

非合作无源探测技术研究进展与发展趋势^①

应涛^② 黄高明 左炜 高俊

(海军工程大学 电子工程学院 武汉 430033)

摘 要 从非合作无源探测原理和特点出发,对非合作无源探测技术的研究进展和发展趋势进行了综述。介绍了国内外非合作无源探测理论与实验研究的发展与现状,评述了非合作无源探测技术的研究热点与关键技术,包括辐射源信号分析与选择,参考信号提纯,干扰抑制及目标检测、定位与跟踪等。最后对非合作无源探测技术的发展趋势进行了展望。

关键词 非合作辐射源,无源探测,目标定位与跟踪

0 引言

非合作无源探测技术是利用第三方辐射源发射的信号(如民用广播信号、卫星导航信号、移动通信信号等)探测目标的双/多基地无源雷达技术。用这种技术实现的非合作无源探测系统的基本思想是以己方、敌方或中立方民用或军用辐射源发射的直达波信号为参考,检测分析目标散射的辐射源信号^[1,2]。非合作无源探测系统有诸多突出优点,如建造、运行及维护成本低;无需频率分配、无辐射、战场生存能力强;受气候因素影响较小,全天候全天时工作能力强;可灵活布站,组网能力强,有较强的反隐身能力;与基于目标自身辐射源的无源探测手段相比,即使目标处于电磁静默状态仍可发现目标。由于具有这些优点,非合作无源探测系统已成为传统探测方法的有效补充手段,非合作无源探测技术成为新型探测技术的研究重点^[3-7]。随着非合作无源探测理论、技术的突破,国内外已研制出了多种试验系统,美国洛克希德·马丁公司研制的“寂静哨兵(Silent Sentry)”已真正达到了实用化和商业化,该系统以覆盖最广泛的 FM 广播模拟调制信号作为

非合作辐射源,可实现对飞机、导弹等目标的探测和跟踪。自上世纪 90 年代以来,由于数字广播、数字电视及数字通信网络等在全球兴起,各国发射了大量用于数据中继、转发目的的通信卫星,地面上的任何一点(或至少地面上大多数地点)均能同时受到多个辐射源的照射,利用这些新的辐射源进行目标探测的非合作无源探测系统大量涌现。

非合作无源探测系统因具有潜在的军事应用价值,因而备受各国军方重视,毫无疑问,它将担负起未来的反隐身探测跟踪使命。大力发展非合作无源探测系统,建立庞大的无源监视网络,并与各种高性能有源雷达相结合,就可以形成一个高效、可靠的防御情报系统。因此,开展非合作无源探测系统研究具有重大军事意义。本文对国内外非合作无源探测技术的研究状况、关键技术进行了综述,并展望了未来研究走向。

1 国内外研究发展

1.1 国外研究发展

利用第三方非合作辐射源的信号来探测目标其实并不是一种新技术,最早研究和投入试用的非合

① 863 计划(2013AA7014061, 2014AA7014061)资助项目。
② 男,1987 年生,博士;研究方向:无源探测信号处理;联系人,E-mail: yingtao_scholar@163.com
(收稿日期:2014-12-15)

作无源探测系统是二战期间德国研制的 Klein Heidelberg。该无源探测系统利用英国的 Chain Home 雷达发射机作为非合作辐射源,接收来自 Chain Home 雷达的直达波信号和目标反射信号,通过测量两信号的时间差和反射信号的到达角来定位目标。它能探测到 450km 外的飞机,精度大约为 10km,曾经在丹麦作过短期部署,很好地完成了对飞跃英吉利海峡的盟军轰炸机群的警戒任务^[8]。

20 世纪 80 年代,英国伦敦学院的 Griffiths 等在非合作无源探测系统研究方面得出了不少有用的结论^[9]。20 世纪 90 年代,Howland 等针对基于电视信号的无源探测系统进行了研究,该系统仅利用电视信号中很窄带宽内的信号,采用 FFT 算法来估计目标多谱勒频率,根据干涉仪原理测量目标的方位,并在此基础上设计了 Kalman 滤波器来对目标进行跟踪^[10]。之后,Howland 等又研究了基于 FM 广播的无源探测系统,该系统利用自适应滤波器滤除直达干扰信号,采用干涉仪测量目标方位,并在此基础上采用 Kalman 滤波器对目标进行跟踪,所建立的试验系统能够实时地探测、跟踪距接收机 150km 以外的飞机^[11]。

1997 年,Hawkins 在英国 IEE 国家雷达会上发表了英国皇家海军利用伦敦 Gatwick 机场的远程空中交通管制雷达作为非合作辐射源进行了目标无源探测研究^[12],分别在陆基和舰载平台进行试验,接收机采用全向天线,接收非合作雷达辐射源的直达波和目标散射回波,结果成功探测到了 130km 处的空中目标。

