

文章编号:1001-2486(2007)02-0047-04

冲激雷达系统及探测实验研究*

李毅,张伟军,张光甫,梁步阁,袁乃昌

(国防科技大学 电子科学与工程学院,湖南长沙 410073)

摘要:自行研制冲激雷达实验系统,其关键技术包括多路相干合成脉冲源、正交解调采样接收机、信息处理机和收发天线阵列等。并用该系统在外场开展了隐身目标探测实验。实验结果表明,冲激雷达有较强的反外形隐身和材料隐身的能力。

关键词:冲激雷达,脉冲源,正交解调,隐身

中图分类号: TN958 **文献标识码:** A

Research on Impulse Radar System and Detecting Experiment

LI Yi, ZHANG Wei-jun, ZHANG Guang-fu, LIANG Bu-ge, YUAN Nai-chang

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

Abstract: The research is based upon a self-developed impulse radar experiment system, whose essential technologies include multiplex correlative pulse combining pulser, quadrature demodulation sampling receiver, signal processing system and pulse radiating and receiving array antennas and so on. The detection experiment of stealthy targets in the outdoor was carried out by the system. Its results indicate that the impulse radar has the powerful capability of anti-shape stealth and anti-material stealth.

Key words: impulse radar; pulser; quadrature demodulation; stealth

超宽谱冲激体制雷达(简称冲激雷达)发射无载波的极窄脉冲信号,利用时间波门进行搜索和跟踪。这种脉冲信号宽度在纳秒或亚纳秒量级,脉冲前沿只有几十皮秒,所以其频谱很宽,低频成分丰富,具有空间分辨率高、穿透能力强、平均功率低、抗干扰能力强等特点^[1-2],探测隐身目标的潜力巨大,是雷达探测隐身目标的一个很有前景的发展方向。

为了研究冲激雷达探测隐身目标方面的应用潜力,我们成功研制了冲激雷达实验系统,包括峰值功率达30MW的多路相干合成纳秒脉冲发射机、正交解调采样接收机、脉冲辐射和接收16元阵列收发天线等子系统,开展了目标外场探测试验,获取了大量实际测试数据。实验初步证实了这种体制的雷达在探测隐身目标方面的优越性。

1 冲激雷达系统关键技术

1.1 多路相干合成纳秒脉冲发射机

经典的火花隙击穿放电方法可以产生较大功率脉冲,目前国外甚至可以做到100GW量级^[3]。但是基于火花隙击穿放电原理,很难将脉冲重频稳定度、波形一致性、重频上限等指标做得很高。因而,我们在设计中采用了全固态微波电路进行设计,利用雪崩三极管的雪崩效应产生纳秒级脉冲源^[4]。由于固态雪崩三极管MARX电路输出的功率有限,对雷达应用而言,当作用距离增加时,要求脉冲源输出更高的峰值功率,就必须考虑多个脉冲源功率相干合成。雪崩晶体管固态源重频上限高达200kHz,频率稳定性和波形稳定性好,可进行同步相干合成。

子源的功率合成可分为两种:电路合成和空间合成^[5]。电路合成,无需附加天馈系统,在体积和成

* 收稿日期 2006-09-23

基金项目:国家863高技术基金资助项目(2005AA8350040)

作者简介:李毅(1977—),男,博士生。

本上具有优势,但将受到合成电路功率容量的限制。空间合成,需附加天馈系统,理论上不受电路器件的功率容量限制,可无限地提高合成功率。

对于电路合成,按照能量守恒原理,利用时域波形合成器等方案在电路上实现脉冲源的相干合成,在每个子源完全相同、完全相干的理想情况下,合成峰值功率将随子源数目按照线性关系增长,合成峰值电压将随子源数目 n 按照 \sqrt{n} 的关系增长。对于空间合成,按照电场叠加原理,利用天线阵列等方案在空间上实现脉冲源的相干合成,在每个子源完全相同、完全相干的理想情况下,合成峰值电压将随子源数目按照线性关系增长,合成峰值功率将随子源数目 n 按照 n^2 的关系增长。

由此可见,阵列空间合成,合成功率将随阵源数目成平方关系增长,比电路合成的线性增长关系更为诱人,但是这是以增加天馈数目为代价的。因此在工程实现中,我们对两种方案进行了综合考虑和优化协调,同时采用电路合成和空间合成的综合合成方式。我们实现了 16×16 路电路-空间合成模块化系统设计,合成峰值电压效率可达到 $90\% \sim 95\%$ 。256 路子源的 16×16 电路-空间综合合成 30MW 全固态高稳定度纳秒脉冲源,已投入试验使用。图 1、图 2 给出了典型的电路合成和空间合成测试结果。

