

X 波段瞬态极化雷达射频前端关键技术研究

赵 菲, 叶良丰, 肖 科, 柴舜连, 毛钧杰

(国防科学技术大学电子科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘 要: 瞬态极化新体制雷达, 通过单脉冲获得瞬时极化散射矩阵来提取目标特征信息, 提高了雷达系统在复杂电磁环境中的探测、抗干扰和反隐身等方面能力。基于该雷达工作原理, 提出“同时正交双极化”的射频前端设计方案, 完成了国内首部瞬态极化雷达试验系统射频前端的研发。采用正交双通道和幅相一致性技术保证了雷达实现瞬态极化的功能, 采用滤波技术保证了射频系统的频谱纯度; 采用低噪声放大技术有效降低了接收机噪声系数; 采用直接频率综合技术提高了射频系统频率稳定性和相参性能; 结构集成一体化设计保证了射频收发前端的电磁兼容性能和便携性。射频前端测试结果均优于指标要求, 并支持试验系统初步解决了目标极化散射特征提取与识别领域的基础性和共性难题。

关键词: 瞬态极化雷达; 极化散射矩阵; 射频前端; 雷达接收机; 雷达发射机; 幅相一致性

中图分类号: TN 957

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1001-506X.2010.06.008

Key technologies of X-band front end RF for instantaneous polarization radar

ZHAO Fei, YE Liang-feng, XIAO Ke, CHAI Shun-lian, MAO Jun-jie

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

Abstract: The instantaneous polarization new system radar extracts the characteristic information of the target by achieving the polarization scattering matrix instantaneously, and improves the ability of detecting, anti-interference and anti-stealth in complex electromagnetic environment. Based on the operation principle of this radar, the RF front end design scheme “simultaneous orthogonal double polarization” is proposed, and the first RF front for instantaneous polarization radar experiment system is manufactured in China. The technology of amplitude-phase coherence for orthogonal channels is adopted to satisfy the function of the system. The low-noise amplify technology is adopted to decrease the noise coefficient of the receiver efficiently. The filter technology improves the pureness of frequency spectrum. The technology of indirect frequency synthesis improves the frequency stabilization and the coherent performance of the system. The structure integration design improves the EMC and the portable performance of the RF front end. The measured results of the system are better than the predetermined targets. And this RF front end helps the experiment system resolve extracting the polarization scattering characteristic of the targets and the basic difficult problem in identifying field.

Keywords: instantaneous polarization radar; polarization scattering matrix; front end RF; radar receiver; radar transmitter; magnitude-phase coherence

0 引 言

自 1946 年 Sinclair 提出目标极化散射矩阵概念^[1]以来, 雷达极化技术已经历了六十余年的研究。长期以来一直是 SAR 成像、极化滤波、极化增强、极化抗干扰、地理遥感、雷达目标特征提取与识别等多个领域成为备受关注的前沿问题^[2-6], 极化测量雷达可分为分时极化测量体制和瞬时极化

测量体制。分时极化测量雷达发射机只有一个射频放大支路, 需要通过两个极化正交信号脉冲回波才可得到目标的散射矩阵^[4,7], 所以它存在着诸如交叉极化干扰、散射矩阵去相关效应^[8]等一些体制上的缺陷。瞬态极化雷达由发射机同时发射两路正交极化电磁波脉冲, 再由接收机的两路通道同时接收目标极化回波信号, 如此经过一个脉冲的收发处理就能得到完整的目标极化散射矩阵, 完成目标特征识别。

国外比较典型的极化雷达系统有:美国的 Millstone Hill 雷达、SIR-C/X 多波段/多极化合成孔径雷达、弹道导弹靶场测量雷达 AN/MPS-36、Ka 波段机载毫米波极化 SAR 系统等;日本的星载合成孔径相控阵雷达 PALSAR、加拿大的 RADARSAT-2 合成孔径雷达等。国防科学技术大学在国内首次提出了“瞬态极化”理论体系^[5],并取得了一系列重要的基础性研究成果。本文研制的瞬态极化雷达射频前端,是国内首套新体制瞬态极化雷达试验射频系统,包括了接收机分系统和发射机分系统,该子系统为用于瞬态极化测量的国际上首部瞬态极化雷达实验系统提供了有力的硬件支撑,为验证“瞬态极化”理论体系的正确性和实用性提供了保障。