1998 年,英国《防务系统日刊》电子版报道了美国洛克希德·马丁公司用 15 年时间研制成功的“寂静哨兵”新型无源探测系统。该系统具有实时、高精度探测飞机、直升机、火箭等各种空中目标的能力。随后,洛克希德·马丁公司又对产品进行不断改进,现已生产出第三代产品,其对雷达截面为 10m² 的目标的探测距离超过 200km^[13]。

基于非合作雷达辐射源的无源探测系统可以在双基地配置下直接利用己方建造的高性能雷达,这引起了美军的不安与担心。于是,美国空军研究实验室于 2001 年提出要在雷达对抗方面采取措施,例

如在发射信号上叠加一种“遮掩信号”,该信号与雷达辐射信号波形在时间域和空间域上都构成一种正交关系,可以起到掩盖雷达辐射信号的作用,从而增加敌方利用己方非合作雷达辐射源的难度。

2007 ~ 2009 年,法国 Thales 公司为了测试非合作无源探测系统对非合作目标的检测和跟踪性能,在捷克布尔诺机场进行了 SINBAD 试验^[14],试验结果表明系统测高精度为 500m,平均测距精度达 50m,双基地配置情况下定向精度为 3.6°,系统可覆盖地表达 5000 英尺,此外,试验还验证了单频网地面数字视频广播(DVB-T)信号及多发多收的系统配置可以有效提升系统性能。

2009 年,德国为了验证来自德国和挪威等国多个非合作无源探测系统的探测性能,开展了新型多基地无源雷达评估与局限性分析(PAMELA)试验^[15]。试验对多种型号飞机(如台风战机、幻影战机、TH-55 直升机和 PULSAR 飞机)进行了不同飞行高度下的实测,结果表明低空飞机目标探测距离达 20 海里,基于 DVB-T 信号的距离分辨率为 15m,采用单发单收配置时系统方位精度可达 3° ~ 8°,采用多发多收配置时目标检测概率达 99% 以上。

2009 年底,欧洲第 7 框架研究计划安全主题启动了研究周期为 3 年的 ARUGS-3D(AiR Guidance and Surveillance 3D)项目^[16],该项目由 5 个欧盟成员国(英国、德国、意大利、西班牙和波兰)的 12 家研究机构、企业和用户共同完成。其三大研究内容之一便是无源雷达组网。德国的线性阵数字声频广播实验雷达(DELIA)、无源实验电视雷达(PETRAII)、隐藏雷达(CORA)等系统都是此项目的重要组成部分。

1.2 国内研究发展

20 世纪 90 年代中后期,国内开始对基于非合作辐射源的无源探测系统开展全面而系统的研究。目前国内有多家单位进行了利用商用信号对目标进行探测与定位的无源系统技术研究,并开展了相应的探索性试验,针对非合作无源探测系统需要解决的问题研究了相应的信号处理方法,所取得的研究成果进一步推动了该项技术的发展。

西安电子科技大学雷达信号处理国家重点实验

室在非合作无源探测方面做了大量工作,对基于全球移动通信(GSM)信号的无源探测中遇到的弱干扰和强干扰问题进行了研究,提出了两步空域滤波的干扰抑制方法^[17];研究了基于非合作调频广播的无源探测系统中强直达波及多径杂波对动目标检测的干扰问题,提出了一种直达波和多径到达时间为整数采样迟延的杂波抑制方法和利用分数内插提高杂波对消性能的算法,并用实测数据对算法的有效性进行了验证^[18];针对基于模拟电视的无源探测系统中,单独利用视频信号进行失配滤波会产生比较大的失配信噪比损失的问题,提出一种基于模拟电视视频和音频信号综合失配滤波的方法^[19]。

北京理工大学陶然领导的研究小组针对非合作无源探测系统计算互模糊函数运算量大、难以满足系统实时性要求的问题,提出了分级抽取 FFT 算法和预加权分级抽取 FFT 算法两种快速算法^[20]。为了提高基于 DVB-T 辐射源无源探测系统的目标探测能力,推导了 DVB-T 信号模糊函数的副峰位置与信号参数之间的对应关系,并分析了副峰产生的原因和特点,然后提出了两种副峰抑制方法^[21,22]。此外,针对基于中国数字电视信号的无源探测系统中直达波干扰的问题,提出了一种空域滤波的方法^[23]。

武汉大学万显荣等对基于中国移动多媒体广播(China Mobile Multimedia Broadcasting, CMMB)的无源探测系统进行了研究^[24],研制出了一套 CMMB 非合作无源探测系统,系统包括 16 个接收通道,天线阵型可按试验需要进行调整,并于 2011 年底系统地开展了一系列外场试验,囊括了飞机、舰船和汽车等常规探测目标,验证了一种易于并行实现的非均匀采样相干积累方法^[25]和一种参考信号获取方法^[26]。此外,他们还利用新近研制的全数字主被动一体化高频地波雷达系统,开展了我国首次基于世界数字广播(digital radio mondiale, DRM)数字调幅广播的非合作无源探测系统实验研究^[27-29],给出了不同条件下(包括地波模式、天波模式、天地波混合传播模式)的典型探测结果,在国际上首次通过试验验证了利用 DRM 广播信号实现超视距无源探测的技术可行性。

