Radar Science and Technology

DOI:10.3969/j.issn.1672-2337.2024.01.012

被动雷达海上目标探测实验研究

谭文清¹,宋杰²,庄敬敏¹,王中训¹

(1.烟台大学物理与电子信息学院,山东烟台 264005; 2.海军航空大学,山东烟台 264001)

摘 要:针对海上目标的无源探测问题,利用无源双基地雷达(Passive Bistatic Radar, PBR)系统开展了海上无源目标探测的研究,进行了一系列实时海上目标探测的外场实验,实验成功采集了一些I/Q数据并画出系统显示图。文中首先介绍了PBR系统的工作原理,然后对信号处理流程进行详细说明,包括参考信号重构、脉冲压缩、直达波抑制、非相参积累和MTI、MTD动目标处理,最后介绍了外场实验结果并对所得实验数据进行分析。实验证明,该系统可以实现海上目标的无源相干检测。

关键词:无源雷达;脉冲压缩;信号重构;直达波抑制

文献标志码:A

中图分类号:TN958.97

文章编号:1672-2337(2024)01-0087-06

引用格式:谭文清,宋杰,庄敬敏,等.被动雷达海上目标探测实验研究[J].雷达科学与技术,2024,22(1):87-92. TAN Wenqing, SONG Jie, ZHUANG Jingmin, et al. Experimental Study on Maritime Target Detection of Passive Radar[J]. Radar Science and Technology, 2024, 22(1):87-92.

Experimental Study on Maritime Target Detection of Passive Radar

TAN Wenqing¹, SONG Jie², ZHUANG Jingmin¹, WANG Zhongxun¹

(1. School of Physics and Electronic Information, Yantai University, Yantai 264005, China; 2. Naval Aviation University, Yantai 264001, China)

Abstract: In response to the problem of passive detection of maritime targets, the passive bistatic radar (PBR) system was used to conduct research on passive maritime target detection. A series of real-time outfield experiments on maritime target detection were conducted, and some I/Q data were successfully collected and system display diagrams were drawn. In this paper, the working principle of the PBR system is introduced, and then the signal processing process is described in detail, including reference signal reconstruction, pulse compression, direct wave suppression, non-coherent accumulation, and MTI/MTD moving target processing. Finally, the outfield experimental results are introduced and the obtained experimental data are analyzed. Experiments show that this system can achieve passive coherent detection of maritime targets.

Key words: passive radar; pulse compression; reference signal reconstruction; direct wave suppression

0 引 言

近年来,随着综合电子侦察及干扰技术、反辐 射武器、超低空突防技术和隐身技术的不断发展, 传统的有源单基地雷达将面临严峻的挑战。常规 的合作式双基地雷达辐射源由己方发射,发射站 和接收站采用一定的物理链路进行同步,接收站 和发射站协同进行工作。当利用第三方机会照射 辐射源进行目标探测时,发射站和接收站没有特 定的物理链路进行同步处理,辐射源参数不受控 制,这种雷达称为无源双基地雷达,又称为被动雷 达、无源相干定位雷达、寄生雷达(方便起见,后面 简称被动雷达)^[1]。

被动雷达的特征在于无需辐射电磁波,其工 作机理在于利用外辐射源实现目标的探测、跟 踪。现在针对民用辐射源进行目标检测的研究取 得了一定的进展,可利用的民用辐射源包括广播 电视辐射源(FM、DAB)^[24]、移动通信辐射源(Wi-Fi、GSM)^[5]和卫星辐射源(GPS北斗卫星)^[6],因为 民用辐射源并不是专门为了进行目标探测而设计 的,在实际应用中会出现探测距离不足和信号模 糊函数旁瓣较高等问题。而以雷达信号作为外辐

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No.61971433);山东省泰山学者计划(No.tsqn202211247)

收稿日期: 2023-06-12; 修回日期: 2023-07-18

射源可以弥补民用辐射源的不足,该模式下的被 动雷达具有灵活性强、信号截获概率低、抗电磁 干扰能力强等优点,在雷达探测领域以非合作雷 达信号作为外辐射源的被动雷达有着重要的研究 价值。

经过多年的研究,国内外对被动雷达系统的 研究在时频同步、直达波参数估计、直达波干扰抑 制、目标检测与定位等核心技术方面取得了一定 进展。现在国内外学者已经进行了一系列被动雷 达外场实验,但对被动雷达外场实验主要集中在 对空中目标的检测^[7-10],海上目标移动速度较慢, 多普勒频移较小,并且海洋环境相较于天空更加 复杂,目标回波受直达波旁瓣、地杂波和海杂波的 强烈干扰,海上目标检测面临许多困难和挑战。 因此,针对被动雷达海上目标探测研究,特别是基 于实测数据的系统验证,需要进一步加强和改进。 本文介绍了一种被动雷达系统,对海上目标检测 开展了一系列的实验研究。