1 系统设计

1.1 系统指标

接收机性能指标:

- (1) 射频中心频率:10.48 GHz;
- (2) 中频带宽:40 MHz;
- (3) 噪声系数: ≤ 4 dB;
- (4) 动态范围: ≥ 50 dB;

(5) 通道一致性要求:① 幅度误差不超过 1.0 dB;② 相位误差不超过 5°;

(6) 能够同时接收垂直、水平正交极化电磁波。

发射机性能指标:

- (1) 工作频率:10.48 GHz;
- (2) 中频带宽:40 MHz;
- (3) 支持简单脉冲、线性调频脉冲等多种调制方式;
- (4) 发射机功率: ≥ 37 dBm;
- (5) 通道一致性要求:① 幅度误差不超过 1.0 dB;② 相位误差不超过 5°;
- (6) 能够同时发射垂直、水平正交极化电磁波。

1.2 接收机分系统设计

为了同时接收正交极化电磁波,接收分系统采用同时工作的两个独立的通道,分别为水平极化 H 通道和垂直极化 V 通道。瞬态极化雷达接收分系统框图如图 1 所示。该接收机系统主要功能模块有:微波低噪声放大模块、预选滤波器、射频下变频模块、中频下变频模块和频率综合器模块。所有微波部件全部采用混合微波集成电路设计,因此为全固态微波电路。

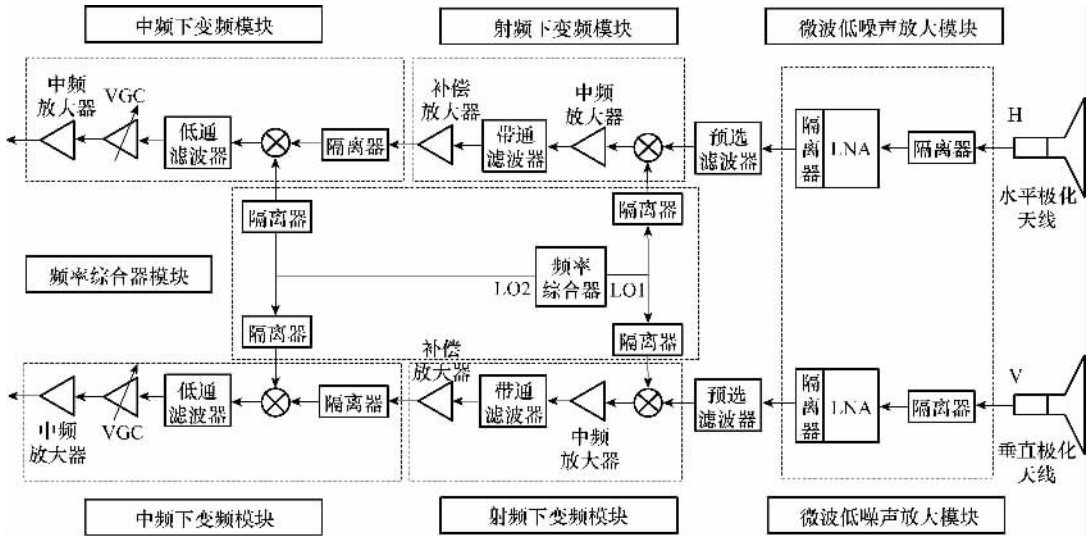


图 1 瞬态极化雷达接收机系统

1.3 发射机分系统设计

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主振多级放大式设计。为了能够同时发射正交极化电磁波,发射分系统采用两个独立的通道同时工作,分别为水平极化 H 通道和垂直极化 V 通道。瞬态极化雷达发射机分系统框图如图 2 所示。考虑到接收机器件利用的可重复性,本发射机系统与接收机二次下变频相对应,采用相同中频的二次上变频体制。发射机分系统主要包括脉冲波形发生器模块、中频上变频模块、射频上变频器模块、功率放大模块和频率综合器。其所有微波部件全部采用混合微波集成电路