此外,中科院电子学研究所微波成像技术国家重点实验室对卫星数字视频广播(DVB-S)辐射源应用于无源探测系统的可行性进行了研究^[30],针对非合作无源探测系统中分数延迟直达波及多径杂波不能被完全对消的问题,提出了一种非因果的归一化最小均方自适应对消算法^[31]。哈尔滨工程大学则根据基于 GPS 辐射源无源雷达的特点,提出了一种 ECA 与 CLEAN 相结合的两级干扰抑制方法^[32]和基于改进子空间投影的无源雷达弱目标检测方法^[33]。

2 研究热点与关键技术

非合作无源探测系统本身不发射能量,而是被动地接收目标散射的非合作辐射源电磁信号,对目标进行探测、定位及跟踪,其核心技术是无源相干定位技术。非合作无源探测系统一般设置 2 个通道,即参考通道和监测通道,分别用来接收非合作辐射源直达波参考信号和目标反射的回波信号,通过参考通道与监测通道(干扰抑制后)的互相关模糊函数计算获取距离-多普勒谱,据此实现目标检测、定位与跟踪,其探测示意图如图 1 所示。

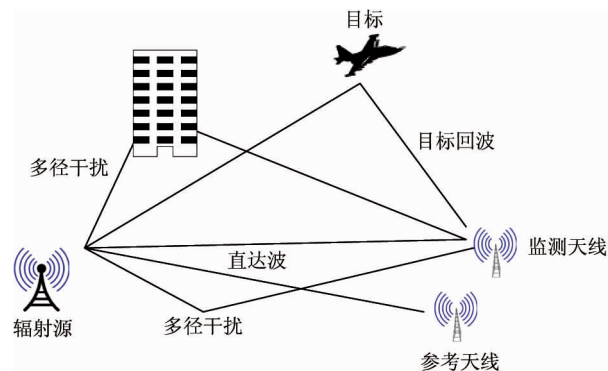


图 1 非合作无源探测系统示意图

2.1 辐射源信号分析与选择

对于非合作无源探测技术研究,选择什么样的信号作为照射信号是一个基本问题。不同的辐射源,其信号功率大小、带宽以及覆盖范围都不同,这将直接影响到非合作无源探测系统性能能否满足设计要求。研究表明,非合作辐射波形的模糊函数是个关键,波形模糊函数的特性将决定距离分辨率、距

离模糊间隔、距离旁瓣水平以及多普勒分辨率。表 1 给出了一些典型辐射源信号参数。

从表 1 中可以看出,在距离分辨率方面,FM 广播、数字音频广播(DAB)和全球移动通信(GSM)辐射信号都是窄带信号,距离分辨率较差,而全球微波互联接入(WiMAX)、无线保真(WiFi)和地面数字视频广播(DVB-T)信号的带宽较大,有较高的距离分辨率。从覆盖能力方面来看,WiFi 能在室内有 100m 的覆盖范围,单个 GSM 基站和 WiMAX 基站能够有效覆盖几公里的范围,相比之下,单个 FM 广播、DAB 和 DVB-T 辐射源的有效覆盖范围则大得多。不同的辐射源有其自身的特点,针对不同的非合作无源探测系统目标探测需求,应该选择不同的

非合作辐射源。近年来,大量学者研究了基于 FM 广播^[10,34]、DAB^[35]、DVB^[36-39]、卫星信号^[40]以及通用移动通信系统(UMTS)^[41,42]和 GSM^[43]等辐射源的非合作无源探测技术。此外,由于 GPS 卫星信号作为非合作无源探测系统照射信号具有较好的探测性能,已有学者将其应用于无源成像技术研究^[44,45];文献[46]首次探索性地对基于自动识别系统(aotomatic identification system, AIS)的无源探测技术进行了研究,证明了其具有海事交通监测能力,能够确定 AIS 中自报告船只位置和探测其他船只。但这些研究尚停留在理论分析和实验探索阶段,与技术的实用化还有一段距离。

表 1 典型非合作辐射源信号参数

辐射源	载频(MHz)	距离分辨率(m)	带宽(kHz)	功率(W)
FM 广播	93.5	3000	50	250000
DAB	219.4	682	220	10000
DVB-T	505.0	25	6000	8000
GSM 900	944.6	1800	83.3	100
GSM 1800	1833.6	2620	57.2	100
WiFi(802.11b/g)	2437	7.5	20000	0.316
Mobile WiMAX	2118	7.5	20000	632