1 PBR系统工作原理

典型的PBR系统由发射机、接收机和用于数 据处理和显示的PC组成,PBR系统的结构组成如 图1所示。PBR系统自己不发射信号,而是选择合 适的非合作雷达作为辐射源,非合作状态下的雷 达作为发射机发射电磁信号,海洋环境下常选用 岸基雷达、舰载雷达或预警机雷达作为发射机。 发射机发射的直达波照射到目标上产生回波信 号,接收机天线指向海上目标所在区域并接收直 达波和散射回波。接收机采集到的直达波信号和 目标反射的回波信号保存在存储器中,信号处理 器将直达波信号和目标回波信号下变频为基带信



号,同步采集并以I/Q数据的形式记录在硬盘中。 最后PC端接收到接收器采集的I/Q数据进行分析 和处理,实现海上目标探测。

2 系统信号处理流程

实验PBR系统的信号处理流程如图2所示。 实验PBR接收机会同时接收直达波信号和回波 信号,也就是回波由主瓣接收,直达波由旁瓣接 收。接收到的直达波信号首先会进行其参数的 估计从而重构直达波信号,重构的直达波信号 与回波信号完成脉冲压缩,然后进行直达波干 扰抑制、非相参积累,画出PBR系统海上目标探 测P显图和B显图,MTI、MTD动目标处理后,画 出运动目标的距离多普勒图,完成海上目标的 探测。





实验中接收机为单通道,会同时接收直达波和回波信号,经过中频数字采样和正交解调,接收 机接收到的信号可以表示为

$$s(t) = s_{d}(t) + s_{r}(t) + n(t)$$
(1)

式中:n(t)为接收机通道噪声; $s_d(t)$ 为直达波信号; $s_r(t)$ 为回波信号,将其分别表示为

$$s_{d}(t) = k_{d}s_{t}(t - \tau_{1})$$
⁽²⁾

$$s_{\rm r}(t) = k_{\rm r} s_{\rm t} (t - \tau_2) {\rm e}^{{\rm j} 2\pi f_{\rm d}(t - \tau_2)}$$
(3)

 $s_{t}(t)$ 为发射机信号; k_{a} 和 k_{r} 为直达波和回波衰减系数; τ_{1} 和 τ_{2} 为直达波和回波相较于发射信号的时间延迟; f_{a} 为运动目标回波信号多普勒频移。

2.1 参考信号重构

与典型的单基地雷达不同,非合作雷达辐射

源的参数未知,发射机和接收机未进行同步处理, 后续对回波信号进行脉冲压缩所用的参考信号也 来自直达波信号,因此对非合作雷达直达波进行 估计并构建参考信号估计是非常重要的。在实验 PBR系统中,接收到的旁瓣直达波信号比回波信 号大得多,并且回波信号相较于直达波信号存在 延迟时间,故我们可以提取进而估计直达波信号存在 延迟时间,故我们可以提取进而估计直达波信号 参数。非合作雷达发射机持续发射稳定的线性调 频信号(LFM),故直达波参数估计也就是对LFM 信号的估计,常用的参数估计方法有最大似然估 计、STFT变换和魏格纳分布等^[11],但都在估计精度 和计算量上存在缺点。分数阶傅里叶变换 (FRFT)^[12-13]有着精度高和计算量少等优点,更适 合应用。线性调频信号表达式为

$$x(t) = A * \exp\left[j(2\pi f_0 t + \pi k t^2 + \varphi)\right] + w(t)$$

$$|t| \leq \frac{T}{2}$$
(4)

式中A为幅度, f_0 为初始频率,k为调频斜率, φ 为初 始相位,T为脉宽,w(t)为噪声。

p阶分数阶傅里叶变换的表达式为

$$X_{a}(\boldsymbol{\mu}) = FRFT^{p}[x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} K_{p}(t,\boldsymbol{\mu})x(t)dt \quad (5)$$

其中p为分数阶傅里叶变换阶数,可以将其转化成时间-频率面上的旋转角 $a = p\pi/2, K_p(t,\mu)$ 为变换核,进行各阶变换后可以得到相关变换域,在变换域峰值搜索后得到峰值坐标(a_0,μ_0),根据峰值坐标即可进行参数估计。根据估计出的参数得到参考信号带宽,从而重构参考信号。

参数估计公式为

$$\hat{k} = -\cot a_0$$

$$f_0 = \mu_0 \csc a_0$$

FRFT的参数估计流程如图3所示。



2.2 脉冲压缩

实验中研究的雷达信号为 LFM 线性调频信号,其有较大的时宽带宽积,接收到的 LFM 信号需要进行脉冲压缩处理。脉冲压缩的目的是为了压缩宽脉冲信号得到窄脉冲信号,从而在保证探测