设计,为全固态微波电路。

2 关键技术研究

瞬态极化雷达作为“瞬态极化”理论的实验验证系统,要求其射频前端具备同时发射、接收两路正交极化、调制的电磁波的功能,保证两路信号具有可靠的幅相一致性,以及良好的稳定度及弱相关性,以期生成准确的目标散射矩阵;同时要求系统抗干扰能力强以保证在复杂电磁环境中具有良好的信号质量;最后要求射频及天线系统集成化程度高,以便于携带进行户外实验操作。针对该系统上述要求,研究了以下关键技术:

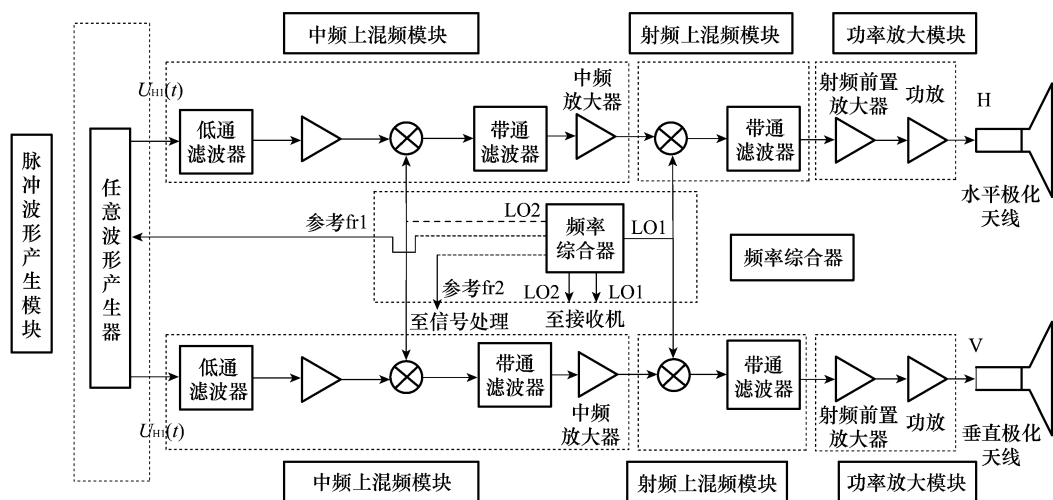


图 2 瞬态极化雷达发射机系统

2.1 “同时双极化”及幅相一致性技术

为了实现雷达“同时正交双极化”功能,接收机由图 1 可知,通过水平极化天线和垂直极化天线接收到的两路信号首先通过低噪声放大,微波预选滤波,然后与频率综合其产生的高、低本振信号进行两次射频下变频,得到二中频信号,再通过数模转换成数字信号送后端处理,进行目标极化散射矩阵参数提取或进行极化目标检测或极化目标识别。发射机如图 2 所示,波形发生器同时产生两路正交的调制信号,分别送入发射分系统水平极化 H 通道和垂直极化 V 通道。两路信号经两级上变频后产生 X 波段的已调微波信号,再通过微波功放链路放大达到所需功率,同时馈入水平极化天线和垂直极化天线。这样通过双通道和双极化天线,实现同时接收和发射两路极化正交(水平极化和垂直极化),且调制正交信号的目的。波形发生器的参考时钟信号和两级本振信号均由频率综合器产生,由此保障了两路通道的相参特性。

为了满足射频垂直极化与水平极化通道的幅相一致性要求,接收机和发射机各自的水平极化通道和垂直极化通道完全相同,从体制上建立了幅相一致的基础;双正交通道模块研发采用同批器件、板材和相同的工艺,其所对应模块之间的通路电缆和本振电缆均采用等长的刚性电缆连接,在理论上最大程度的保证了一致性的要求;最后在各个通道的中频模块里设置了压控衰减器以实现对通道信号幅度的方便连续可调,在微波模块中设置了调相器,以实现对信号相位的连续调节,从而在硬件上实现了稳定可靠、高一致性的通道幅相特征。