随着信息技术的不断进步,无线局域网的应用也越来越广泛,基于无线局域网的非合作无源探测系统也得到了众多学者的关注。Woodbridge 等^[47]针对 IEEE802.11 标准的无线局域网信号模糊函数进行了研究,分析了其距离域和多普勒域的分辨力和旁瓣水平,从仿真数据和实测实验两个方面证明了 WiFi 信号能够被用于局部区域中机动车辆和人体目标的检测与跟踪。Colone 等^[48]则提出了一种可能性——基于 IEEE802.11 信号的本质,通过回波通道合成参考信号,大大减小非合作无源探测系统的复杂度。文献[49]则论证了 WiMAX 信号用于无源探测的可行性,并针对运动的汽车、人体和船体目标进行了实测试验,试验结果令人满意。由于无线局域网的功率和覆盖范围限制,目前基于无线局域网的非合作无源探测系统主要用于室内外局部区域的目标探测与区域监视。

不同的辐射源信号具有不同的特点,应选择合适的辐射源用于不同探测需求的系统。首先,所选择的辐射源信号应具有较好的模糊函数形状,能够满足系统性能指标。然后,为了目标的可观测性,需要考虑辐射源的位置,使得目标远离基线区,以保证获得所需的定位精度。此外,辐射源信号的覆盖范围、持续时间能否保证系统探测的有效性和全天性也是需要考虑的问题。为了能对目标进行有效探测,慎重选择合适的辐射源非常重要,需要在辐射源信号模糊函数性能、辐射源位置及信号覆盖范围和全天性等方面折衷考虑。

2.2 参考通道直达波提炼

非合作无源探测系统中监测通道接收到的目标回波中,往往伴随着大量的直达波信号和多径杂波,且功率远大于目标回波,这对目标检测造成很大干扰。一般情况下,需要纯净的直达波信号作为参考

信号,利用自适应算法来消除直达波和多径杂波干扰。此外,获取纯净的直达波参考信号也是非合作无源探测系统二维相关处理的核心环节之一,参考信号的纯净程度将直接决定系统的探测性能。然而,在非合作接收条件下,参考通道天线接收到的直达信号不可避免地受到多径杂波的影响,所以参考通道信号是多个时间上错开的直达波及多径杂波的叠加,使得参考信号不再“纯净”。因此,为了进一步改善消除目标回波中直达波干扰的效果和抑制地杂波的性能,有必要对参考通道中多径干扰进行有效抑制,从而获得较纯净的参考信号,提高参考信号通道和回波信号通道的一致性。

在抑制多径干扰方面,国内外通信信号处理领域的学者们作了许多研究工作。早期由 Godard 提出的恒模算法(constant modulus algorithm, CMA)被用于对各种恒包络信号的均衡,该算法可以从直达信号中提取出参考信号,但它只适合于恒包络调制的信号,且在多径较严重时性能有所下降。意大利学者 Colone 在恒模算法的基础上提出了空时恒模算法^[50],并将其与时域恒模算法和空域恒模算法进行了对比性试验,结果令人满意。另外,数字广播电视通常采用单频网结构,即多台发射机以相同的频率发射同样的节目数据,与基于传统模拟波形的非合作无源探测系统相比,参考信号的受干扰情况更为严重,这对于“纯净”参考信号的获取提出了新的挑战。陶然等提出先做波达方向(direction of arrival, DOA)估计,再做空域滤波来抑制多发射站带来的干扰的方法^[51]。万显荣等结合中国移动多媒体广播(CM-MB)信号的特殊结构,提出了两种 CM-MB 参考信号的获取方法^[26],即基于 CM-MB 同步信号的自适应滤波提纯算法与利用 CM-MB 调制解调理论的参考信号重构算法,它们能有效地消除参考信号中的噪声干扰和多径干扰,具有获取高纯度参考信号、算法稳健等优点。此外,文献[52]对非合作无源探测系统中直达波参考信号受到噪声干扰和多径干扰影响的问题进行了理论分析和数学建模,并提出了一种直达波信号重构方法。

2.3 监测通道干扰抑制

由于辐射源信号波形不是自行设计的,目标回

波处于复杂的干扰环境中,尤其是弱目标回波不仅受到直达波、多径杂波干扰,甚至在距离-多普勒域与弱目标分离的强目标回波也会对其产生干扰。而包括直达波在内的杂波信号功率远高于目标回波信号功率,经过二维相关处理后杂波仍然具有很高的距离副瓣和多普勒副瓣,这些副瓣会淹没远距离和低速动目标的回波,因此如何有效抑制监测通道中的干扰,是非合作无源探测系统的关键问题^[32,53-55]。