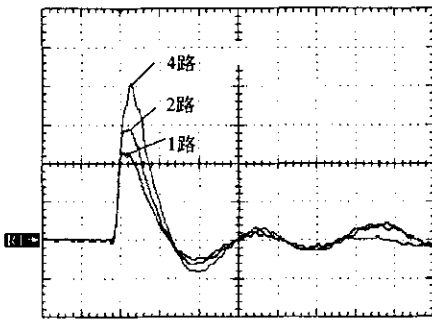


图1 1/2/4 路电路合成

Fig. 1 Synchronization of 1/2/4 channel in circuit

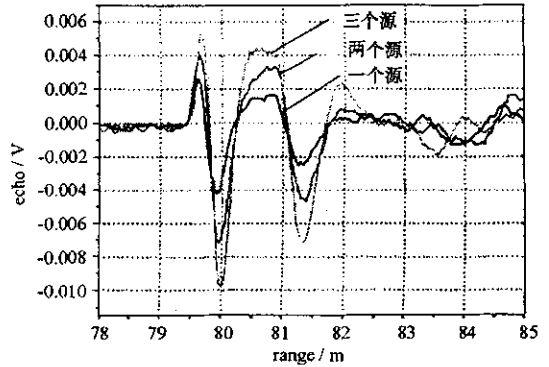


图2 1/2/3 路空间合成

Fig. 2 Synchronization of 1/2/3 channel in space

1.2 冲激雷达正交解调采样接收机^[6]

脉冲源产生的无载波冲激信号工作频率范围为 $200 \sim 800\text{MHz}$,其绝对带宽达到 600MHz ,相对于中心频率 500MHz 的相对带宽为 120% 。接收机应具有超宽带、高灵敏度、高信噪比和实时处理等特性。设计接收机时面临的一个主要问题是信号的瞬时带宽太宽。

对窄带信号而言,微波器件的频率特性可以认为接近理想,这就促使我们采用上变频的方法压缩相对带宽,使宽带信号“窄带化”。使用上变频是现代高性能宽带系统的一个发展方向,它有两个显著优点:一是可以提高镜像抑制度,二是降低了对预选滤波器的要求。基于传统的窄带设计,当信号相对带宽小于 10% 时可视为窄带信号,在这个范围内器件的频率特性比较平坦,可认为与频率无关。然后再进行 IQ 两路解调,下变频至 $0 \sim 300\text{MHz}$ 。这样,系统进行两次变频,先上变频,本振选为 4.7GHz ,信号上变频至 $4.9 \sim 5.5\text{GHz}$,然后 IQ 两路正交解调,本振为 5.2GHz ,下变频为 $0 \sim 300\text{MHz}$ 两路信号。冲激雷达接收机和正交解调方框图如图 3、图 4 所示。