2.2 二次变频与滤波技术

从实现系统强抗干扰能力出发,为了使接收机信号带宽内无信号镜频干扰,须选取高的中频,同时又为了保证接收机后 D/A 采样和低通滤波的实现,要求接收机输出的信号频率不宜太高。为了解决这个矛盾,瞬态极化雷达前端接收机系统采用了二次变频方案:工作频率为 10.46 GHz~10.50 GHz,方案选择一本振频率为 10 GHz,二本振频率为 410 MHz,一中频为 480 MHz,二中频为 70 MHz,带宽为 40 MHz。如此

既要考虑本振和信号通道寄生频率的影响,还要考虑一本振和二本振交调在信号通道内产生的交调干扰^[11]。

采用带外衰减大,带内差损小的矩形波导腔体带通滤波器,作为预选滤波器。研发完成的波导腔体滤波器通带特性如图 3(a)所示,其中心频率为 10.48 GHz;1 dB 带宽 45 MHz;30 dB 带宽 200 MHz;通带插入损耗: $L \leq 2.0$ dB。能够对位于 9.50 GHz~9.54 GHz 频带内的一次镜频信号达到优于 50 dB 的抑制度,对位于 10.32 GHz~10.36 GHz、9.64 GHz~9.68 GHz 频带的二次镜频信号达到优于 30 dB 的抑制度。这些镜频信号经过本振一次混频或二次混频后均可进入二中频信道,形成干扰。

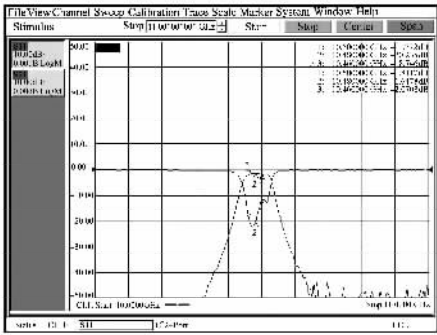
一中频滤波器作为抑制干扰的关键器件,考虑到最近干扰频段距离一中频信道只有 15 MHz,将选取频率响应平坦、Q 值高、矩形系数好的声表面波带通滤波器。选用的声表面波滤波器通带性能如图 3(b)所示,其中心频率 480 MHz;1 dB 带宽 39 MHz;40 dB 带宽 65 MHz。能够对位于 0.435 GHz~0.455 GHz、0.427 GHz~0.44 GHz 频带内的干扰信号达到优于 20 dB 的抑制,上述信号与二本振的二次、三次差频后成为干扰信号进入二中频信道;能对位于 0.73 GHz~0.77 GHz 频带内的一中频镜频信号和 10 GHz 的一本振信号产生优于 50 dB 的抑制。

二中频滤波器重点滤除第二次下变频产生的二次谐波信号(100 GHz~180 MHz)和三次谐波信号(150 GHz~270 MHz),还有 410 MHz 的二本振泄露信号。采用集成 LC 低通滤波器。设计中使用双平衡混频器,对偶次谐波进行抑制,进一步提高了滤波效果。类似于接收机,发射机采用相同的滤波组件,完成对高次谐波的滤除。

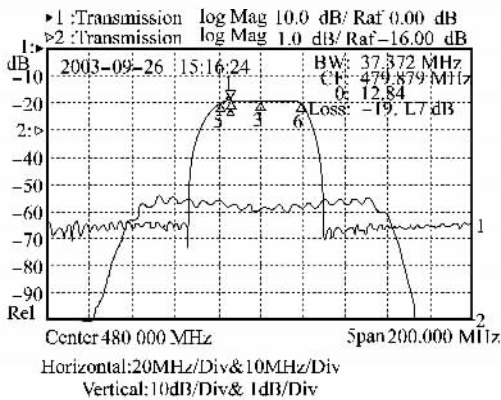
2.3 高增益低噪声放大技术

低噪声放大器在所有接收机系统里都处于前端位置,运用低噪声系数的低噪声放大器,是提高接收机灵敏度的一种关键手段^[9]。近年来,一种极低噪声系数的微波器件——高电子迁移率晶体管(HEMT)已广泛应用于雷达、卫星通信系统中,以提高系统的灵敏度^[10]。现在利用微波电路 CAD 设计软件来设计电路,可以避免复杂的计算过程^[11],大大缩减