非合作无源探测的干扰抑制方法大致可以分为时域方法、空域方法以及两者相结合的方法。时域方法主要包括自适应滤波算法^[56-58]和子空间投影干扰抑制算法。自适应滤波算法基于维纳滤波理论求出自适应滤波器权系数,抑制干扰后得到目标信号。Meller 针对非合作无源探测系统中噪声环境下非平稳强回波干扰抑制问题,提出了一种实时性强、鲁棒性好的多级滤波算法^[59]。Kulpa 研究了当远距离的微弱回波被强回波覆盖时无源雷达系统的探测性能,提出了一种自适应消除强目标回波的算法^[60]。但在实际情况中,多径时延不可能全部处于整数倍采样间隔上,需要考虑多径时延处于分数倍采样间隔的干扰抑制问题。为了提高系统在多径分数倍延时情况下的性能,王俊等提出了一种直达波和多径到达时间为分数延时的自适应杂波抑制方法^[18]。该方法将直达信号通过不同分数时延的 sinc 系数滤波器,得到直达信号的不同时延近似信号,对接收信号实现逐个多径信号的近似信号剔除,其剔除精度与 sinc 函数截断的长度及采样周期划分为不同时延的个数有关,但该方法计算量很大。为了在较小计算量的情况下获得较好的对消效果,文献[61]提出了一种基于 AR 与 MA 模型混合的直达波与多径杂波抑制算法,它将含分数延时的多径系统看成一个 IIR 系统,采用了 AR 与 MA 混合模型作为近似,通过近似空间信道模型的方法达到消除直达信号与多径杂波的目的,具有建模准确计算量小的特点。文献[62]则提出了一种非因果的归一化最小均方自适应对消算法,该算法降低了计算复杂度,且杂波抑制效果较好。子空间投影干扰抑制方法是通过构造投影矩阵将接收到的回波信号投影到多径干扰子空间的正交补子空间内,达到抑制多

径干扰的目的。Colone 针对非合作无源探测系统中直达波、强杂波和强目标掩盖弱目标回波的问题,提出了一种子空间投影干扰抑制方法,该方法能够稳定有效地检测出被地杂波、强目标回波掩盖的弱目标^[63]。但该方法构造投影矩阵时需计算多径干扰矩阵的逆矩阵,过大的计算量降低了其实用性。为了降低子空间投影干扰抑制方法的计算量,徐定杰等提出了一种改进子空间投影的干扰抑制方法^[33]和基于迭代相关相减结构多级维纳滤波器(ICSAMWF)的多级投影干扰抑制方法^[64]。

空域方法是较为常用的杂波抑制方法,普通双通道非合作无源探测系统通过降低监测天线副瓣来抑制直达波和杂波,而多通道阵列无源探测系统通过自适应波束形成深零陷来实现主多径杂波抑制^[23,65]。常规空域处理方法自由度不足或杂波噪声比低导致的杂波零陷深度不够等缺点,为了克服此缺点,提高杂波抑制能力,万显荣等提出了一种基于分载波空域处理的多径杂波抑制方法^[29]。王俊等提出了一种基于两步空域滤波的 GSM 辐射源雷达干扰抑制方法,该方法首先利用低副瓣技术对弱干扰进行抑制,然后利用一种稳健的自适应波束形成方法对残留的强干扰信号作进一步抑制^[17]。此外,杨博等针对空基运动平台连续波照射条件下的地杂波建立了空时二维模型,基于该模型分析了杂波特性,计算了杂波的空时二维似然谱,分析了它与脉冲信号地杂波的差别及其对杂波抑制的影响^[66,67],利用杂波与目标在空时频三维域上可分性特点解决了时频二维域上杂波覆盖目标的问题,将非合作领域中一般的时频检测方法改进为杂波方位抑制基础上的时频滤波,当目标信号与杂波信号在空时频三维域不重合时,结合阵列天线的方位抑制能力,该方法能够有效地抑制杂波,实现强地杂波背景下的动目标检测^[68,69]。Raout 等提出了一种利用幅度相位估计(amplitude and phase estimation, APES)逐步消除地杂波的算法^[38]。

2.4 目标的检测、定位与跟踪

为了实现对目标的探测与跟踪,系统需要对接收到的目标回波信号进行处理,对目标进行检测、定位与跟踪。非合作无源探测系统的目标检测是在距

离-多普勒 2 维谱上进行的,发展相对成熟,已有的恒虚警检测均可应用,但有时为了改善探测性能,需要通过延长相干处理时间获得较高的信号处理增益,因而考虑由此而带来的距离和多普勒徙动问题是十分必要的^[70]。

要想实现对目标的无源定位与跟踪,获取目标参数如到达方向(DOA)、到达时差(Time Difference of Arrival, TDOA)等是前提,通过这些参数的组合可以形成多种无源定位方法^[71,72]。文献[73]根据时差定位的基本原理,在不能采用直接测量获得时差信息的条件下,提出了一种间接的获取时差信息的方法。刘志强等研究了非合作无源探测中的快速测向方法并分析了阵列误差对无源探测快速测向性能的影响^[74,75]。李军等针对强弱信号并存时信源数和弱信号波达方向难以准确估计的问题,提出了一种基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数同时估计方法^[76]。

