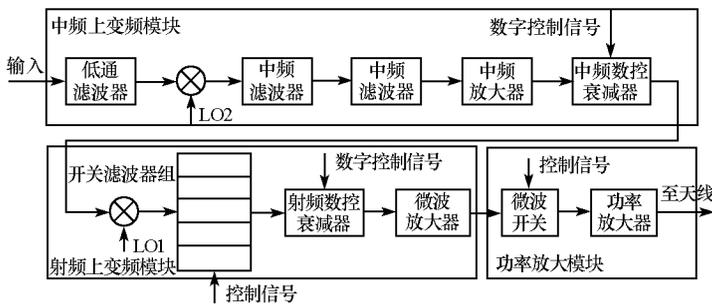


图3 模拟器发射机系统框图

Fig. 3 Simulator transmitter system block diagram

2.1 宽带二次变频技术

射频模拟器射频前端采用了二次变频技术^[6]:即接收机根据L/S/X工作频段和具体工作频率,控制频综选择合适的第一本振频率LO1,与射频信号进行下变频,得到统一的第一中频信号570MHz,保证了三个频段中频模块一致性,降低了研发的难度,节约了研发成本。第一中频信号与频综提供的第二本振LO2(530MHz)混频、滤波和放大后得到中心频率为40MHz、带宽为12MHz的第二中频信号;发射机与接收机相对应,将来自DRFM的中频信号经低通滤波后与二本振LO2混频、滤波后得到统一第一中频信号570MHz。与LO1经宽带射频上变频后得到所需射频信号。对于S/X波段发射机,由于工作频带很宽,S波段达到1.4GHz,X波段达到2.2GHz,因此混频后产生的本振泄漏和谐波必然位于射频信号带宽内,单一宽带滤波器无法将其滤除。为此采用开关滤波器组将宽带射频信道划分为多个子信道,在各个子信道里进行干扰滤波。S波段开关滤波器组由4路滤波通道组成,X波段开关滤波器组由6路滤波通道组成。

2.2 高稳定度宽带频率综合技术

频率综合器用来产生接收、发射射频通道所需的本振信号和中频参考信号。它由频率参考时钟模块、二本振模块、L/S波段频率合成模块、X波段频率合成模块等组成。

频率综合器采用混合合成方式实现。L/S波段频率合成模块采用双锁相环方式实现,如图4所示。细锁相环实现2.0MHz细频率步进,粗锁相环产生1.4~2.8GHz粗频率步进信号,为细锁相环混频器提供本振,降低了细锁相环的分频比,从而降低了L/S波段的相位噪声。X波段频率合成模块通过倍频和滤波技术产生11GHz和12GHz信号,通过开关滤波器组进行切换,与来自L/S波段频率合成模块产生的1.73~3.13GHz信号进行混频,得到X波段的7.93~10.13GHz信号。由于采用了倍频、混频和滤波技术,大大降低了X波段的相噪。其L/S波段输出频率相噪优于 $-102\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$;X波段优于 $-102\text{dBc}/\text{Hz}@1\text{kHz}$;杂波抑制优于65dBc;谐波抑制优于55dBc。

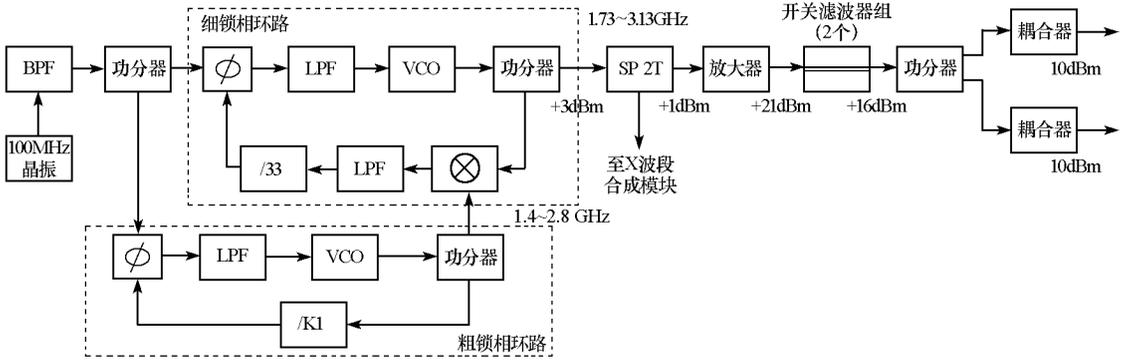


图4 I/S波段频率综合器系统框图

Fig. 4 I/S band frequency synthesizer system block diagram

2.3 大动态数控衰减技术

采用大动态高精度数控衰减措施, 保证接收机增益动态范围大于 60dB, 发射机发射功率动态范围超过 80dB。数控衰减单元选择高精度 6bit 数控衰减芯片, 单片衰减步进 0.5dB, 最大衰减 31.5dB。系统大的动态范围要求大的衰减控制范围, 为此采用多片数控衰减单元级联方式: 接收机在射频段采用 2 级衰减单元级联的方式, 硬件上保证 6 位衰减范围 63dB、步进 1dB 的衰减控制功能; 发射机在中频使用 1 级衰减单元, 在射频级联 2 级衰减单元, 硬件上保证 12 位衰减范围 94.5dB、步进 0.5dB 的衰减控制。