研发周期。在电路设计中,采用低噪声 HEMT 管的 S 参数以及噪声参数来进行低噪声放大器的设计。



(a) 预选滤波器通带特性



(b) 中频带通滤波器通带特性

图 3 滤波器通带特性

设计采用三级放大管级联的措施提高放大增益,使用 Eudyna 公司的 FHX13LG HEMT 管作为低噪声放大器第一、二级的放大管,这种管子噪声系数极低(NF=0.45 dB@12 G),因而可以很好地控制噪声系数;选用该公司的 FLK017WF FET 作为低噪声的第三级放大管,其 1 dB 压缩点输出功率(20 dBm),如此可以在实现高增益、低噪声系数的同时,在设计带宽内达到较高的 1 dB 输出功率压缩点。

利用 Microwave Office 微波仿真软件结合传统 Smith 图解法对三级低噪声放大器进行设计,对其增益、噪声系数和输入驻波比分别进行了优化^[10]。组装好的噪声放大器如图 4 所示,得到测试结果:10.4 GHz~10.6 GHz 带内增益大于 31.5 dB,输入驻波系数小于 2,噪声系数小于 1.3 dB。

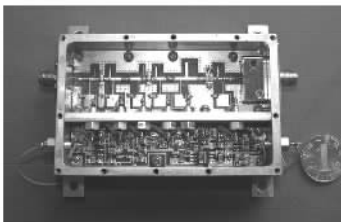
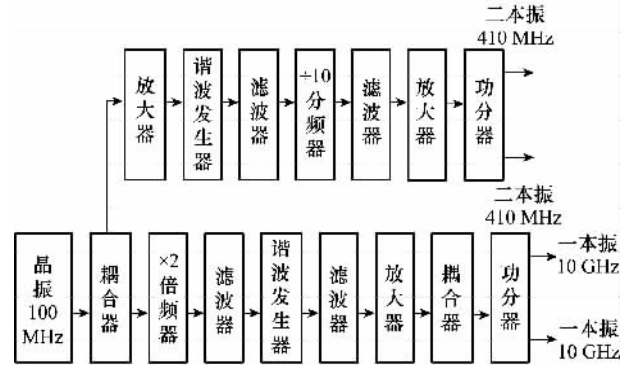


图 4 三级低噪声放大器实物

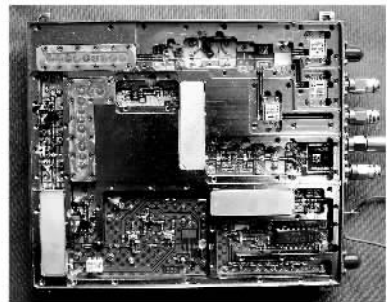
2.4 高稳定度频率综合技术

采用高稳定度频率综合器向整个射频前端提供统一的一本振、二本振和时钟频率,以保证信号的高稳定度,并实

现该射频前端的全相参特性。频率综合器采用直接频率合成方式,其原理框图如图 5(a)所示:由 100 MHz 恒温晶振提供参考频率,经放大和 41 倍谐波倍频滤波后产生 4.1 GHz 信号,再经过 10 倍分频滤波后产生 10 GHz 一本振信号由恒温晶振参考信号经 2 次倍频滤波再经 50 倍谐波倍频滤波产生。如此多级倍频滤波方式保证了高次谐波与信号间有较大的频率间隔,从而适应对应频段滤波器的滤波性能。研制出的实物如图 5 所示,经测试,频率综合器输出 10 GHz 一本振信号,功率 10 dBm,相位噪声优于 -101 dBc/Hz@1 kHz,频率稳定度优于 $8 \times 10^{-9}/\text{min}$,谐波和杂散抑制度均高于 45 dB。