通常情况下,非合作无源探测系统对目标的跟踪定位采用多站定位方式。针对多发射站单接收站情况,Kulpa 等提出了两种有效的三维目标定位算法^[77],Radmard 等研究了这种情况下回波和发射机、目标关联起来的方法^[3]。由于多输入多输出(MIMO)能够提供空间分集,从而提高系统目标检测能力^[78,79],很多学者考虑将多输入多输出与非合作无源探测相结合^[4],由数字电视广播辐射源构成的单频网结构为这个想法的实现提供了很大的便利。然而,在单频网结构下,每个目标可能受多个站的照射而检测出多个量测值,且量测值与发射站的对应关系事先未知,于是存在发射源-目标-接收机不确定问题,对此,陶然等提出了基于航迹关联和航迹同源映射的单频网外辐射源雷达目标定位算法,解决了由多个同频发射信号引起的目标定位模糊问题^[80];Radmard 等也对此问题进行了研究^[81],并分析了 MIMO 无源探测系统中接收机位置的选择对系统性能的影响,提出了一种基于丢失检测概率的合理部署接收机方法^[82]。王俊等首次将文化基因(Memetic)算法引入外辐射源定位领域,提出一种基于 Memetic 优化的方位-多普勒联合定位算法^[83]。

3 非合作无源探测的发展趋势

随着各式各样辐射源的涌现与普及,数字信号处理技术和微电子技术的进步与发展,以及应用环境的变化和应用要求的提高,非合作无源探测技术研究在不断发展,发展的趋势受到了越来越多的关注。虽然非合作无源探测系统有多项优点,但其大范围的应用与部署仍受到许多限制,部分关键技术难点还有待研究和突破。为了能充分发挥该系统的优势,提升系统探测性能,需要进一步扩展非合作无源探测研究领域,研究出更有效和更实时的信号处理方法。本文从下述5个方面分析了非合作无源探测研究的发展趋势。

(1) 系统承载平台

已有的非合作无源探测技术研究大都基于地基辐射源或固定基辐射源,近年来,基于机载移动平台的无源探测研究已成为该领域所关注的方向^[84-86]。由于非合作无源探测系统无需发射机,重量轻、体积小,适合机载,通过提升平台高度,可以大大减小目标探测盲区。在未来战争中,将面临快速飞行器的低空突防威胁,因此基于机载平台的非合作无源探测系统将是发展方向之一。但是系统承载平台的运动会带来两个方面的问题:一是使得目标回波与多径杂波之间的相关性增强,利用参考信号来对消多径杂波的同时也会削弱目标回波;二是机载系统在下视探测目标时将面临严重的地海杂波干扰,且由于平台的运动特性使得地海杂波的频谱获得了展宽,杂波有可能覆盖中低速运动目标。因此,研究基于机载移动平台的无源探测中的杂波抑制问题^[87,88],提高系统的目标检测能力与跟踪精度将是接下来的重要研究内容。

(2) 失配滤波器设计

由于非合作无源探测系统是基于非合作辐射源的,也就是说辐射源信号并不是专门针对雷达目标探测设计的,往往不具有较为理想的模糊函数性能,在某种程度上限制了非合作无源探测系统的性能。因此,分析辐射源信号的结构,对信号模糊度产生的原因和特点进行研究,设计失配滤波器来提高系统

检测性能是十分重要的^[19,89]。Palmer 等针对数字视频广播信号的结构,提出了通过先解调、再重调参考信号来设计适配滤波器的信号预处理方法^[37],减轻了信号模糊度,提高了系统的目标检测能力,但这是以产生失配信噪比为代价的。因此,在设计适配滤波器提高系统目标检测能力的同时,也需要考虑如何降低失配信噪比的问题。

(3) 多辐射源-多接收机组网

利用单个辐射源信号的非合作无源探测系统,可利用的信号功率有限,目标探测距离、定位精度和检测性能都受到限制。而拓展辐射源个数和种类,实现多辐射源-多接收机组网探测,能够有效增加系统可利用的信号功率,提升系统的目标探测性能^[3,81,90]。数字电视广播采用的单频网技术能够有效利用频谱资源、降低发射功率并增大信号覆盖范围,同时也为多辐射源-多接收机组网配置提供了现成的条件。通过优化网络布站,采用空间分集技术^[82,91],可以大大改善系统的检测和跟踪性能、扩展系统探测范围,因此,多辐射源-多接收机组网探测研究将成为非合作无源探测系统的一个重要发展方向。

(4) 无源成像

有源雷达的发展经历了常规雷达到成像(ISAR、SAR)的发展过程,同样非合作无源探测系统也会向高分辨率的成像方向发展。作为常规主动雷达成像技术的一大扩展,基于非合作辐射源的无源成像系统由于具有静默接收、隐蔽性强、配置灵活等优点,其研究具有较好的军事应用前景。无源成像对信号要求较高,因此非合作辐射源的选择会对成像效果产生影响。导航卫星信号带宽较大(如Galileo E5的信号带宽约为20MHz),且卫星处于运动状态,可以用来进行无源成像。此外,也可以选用地面电视、广播等信号作为非合作辐射源,其信号带宽相对较小,且辐射源静止,因而需要研究新的成像方法^[92]。虽然目前已有学者对该课题进行了研究,取得了初步成果^[34,44],但是基于非合作辐射源的无源成像系统仍有不少技术难题要解决,其实用化技术将是又一个挑战性课题。