2.4 数字射频存储转发技术

DRFM 单元是该模拟器的核心, 它利用软件无线电技术完成对雷达中频信号的存储、重构, 是产生相参的各种目标运动回波和杂波的基础^[7-10]。DRFM 由 A/D 采样、数字下变频(DDC)、数据存储器、信号处理器、数字上变频(DUC)、D/A 变换以及输入/输出接口电路组成, 如图 5 所示。

模拟输入信号通过 A/D 转换成数字信号, 完成中频信号数字化过程。A/D 转换器采用 AD 公司的 14 位模数转换芯片 AD9254, 采样率 150MSPS。数字下变频(DDC)单元实现数字中频信号的正交下变频、数据抽取、低通滤波, 输出 I/Q 正交数字信号。DDC 采用 TI 公司的 GC5016, 其最高输入数据率可达 160MSPS。数字上变频(DUC)单元实现 I/Q 正交数字基带信号的低通滤波、数据插值、正交上变频到数字中频信号。D/A 转换器将输入的中频数字信号转换为模拟中频信号, 作为发射机的输入。高性能 FPGA 作为信号处理器, 提供乘法器和移位寄存器, 对目标信号、二次反射信号进行多普勒频移、距离延迟和幅度的调制, 对杂波进行功率谱和距离延迟调制。

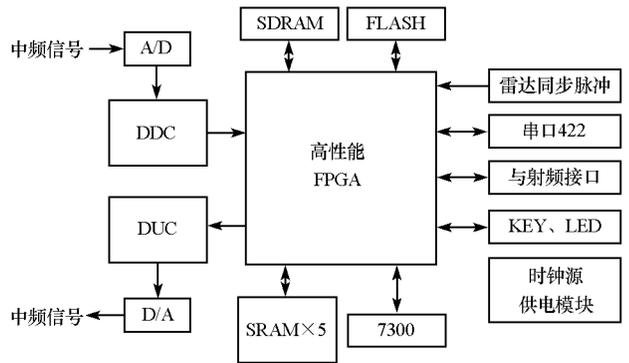


图5 DRFM框图

Fig. 5 DRFM principle block diagram

3 结构集成及测试

3.1 结构设计与集成

辐射式雷达多目标模拟器射频前端由 1 部机箱、6 部收发插件、1 部频综插件和 1 部 DRFM 插件组成, 其中收发插件为 I/S/X 波段更换插件, 频综插件和 DRFM 插件为共用插件, 此结构设计既使射频前端结构紧凑, 又使其具备了较好的功能可扩充性和电磁兼容要求。插件前面板安装射频输入或输出接口、电源指示灯、故障指示灯和拉手; 后面板安装有低频和射频混合型拔插连接器, 与机箱接口板相连。

模拟器机箱采用箱笼式结构, 如图 6 所示。机箱内共有 6 个插槽, 包括发射机插槽 1 个、接收机插槽 1 个、频率综合器插槽 1 个、DRFM 插槽 2 个和备用插槽 1 个, 分别安装发射机插件、接收机插件、频综

插件和DRFM插件。其中收发插件可在L/S/X三个波段之间互换,频综插件和DRFM插件为共用插件,此结构既使射频前端结构紧凑,又具备了较好的可扩充性。



图 6(a) 模拟器射频前端机箱正面

Fig. 6(a) Front view of simulator RF front end



图 6(b) 模拟器射频前端机箱反面

Fig. 6(b) Back view of simulator RF front end

3.2 整机测试

3.2.1 收发插件性能测试

L/S/X波段接收发射插件均支持脉冲和连续波工作方式。接收机经测试达到如下性能:(1)输入信号幅度: $-30 \sim +30$ dBm; (2)输出功率: 0 dBm; (3)输出频谱纯净,无谐波和杂散;(4)输出带宽达到 12 MHz,带内波动小于 1 dB,如图 7(a)。发射机经测试达到如下性能:(1)功率衰减范围: 大于 80 dB; (2)最大输出功率: 30 dBm; (3)发射机输出频谱纯净,无谐波和杂散;(4)发射机输出带宽达到 12 MHz,带内波动小于 1 dB,如图 7(b)。