(a) 频率综合器原理框图



(b) 频率综合器实物

图 5 频率综合器

2.5 结构一体化集成技术

瞬态极化雷达射频前端由接收机分系统、发射机分系统和天线分系统组成。接收机和发射机分系统电路结构如图 6 和图 7 所示,其各自两个极化通道分别位于不同的机箱隔腔内,各个功能模块封装于各自的金属屏蔽盒内,以保证系统的电磁兼容特性^[13-14]。模块之间用屏蔽性能好、可靠性高、稳定性强的钢性电缆连接,双通道各模块的相对位置相同,以此保证电缆长度相等,以达到较好的通道相位一致性。各通道相对应的极化天线,采用微带天线阵,共形安装在收发机箱的背面,如此提高了整个雷达射频前端的集成化程度,最大程度上减小了 X 波段天线与电路间连接电缆的长度,提高了接收机的灵敏度,减少了发射机发射功率的损耗,并且便于架设,方便户外实验操作。为了进一步提高收发隔离度,收发机箱间采用 U 型隔离板,可改善收发天线近场耦合抑制度 25 dB 以上。瞬态极化雷达射频前端外观如图 8 所示。

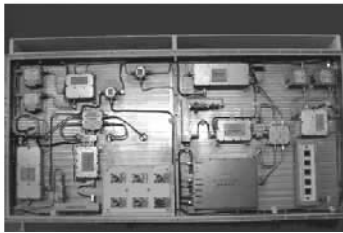


图 6 接收机分系统实物

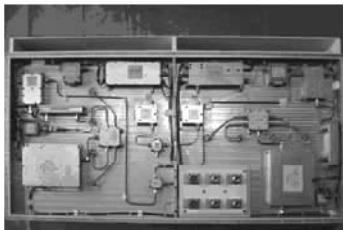


图 7 发射机分系统实物



图 8 雷达射频前端实物图

3 系统测试及实验

3.1 系统测试

(1) 接收机分系统噪声系数

将噪声发生器直接与低噪声放大器输入端电缆相连,接收机中频输出端接频谱分析仪,由 Y 系数法^[6],测试得到接收机两个通道的的噪声系数分别为:2.5 dB、2.8 dB。

(2) 接收机分系统动态范围

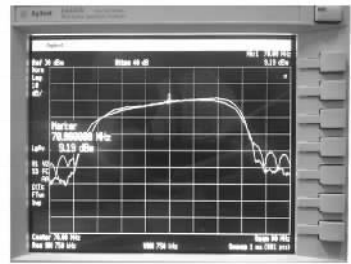
为使大动态范围内信号(50 dB)满足雷达后端 AD 采样精度,控制输出信号为:−10 dBm~+10 dBm,因此接收机中频模块采用了数控增益放大器。测试表明:当输入信号为−85 dBm 时,输出信号最大可控制为:−7 dBm;当输入信号为−35 dBm 时,输出信号最小可控制为:−3.5 dBm,满足要求。

(3) 发射机分系统双通道发射功率,经测试均可以达到 38 dBm 以上,完全满足指标要求。

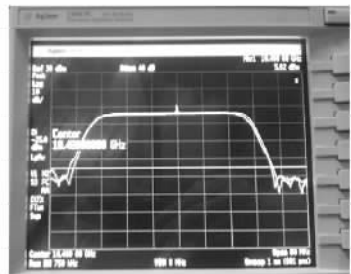
(4) 收发通道幅相一致性

接收机通道幅度一致性测试:用 Agilent 公司的微波信号源 E8257D 产生功率−50 dBm,10.44 GHz~10.52 GHz 连续波频率扫描信号注入低噪声放大器输入端电缆,将接收机中频输出接 Agilent 公司频谱分析仪 E4447,分别对两个极化通道进行测试,得到如图 9(a)所示测试结果。发射机通道幅度一致性测试:用微波信号源产生功率+4 dBm,30 MHz~110 MHz 连续波频率扫描信号注入发射机基频信号输入端电缆,将发射机功率放大器通过−33 dB 衰减后接频谱分析仪 E4447,分别对其两个极化通道进行测试,结果如图 9(b)所示。接收机与发射机两个通道的测试曲线