(5) 稀疏信号处理技术

稀疏信号处理理论,特别是近年来压缩感知(compressive sensing,CS)理论的建立和快速发展,为利用稀疏信号处理技术解决非合作无源探测系统中的实际信号处理问题提供了新的研究方向。稀疏信号处理技术给我们提供了一个利用少量目标回波数据来精确获取目标信息的框架,近年来,压缩感知理论和算法得到了快速发展,稀疏信号采样和恢复技术在无源探测方面的应用可以简化系统硬件设计、缩短数据获取时间及减少数据存储和传输量的同时提高系统分辨率^[93,94]。

4 结 论

随着电子战技术、隐身技术及低空快速突防技术的不断进步和高性能反辐射导弹的大规模运用,现有的常规体制雷达系统在对抗“四大威胁”时,已显现出其固有的缺陷,近几场高技术局部战争充分说明了这一点,这就对新的防空系统提出了新的要求,如提高低空快速隐身目标的探测能力,增强在硬打击下的生存能力及保证在复杂电磁环境下的工作能力等。作为常规雷达目标探测技术的一种补充手段,非合作无源探测系统很好地满足了上述要求,适应了构建有源/无源综合防空预警探测系统的趋势,因而得到了各军事强国的广泛关注和大量研究投入。我国非合作无源探测系统的发展应当充分借鉴国外的研究成果,立足国内现有技术基础,在各种军事需求和民用需求牵引下积极探索、攻坚克难,拓展更为广阔的应用领域,相信在未来十年里,我国非合作无源探测技术研究将步入快速发展时期。

参考文献

- [1] Tan D K, Lesturgie M, Sun H, et al. Space-time interference analysis and suppression for airborne passive radar using transmissions of opportunity. *IET Radar Sonar Navig.*, 2014, 8(2): 142-152
- [2] Masjedi M, Hashemi M M, Sadri S. Theoretical approach for target detection and interference cancellation in passive radars. *IET Radar Sonar Navig.*, 2013, 7(3): 205-216
- [3] Radmard M, Karbasi S M, Khala B H, et al. Data association in multi-input single-output passive coherent location schemes. *IET Radar Sonar Navig.*, 2012, 6(3): 149-156
- [4] Tharmarasa R, Subramaniam M, Nadarajah N, et al. Multitarget passive coherent location with transmitter-origin and target-altitude uncertainties. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(3): 2530-2550
- [5] Colone F, Langelotti D, Lombardom P. DVB-T signal ambiguity function control for passive radars. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2014, 50(1): 329-347
- [6] Gogineni S, Nehorai A. Target estimation using sparse modeling for distributed MIMO radar. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2011, 59(11): 5315-5325
- [7] Baker C J, Griffiths H D, Papoutsis I. Passive coherent location radar systems. Part2: Waveform properties. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2005, 152(3): 160-168
- [8] 杨博. 空基辐射源非合作探测系统关键技术研究: [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学, 2011
- [9] Griffiths H D, Long N R W. Television-based bistatic radar. *IEE Proceedings, Pt F*, 1986, 133(7): 649-657
- [10] Howland P E. Target tracking using television based bistatic radar. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 1999, 146(3): 166
- [11] Howland P E, Maksimiuk D, Reitsma G. FM radio based bistatic radar. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2005, 152(3): 107-115
- [12] Hawkins J M. An opportunistic bistatic radar. In: *IEE Radar Conference*, California, US, 1997. 318-322
- [13] 朱庆明, 吴曼青. 一种新型无源探测与跟踪雷达系统——“沉默哨兵”. *现代电子*, 2000, 70(1): 1-6
- [14] Millet N, Klein M. Passive radar air surveillance: last results with multi-receiver systems. In: *Proceedings of the International Radar Symposium (IRS)*, Leipzig, Germany, 2011. 281-285
- [15] Kuschel H, Heckenbach J, Schell J, et al. Passive radar for homeland defence (PAMELA trials, a multi-national measurement campaign). In: *Proceedings of the International Radar Symposium (IRS)*, India, 2009. 1-5