距离的同时提高雷达的分辨率,保证了雷达的探测精度。本实验中脉冲压缩处理有两种方法:一种是根据估计出的参数可以重构直达波参考信号,该信号可以与回波信号完成脉冲压缩;另一种是可以直接截取 I/Q数据中一段完整的直达波样本信号,与回波信号完成脉冲压缩,这相当于样本信号与回波信号的自相关。

2.3 直达波抑制

在接收信号时,接收机信道存在直达波旁瓣 干扰,直达波强度远远高于回波,直达波旁瓣会将 目标回波遮盖,此时需要对直达波旁瓣干扰进行 抑制。根据时域特性,当直达波和回波时域不交 叠,针对直达波旁瓣干扰抑制可以选用合适的窗 函数叠加参考信号来消除直达波旁瓣的干扰。当 直达波和回波时域交叠时,主要利用维纳滤波理 论抑制直达波,根据输入和输出结果调整自适应 滤波器权重 W,以调节自身的传输特性达到最优的 抑制效果,自适应滤波器按准则分类有 LMS、 NMLS和RLS等^[14]。

2.4 非相参积累

(6)

接收机收到的回波信号强度较弱,信噪比较低,此时可能遗漏回波数据中的小目标,对脉冲串进行积累可以有效地提高信噪比,有利于小目标的检测。虽然相参积累相比于非相参积累对信噪比的提升更加明显,但相参积累对相参性的要求比较高,相比之下非相参积累更加简单。实验中非相参积累为N个相同距离单位的回波信号包络幅度进行积累。

2.5 MTI和MTD动目标处理

运动目标显示(MTI)技术的主要目的是提高 雷达运动目标检测能力,过滤掉静止目标和杂波, 显示运动目标。实验中采用三脉冲对消MTI滤波 器进行处理,在进行MTI处理之前需要对回波脉 冲多普勒频率进行补偿。运动目标处理(MTD)技 术的主要目的是获得运动目标的距离多普勒图 (R-D图)。在实验中,MTD是通过对具有多个相 邻脉冲重复周期的脉冲进行FFT处理来实现的, 这相当于回波脉冲串的相参积累。

3 外场实验与数据分析

3.1 实验场景

实验场景位于中国山东省烟台市沿海地区, 实验场景如图4所示。实验所用接收机位于学校实 验楼楼顶,并选择距离接收机约9km外的L波段岸 基雷达作为非合作雷达系统的发射机,该雷达可以 不间断地发射稳定的LFM脉冲信号,并带有导前补 盲短脉冲。该实验以接收机东北方向20km左右的 锚地停船和进出锚地的船只为机会目标,海上目标 区域位于图中的黄色椭圆形之中。在本次实验中, 借助船舶自动识别系统(Automatic Identification System, AIS)所提供的船舶动态数据来验证海上目 标的探测结果,从图5可以看到目标锚地的船只。



图4 外场实验场景



图5 AIS系统船只信息

3.2 实验设备和 I/Q 数据

如图6所示,实验系统由格栅天线、频谱分析 仪、PC机等组成。实验中格栅天线是固定不动的, 格栅天线指向海上目标区域,实验中不断采集和 记录非合作雷达辐射源的直达波和海上目标的散 射回波。频谱分析仪内自带信号采集处理器和存 储器,可以将实验数据同步采集并记录到硬盘上, 用于PC端的数据处理。频谱分析仪的频率范围 为3Hz~26.5GHz,分辨率带宽为1Hz~10MHz, 绝对幅度误差优于±0.5dB,扫描时间范围为102.4 µs~20s,满足对L波段岸基雷达信号中心频率和 雷达扫描周期的要求,并满足实验采集信号的精 度要求。频谱分析仪的采样率和放大器可以通过 软件进行设置,多个天线旋转周期的数据可以根 据设置的采样率连续采集,采集到的信号样本储 存在一个I/Q数据文件当中,可以将采集的信号样 本利用PC端软件进行观察和截取。



图6 格栅天线(右)和频谱分析仪(左)

采集的 I/Q 数据如图 7 所示,数据包括多个天 线旋转周期。从图 7(a)可以看出,随着发射天线 的周期性扫描,接收到的直达波信号幅度周期性 地进行变化,周期约为 10 s,最强脉冲峰值对应于 发射天线直接指向接收天线的脉冲。图 7(b)中直 达波脉冲的能量比回波脉冲强得多,直达波脉冲 是具有大约 2.37 ms的脉冲重复周期和脉冲宽度为 160 μs的LFM 信号。