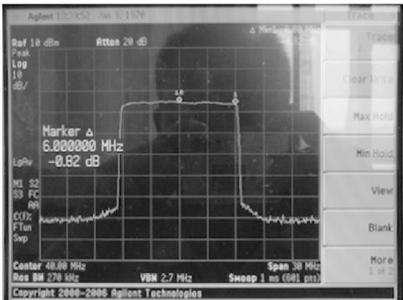


图 7(a) 接收机中频带宽频谱图

Fig. 7(a) IF band width of receiver

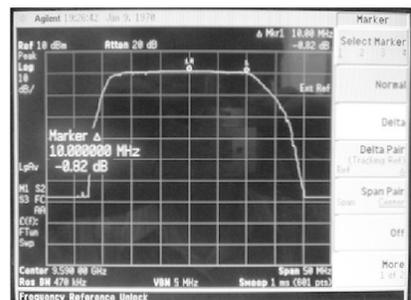


图 7(b) X波段发射机射频带宽频谱

Fig. 7(b) RF band width of X band transmitter

3.2.2 目标速度范围与精度测试

由微波信号源产生连续波信号,通过频谱仪测试模拟目标的多普勒频移,测得结果如表 1 所示,目标速度范围和精度均满足指标要求。

表 1 目标速度范围与精度测试结果

Tab. 1 Measure results of the range and precision for target velocity

设定目标速度(m/s)	测得多普勒频移(Hz)	测得目标速度(m/s)	速度误差(m/s)
10	86(载频 1.3GHz)	9.923	0.077
2000	17 333	1999.962	0.038
-2000	-17 334	-2000.077	0.077

3.2.3 目标距离范围与精度测试

由微波信号源产生脉冲信号,由检波器和示波器测量模拟器收发脉冲时延,扣除系统固定时延后即可得到所模拟目标的距离,如表 2 所示,距离范围和精度均满足指标要求。

表2 目标距离范围与精度测试结果

Tab. 2 Measure results of the range and precision for target distance

设定距离(km)	目标时延(μs)	模拟距离(km)	距离误差(m)
0.8	5.600	0.8013	1.3
135	900.272	135.0000	0.000
360	2400.27	359.9997	-0.300

4 系统试验

辐射式多目标雷达模拟器射频前端支持整个系统成功完成了外场实验。工作时,模拟器射频前端机箱架设于25m的升降塔上,通过电缆与滑轨上的收发天线相连,如图8(a)、8(b)所示。被测雷达选用某基地国产某型号连续波测速雷达和国外X波段某型号大功率脉冲雷达,分别针对辐射式模拟器的单一目标速度模拟和多批次目标模拟进行了功能测试。连续波测速雷达距离模拟器塔架约140m,模拟器模拟目标均匀径向速度为300m/s, 1000m/s, 2000m/s,测速雷达显示数据为:299.8m/s, 999.3m/s, 1999.6m/s,速度误差优于0.7%。脉冲雷达距离模拟器塔架约240m,模拟器产生9批速度为1000m/s的动目标,在被测雷达显示屏上得到图像如图8(c)所示。通过外场实际装备雷达试验,验证了该模拟器具有良好的整体性能。



图8(a) 模拟器工作状态
Fig. 8(a) Operating simulator



图8(b) 模拟器射频前端
Fig. 8(b) Simulator RF front end

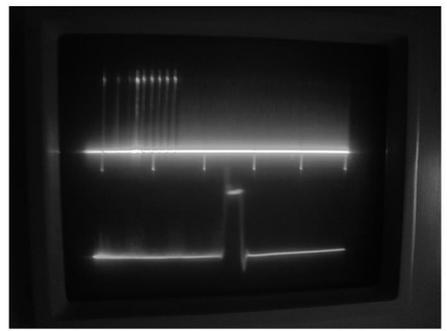


图8(c) 模拟目标在被测雷达上显示
Fig. 8(c) Simulated targets shown on the radar

5 结论

完成了辐射式多目标雷达模拟器射频前端的系统设计和集成。该射频前端采用模块插件形式,实现了I/S/X波段的射频信号收发功能,其工作性能稳定,工作带宽宽,信号控制动态范围大,谐波抑制和抗干扰能力强,结构紧凑,可支持系统完成连续波和脉冲体制多批次目标的径向速度、距离、RCS的精确模拟。射频前端支持整机模拟器成功完成了实际雷达的目标模拟实验,验证了模拟器的系统性能。其可用于外场条件下考核被试雷达目标分辨力和多目标处理能力等战技指标,对于提高雷达在复杂战场环境中的系统工作性能具有重要的军事价值。

参考文献:

- [1] 刘朝军,王伟,邱兆坤,等. 基于DDS的宽带雷达回波信号模拟技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(9): 1498-1499.
- [2] 余云智,程健庆. 基于DSP的雷达中频信号模拟器设计[J]. 计算机仿真, 2007, 24(9): 285-288.
- [3] 王凡. 相控阵雷达目标模拟器射频前端研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2007: 1-3.
- [4] 郑新,李文辉,潘厚忠. 雷达发射机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 2-3.
- [5] 丁鹭飞,耿富录. 雷达原理[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005: 30-31.
- [6] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006: 70-74.
- [7] Herskovitz D. A Sampling of Digital RF Memories[J]. Journal of Electronic Defense, 1998(3): 51-54.
- [8] 马魁勇,于长军,位寅生. 基于FPGA的雷达目标模拟器的设计与实现[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 870-872.
- [9] Pring P, James G E, Hayes D, et al. The Phase Performance of Digital Radio Frequency Memories (DRFMs) [C]// IEE Second International Conference on Advanced A-D and D-A Conversion Techniques and their Applications, Cambridge, England, 1994: 18-23.
- [10] 王展,李双勋,刘海涛,等. 雷达多目标模拟器DRFM单元设计[J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(8): 1616-1619.