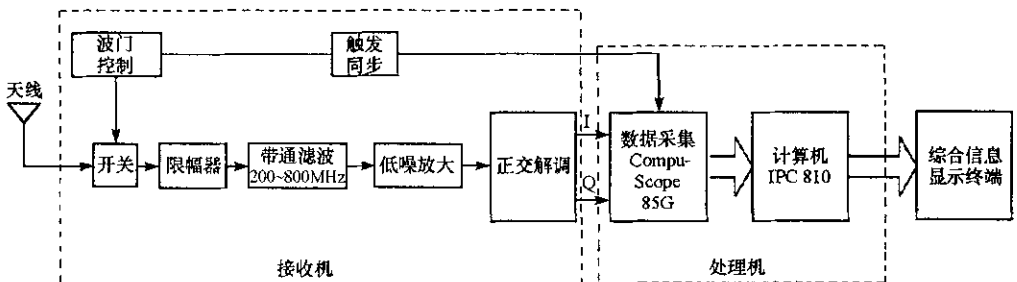


图3 正交解调接收机框图

Fig. 3 Block diagram of quadrature demodulation receiver

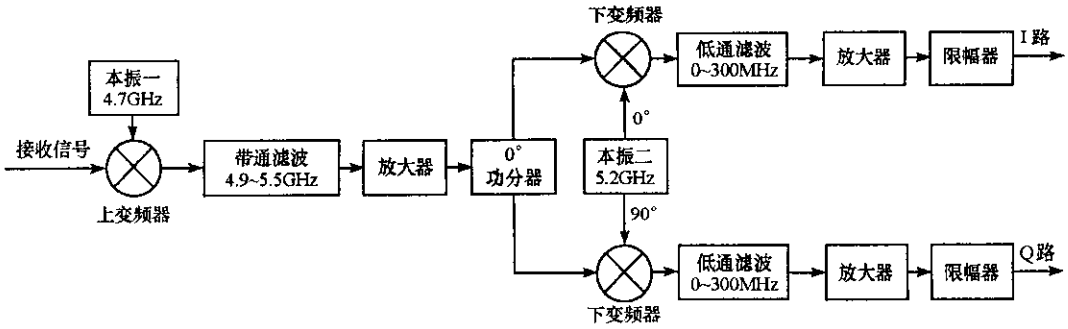


图4 正交解调框图

Fig. 4 Block diagram of quadrature demodulation

1.3 信号采集及处理软件系统

冲激雷达系统软件设计牵涉到硬件调度、数据处理等各个方面,需要完成的任务较为复杂,因此在软件设计中,必须全局考虑。结合软件系统的思想,主要分为如下功能模块进行编写:收发时序控制模块、高速采集模块、数据处理模块、信号检测模块、图形显示模块、数据读写模块。并结合外场实验,对其中信号处理算法、软件操作界面、软件系统结构进行了优化设计,增加了适宜于空中悬浮低速运动目标的搜索、锁定、跟踪、积累、识别检测算法。

1.4 冲激脉冲辐射和接收阵列天线

发射天线为 2×8 TEM 喇叭阵列,接收天线为 2×8 平面印刷阵列天线。矩形 TEM 喇叭体积大,重量重,但增益较高,用来做发射天线。超宽带平面渐变开槽印刷天线是平面型结构,体积小,重量轻,调整方便,用来组成接收天线阵列。图5是单个天线辐射的远场归一化波形,图6是整个接收天线阵列接收一路脉冲信号的波形,其中的角度是指偏离主轴方向的角度,角度增大,波形峰值减小。

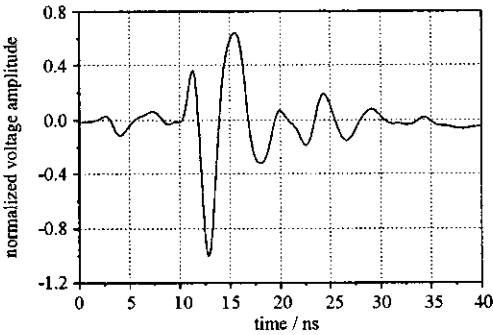


图5 单通道辐射信号的远场波形

Fig. 5 Normalized far-field waveform of radiated signal of single channel

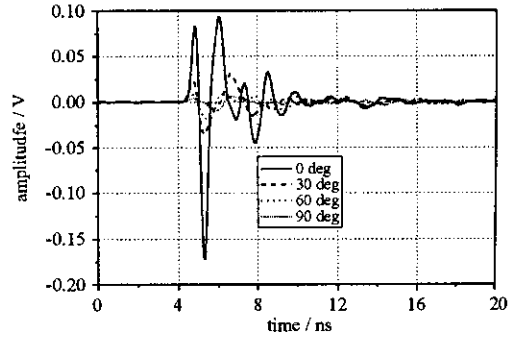


图6 8×2 十六元阵接收脉冲波形

Fig. 6 Receive pulse wave-form of 8×2 sixteen cells array

2 探测实验研究

冲激雷达实验系统由 30MW 多路相干合成纳秒脉冲发射机、超宽带正交解调接收机、收发天线阵列、高速数字采集卡、同步触发 PCI 卡、主控计算机等组成,系统连接如图7所示。外场实验中目标悬吊于远处 100 ~ 400m 低空,收发天线空间间隔 5 ~ 10m,构成单站雷达系统。发射机通过发射天线正对目标发射纳秒级短脉冲,经过目标及地表反射接收天线,接收机进行接收,通过高速数字采集卡进行实时采样。后端信号处理由主控计算机完成。同步触发 PCI 卡对发射机、接收

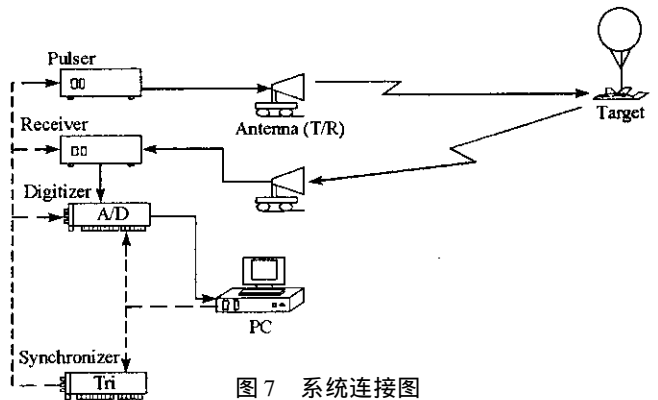


图7 系统连接图

Fig. 7 Block diagram of the system connected

机提供适当的触发及延时信号,使得接收机仅在适当的距离门内进行数据采集和处理,从而滤除收发直接耦合、窗外地表杂波等,对接收机进行高功率保护并提高信噪比。为降低采样频率,接收机采用正交解调方式工作。