(a) 多个天线旋转周期的 I/Q 数据



(b) 部分放大后两个脉冲的I/Q数据 图7 采集的I/Q数据

3.3 实验结果

在本实验中,非合作雷达辐射源为L波段岸基 雷达,并使用相关实验设备进行被动探测进出港 口的海上船只。实验不断采集和记录岸基雷达的 直达波和海上目标回波数据。通过 PC 端数据分 析和处理,完成了直达波参考信号重构和脉冲压 缩,绘制了系统的P显图和B显图。

首先,提取直达波信号的参数,构造参考信号 并完成脉冲压缩。在接收信号中截取一段完整直 达波信号,对其进行各阶分数阶傅里叶变换后得 到如图8的FRFT变换域,可见变换域中有一峰值, 寻峰操作找出峰值后用公式(6)计算出参数估计 值即可重构参考信号。



图8 FRFT变换域

不同方法脉压后结果如图9所示,可见脉压后 产生了可见峰值,该峰值实际是直达波脉压的结 果。由图9(a)、(b)对比看出,重构参考信号脉压 结果相对于样本脉压结果旁瓣干扰和噪声更少, 并且峰值聚集度更高,所以重构参考信号脉压效 果优于样本脉压。

重构参考信号脉压后画出海上目标的P显和 B显图,其中所用的脉冲总数为4 200,图 10为PRB





系统海上目标检测图。目标区域用两处黑色方框标记,该区域是近海岸处的锚地,并有船只进出该地。位于发射机正北和东北方向20km左右的几处目标较为清晰,成功捕捉到7个海上目标,其中锚地处有5个目标,进出锚地的航道处有两个目标。箭头所指杂波为近地杂波,条状杂波主要为直达波旁瓣干扰,可见虽然经过参考信号加窗处 理减少直达波旁瓣的干扰,但仍有部分干扰保留。



图 11(a)为目标区域放大后的 B 显图,横轴代 表双基地距离单元,纵轴代表选取的PRT数量。 图 11(b)是其所对应的距离-多普勒(R-D)图。横 轴表示双基地距离单元,纵轴表示多普勒频率。 从图 11(a)、(b)可以看出,目标区域内有多个目 标,目标1的多普勒频率为-45 Hz,证明目标1在向 着远离接收机的方向移动;目标2和目标3的多普 勒频率为60 Hz,证明目标2和目标3在向着靠近 接收机的方向移动。区域1中的目标的多普勒频 率为0Hz,为静止目标。此外,杂波的多普勒频率 也为0Hz,表明杂波是静态杂波。选取图中目标 进行MTI处理,图11(c)为图11(a)MTI处理之后目 标区域的B显图。经过MTI处理之后杂波基本被 对消掉,所以这些杂波主要是静止杂波,区域1中 静止目标部分消除,这是由于MTI滤波器0频处凹 口过小导致的,而目标1、目标2和目标3这些移动 目标被保留下来。由此可见,利用非合作雷达发 射机对海上目标进行被动雷达探测,实现海上移 动目标探测是完全可行的。





4 结束语

本文介绍了一种用于海上目标探测的被动雷 达系统,该系统以L波段岸基雷达作为非合作雷达 辐射源发射机,可以接收发射机直达波信号和目 标回波信号。给出了一系列信号处理流程,在PC 端通过Matlab完成了直达波参考信号重构、脉冲 压缩、直达波干扰抑制、非相参积累、MTI和MTD 运动目标处理,实现对海上目标的检测。针对双 基地无源雷达在海上目标探测的实际应用,团队 进行了一系列实时目标探测的外场实验,成功采 集了一些直达波和回波数据,并对数据进行了一 系列的分析和处理。实验获得了非常清晰的显示 图,并成功检测到进出港口的船只。实验证明系 统对慢速海上目标有较为良好的检测能力,该系 统可以用于海上移动目标的检测。

参考文献:

- [1] 鲍庆龙,王森,潘嘉蒙,等.非合作雷达辐射源目标探测系 统关键技术分析[J].电波科学学报,2020,35(4):497-503.
- [2] HOWLAND P E, MAKSIMIUK D, REITSMA G. FM Radio Based Bistatic Radar [J]. IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 2005, 152(3):107-115.
- [3] HOWLAND P E. Target Tracking Using Television-Based Bistatic Radar[J].IEE Proceedings-Radar Sonar and Navigation, 1999, 146(3):166-174.
- [4] GRIFFITHS H D, LONG N R W. Television-Based Bistatic Radar[J]. IEE Proceedings, 1986, 133(7):649-657.
- [5]万显荣,赵志欣,柯亨玉,等.基于DRM数字调幅广播的高频外辐射源雷达实验研究[J].雷达学报,2012,1 (1):11-18.
- [6] SUBERVIOLA I, MAYORDOMO I, MEN-(下转第103页)