具有很好的通带特性,且基本重合,在带宽范围内两通道幅度相差小于 0.5 dB,具有很好的通道幅度一致性。



(a) 接收机双通道幅度一致性测试结果



(b) 发射机双通道幅度一致性测试结果

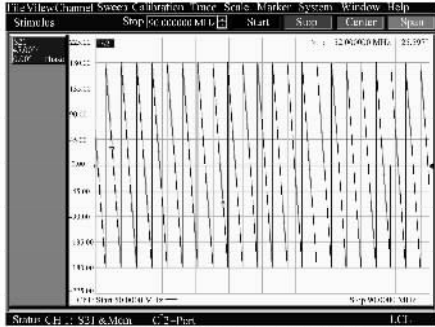
图 9 双通道幅度一致性测试结果

接收机通道相位一致性测试:将发射机的某一通道输出端通过大功率衰减器(−80 dB 以上),先后与接收机两个极化通道的输入端相连,利用 Agilent 公司微波矢量网络分析仪 N5230A,测试发射通道基频信号输入端口到接收通道基频信号输出端口的传输相移,得到如图 10(a)所示的两条测试曲线。发射机通道相位一致性测试:将发射机的两个极化通道输出端通过大功率衰减器(−80 dB 以上),先后与接收机某一通道的输入端相连,利用 Agilent 公司微波矢量网络分析仪 N5230A,测试发射通道基频信号输入端口到接收通道基频信号输出端口的传输相移,得到如图 10(b)所示的两条测试曲线。图 10 所示曲线具有很好的线性,且基本重合,在带宽范围内两通道幅度相差小于 5°,具有很好的通道相位一致性。

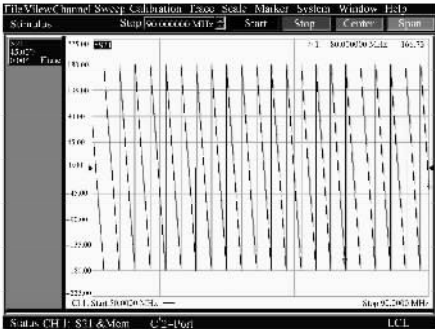
3.2 系统试验

瞬态极化雷达射频前端支持整个试验系统完成了外场试验。试验中,瞬态极化雷达试验系统通过发射机双极化通道,同时发射两路载波频率不同的正交极化脉冲,即双频矢量脉冲信号^[5,15]。图 11(a)为作为试验待测目标的湖南电视塔。图 11(b)为 X 波段的瞬态极化雷达测得的的回波信号,前面幅度较强的为存在的发射机强耦合信号,目标回波信号约滞后 3 μs,相当于目标距离约为 450 m,经 GPS 定位计算和实际目标距离吻合较好。图 11(c)是目标回波信号经接收机双极化通道接收到的基带频谱,频谱形状比较理想,可以看到不同极化通道接收到的回波频谱存在因脉冲载频不同而引起的频差,证实是双频矢量脉冲的回波信号。图 11(d)为四个极化通道匹配滤波的结果,通过匹配滤波每个极化通道均在目标所处的距离门上出现了正三角形形状的输出尖峰。实际上,观察和分析信号处理后输出的结果,不论是简单脉冲信号,正负线性调频信号,还是相位编码信号,通过匹配滤

波均能得到理想的匹配滤波输出峰值。数据分析表明:
 ① 双频矢量脉冲信号在每个脉冲重复周期内均反演出目标极化散射矩阵且得到的散射矩阵很一致,没有相位畸变;② 不同波形参数、不同波形的散射矩阵测量结果具有一定差别,但差别不大。从而验证了射频系统的正确性。