为了验证系统的探测隐身目标的能力,探测实验中用了这样一组探测目标:T1、T2、T3。T2、T3具有相同隐身外形,但T3还涂有X波段的吸波材料。T2、T3的RCS在1GHz以下平均在3dBsm。T2的RCS在X波段平均在-15dBsm,T3在10GHz附近的RCS低达-30dBsm,X波段平均约为-20dBsm。T1是一个一般目标,在低频区比T2、T3的RCS高。表1是外场测试的一组数据。表格单元内“隐身目标与普通目标”下的数据命名格式如下:目标径向距离-目标悬吊高度-相干合成脉冲源单个通道功率×工作通道数-目标。

表1 隐目标与普通目标峰值电平和信噪比实验数据比较

Tab. 1 Comparison of peak value voltage and SNR of stealth objects and common objects

隐身目标与普通目标	峰值电平统计值/mV		峰值信杂比统计值/dB	
	I通道	Q通道	I通道	Q通道
1.5km-100m-2MW×8CH-T1	225	248	12.07	11.54
1.5km-100m-2MW×8CH-T2	192	210	10.70	10.62
1.5km-100m-2MW×8CH-T3	166	191	10.50	10.28
2km-100m-2MW×8CH-T2	143	161	9.82	9.82
2.4km-100m-2MW×8CH-T1	104	117	11.31	11.01
2.4km-100m-2MW×8CH-T3	92	108	10.09	10.34

通过分析表1,发现以下规律:

(1) 功率不变,距离增加时,回波幅度减小。显然,如果距离不变,功率增大,回波幅度也将增大。表明增大功率,能增加探测距离。

(2) 对于外形隐身,冲激脉冲信号具有很好的克制潜力。在整个X波段,利用外形隐身手段设计的目标T2的RCS平均约为-15dBsm,但是利用超宽谱脉冲进行探测,其回波峰值幅度以及信杂比均与较强反射的目标T1的数值相差甚弱。明显地,针对X波段雷达特殊设计的隐身外形,对于频谱主要集中于1GHz以下的冲激脉冲失效。

(3) 对于材料隐身,冲激脉冲信号具有很好的克制潜力。在整个X波段,利用外形隐身与吸波材料涂敷手段同时使用的目标T3的RCS平均约为-20dBsm,但是利用冲激脉冲进行探测,其回波峰值幅度以及信杂比均与仅进行外形隐身的目标T2的数值相差甚弱,甚至与目标T1也无明显差别。明显地,针对X波段雷达特殊设计的隐身材料,对于频谱主要集中于1GHz以下的冲激脉冲也失效。

3 结束语

冲激雷达实验系统主要包括超宽谱多路相干合成脉冲发射机、超宽谱正交解调采样接收机、信息处理机和超宽谱收发阵列天线。外场实验主要研究了冲激雷达反隐身能力。结果表明,冲激雷达对外形隐身和材料隐身等常用雷达隐身手段有较强的克制能力,以致有人称之为“真正的反隐身雷达”。当然这还只是一个实验系统,要得到实用的冲激雷达系统,必须增加发射机功率,改善接收机结构和目标检测及数据处理算法,研制更高增益的天线和更大的收发阵列天线等,这都需要进一步的研究。

参考文献:

- [1] Taylor J D. Ultra-wideband Radar Technology[M]. London: CRC Press, 2001.
- [2] Heyman E, Mandelbaum B, Shiloh J. Ultra-wideband Short-pulse Electromagnetics 4[M]. Boston: Kluwer Academic/Plenum Publishers, 1999.
- [3] Gubanov V P, Korovin S D, Pegel I V, et al. Compact 1000 PPS High-voltage Nanosecond Pulse Generator[J]. IEEE Trans. on Plasma Sci., 1997, 25(2): 258-265.
- [4] 梁步阁, 张光甫, 朱畅, 等. 超宽谱雷达用 MW 级全固态高重频纳秒脉冲源的多路相干合成实现技术研究[C]//中国第一届超宽谱短脉冲电磁学会议, 江苏, 2005.
- [5] 梁步阁, 朱畅, 张光甫, 等. 高功率全固态微波纳秒级脉冲源的设计与应用[J]. 国防科技大学学报, 2004, 26(6): 38-43.
- [6] 黎向阳. UWB-SAR 接收技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2000.