(a) 接收机双通道相位一致性测试结果



(b) 发射机双通道相位一致性测试结果

图 10 双通道相位一致性测试结果

4 结 论

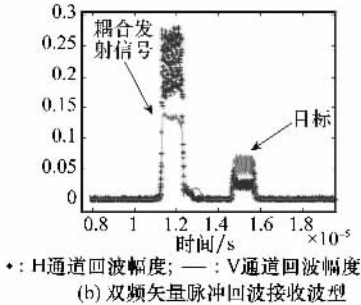
将“同时正交双极化”思想引入雷达射频前端设计,完成了国内首部具有全极化测量能力的瞬态极化雷达试验系统射频前端的系统集成。该射频前端通道一致性和隔离度好,工作性能稳定,谐波抑制和抗干扰能力强,灵敏度高,结构紧凑,可支持系统根据需要改变发射波形,通过变换发射信号和信号处理方法可实现分时、瞬态两种极化测量体制。该前端支持试验系统,在国内上首次实现了利用不同极化测量波形在一个脉冲时间间隔内测量出目标的全极化散射矩阵,初步验证了系统的测量性能,并将为雷达极化信息处理提供新的研究思路。对于提高复杂战场环境中的探测性能、抗干扰、反隐身、反低空突防等方面具有极其重要的军事价值。

参考文献:

- [1] Sinclair G. The transmission and reception of elliptically polarized radar waves[J]. *Proc. of IRE*, 1950, 38:148 - 151.
- [2] Giuli D. Polarization diversity in radar[J]. *Proc. of the IEEE*, 1986, 74(2):245 - 269.
- [3] Boerner W M. *Direct and inverse methods in radar polarimetry*[M]. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers, 1992:1 - 6.
- [4] 庄钊文,肖顺平,王雪松. 雷达极化信息处理及应用[M]. 北京:国防工业出版社,1999:1 - 4.
- [5] 王雪松. 宽带极化信息处理的研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,1999:8 - 9.
- [6] Poelman A J. Cross-correlation of orthogonally polarized backscatter components[J]. *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, 1976, 12(11):674 - 682.
- [7] Mott H. 天线和雷达中的极化[M]. 林昌禄,等,译. 成都:电子科技大学出版社,1999:21 - 26.
- [8] 王涛. 弹道中段目标极化域特征提取与识别[D]. 长沙:国防科学技术大学电子科学与工程学院, 2006:9 - 21.
- [9] 弋稳. 雷达接收机技术[M]. 北京:电子工业出版社,2006:58 - 67.
- [10] 薛正辉,杨仕明. 微波固态电路[M]. 北京:北京理工大学出版社,2004:131 - 133.
- [11] Rowan G, Les B. 现代无线系统射频电路实用设计[M]. 杨芳,翁木云,译. 北京:电子工业出版社,2006:1 - 4.
- [12] 赵菲,肖科,柴舜连,等. X 波段低噪声放大器 CAD 设计于实现[C]//第十届全国雷达学术年会论文集,北京:国防工业出版社, 2008:249 - 252.
- [13] 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,2006:513 - 514.
- [14] 中国人民解放军总装备部军事训练教材编辑工作委员会. 电磁兼容技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:2 - 5.
- [15] 王雪松,王剑,王涛,等. 雷达目标极化散射矩阵的瞬时测量方法[J]. *电子学报*, 2006, 34(6):1020 - 1026.

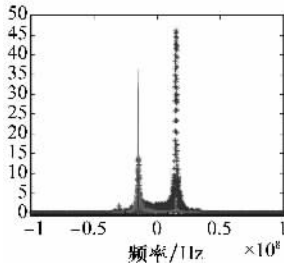


(a) 湖南电视塔



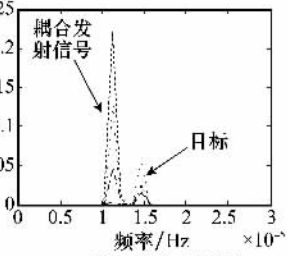
••: H通道回波幅度; —: V通道回波幅度

(b) 双频矢量脉冲回波接收波形



••: H通道回波频谱; —: V通道回波频谱

(c) 回波信号频谱



••••: HH通道匹配滤波; — — —: HV通道匹配滤波; - - - -: VH通道匹配滤波; ••••: VV通道匹配滤波

(d) 四通道匹配滤波结果

图 11 试验结果