- [16] Anniballi E, Cardinali R. A new architecture to increase security of Air Traffic Control system. In: Proceedings of the European Radar Conference (EuRAD), Manchester, England, 2011. 357-360
- [17] 王海涛, 王俊, 刘玉春. 基于两步空域滤波的 GSM 辐射源雷达干扰抑制. 系统工程与电子技术, 2013, 35(4): 740-744
- [18] 王俊, 赵洪立, 张守宏等. 非合作连续波雷达中存在强直达波和多径杂波的运动目标检测方法. 电子学报, 2005, 33(3): 419-424
- [19] 王海涛, 王俊. 模拟电视视频和音频信号的无源雷达失配滤波技术. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2013, 40(5): 18-23
- [20] 高志文, 陶然, 单涛. 外辐射源雷达互模糊函数的两种快速算法. 电子学报, 2009, 37(3): 669-672
- [21] 高志文, 陶然, 单涛. DVB-T 辐射源雷达信号模糊函数的副峰分析与抑制. 电子学报, 2008, 36(3): 505-509
- [22] Tao R, Gao Z, Wang Y. Side peaks interference suppression in DVB-T based passive radar, *IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems*, 2012, 48(4): 3610-3619
- [23] Tao R, Wu H, Shan T. Direct-path suppression by spatial filtering in digital television terrestrial broadcasting-based passive radar. *IET Radar Sonar Navig*, 2010, 4(6): 791-805
- [24] 万显荣, 岑博, 程丰等. 基于 CMMB 的外辐射源雷达信号模糊函数分析与处理. 电子与信息学报, 2011, 30(10): 2489-2493
- [25] 易建新, 万显荣, 方亮等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达相干积累的非均匀采样实现. 电子与信息学报, 2012, 34(11): 2648-2653
- [26] 万显荣, 岑博, 易建新等. 中国移动多媒体广播外辐射源雷达参考信号获取方法研究. 电子与信息学报, 2012, 34(2): 338-343
- [27] 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. 雷达学报, 2012, 1(1): 11-18
- [28] Zhao Z, Wan X, Zhang D, et al. An experimental study of HF passive bistatic radar via hybrid sky-surface wave mode. *IEEE Trans on Antennas and Propagation*, 2013, 61(1): 415-424
- [29] 赵志欣, 万显荣, 邵启红等. DRM 无源雷达多径杂波的分载波空域抑制. 华中科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(3): 13-17
- [30] 金威, 吕晓德, 向茂生. 基于 DVB-S 信号的外辐射源雷达的模糊函数及分辨特性分析. 雷达学报, 2012, 1(4): 380-386
- [31] 赵东耀, 吕晓德, 李纪传等. 基于插值理论的分数延迟杂波自适应对消算法. 系统工程与电子技术, 2013, 35(7): 1409-1414
- [32] 徐定杰, 吕东泽, 沈锋. GPS 辐射源的无源雷达两级干扰抑制方法. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(3): 336-341
- [33] 徐定杰, 吕东泽, 沈锋. 基于改进子空间投影的无源雷达弱目标检测方法. 宇航学报, 2011, 32(10): 2221-2227
- [34] Liu C, Chen W. Sparse self-calibration imaging via iterative MAP in FM-based distributed passive radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2013, 10(3): 538-542
- [35] Poullin D. Passive detection using digital broadcasters (DAB, DVB) with COFDM modulation. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2005, 152(3): 143-152
- [36] Malanowski M, Kulpa K, Olsen K E. Extending the integration time in DVB-T based passive radar. In: Proceedings of the European Radar Conference (EuRAD), Manchester, England, 2011. 190-193
- [37] Palmer J E, Harms H A, Searle S J, et al. DVB-T passive radar signal processing. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2013, 61(8): 2116-2126
- [38] Raout J, Santori A, Moreau E. Space-time clutter rejection and target passive detection using the APES method. *IET Signal Processing*, 2010, 4(3): 298-304
- [39] Adjrad M, Woodbridge K. Multistatic target tracking in DAB/DVB-T networks. In: Proceedings of the Radar IEEE CIE International Conference, Chengdu, China, 2011. 42-45
- [40] Gill L P, Grenier D, Chouinard J Y. Use of XMTM radio satellite signal as a source of opportunity for passive coherent location. *IET Radar Sonar Navig*, 2011, 5(5): 489

- 536-544
- [41] Stinco P, Greco M S, Gini F, et al. Ambiguity function and Cramer-Rao bounds for universal mobile telecommu-
nications system-based passive coherent location systems. *IET Radar Sonar Navig*, 2012, 6(7): 668-678
- [42] Gogineni S, Rangaswamy M, Rigling B D, et al. Cramer-
Rao bounds for UMTS-based passive multistatic radar. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2014, 62(1): 95-106
- [43] Maio A D, Foglia G, Pasquino N, et al. Measurement
and comparative analysis of clutter for GSM and UMTS
passive radars. *IET Radar Sonar Navig.*, 2010, 4(3):
412-423
- [44] Wang W. GPS-based time & phase synchronization pro-
cessing for distributed SAR. *IEEE Trans on Aerospace
and Electronics Systems*, 2009, 45(3): 1040-1051
- [45] 杨进佩, 刘中, 朱晓华. 用于无源雷达的 GPS 卫星信
号性能分析. 电子与信息学报, 2007, 29(5): 1083-
1086
- [46] Vespe M, Sciotti M, Greidanus H, et al. Potential of
passive-AIS technology. *Electronics Letters*, 2010, 46
(20): 1-2
- [47] Woodbridge K, Guo H, Mason D, et al. Ambiguity func-
tion analysis of wireless LAN transmissions for passive ra-
dar. *IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems*,
2011, 47(1): 240-264
- [48] Colone F, Falcone P, Bongioanni C, et al. WiFi-based
passive bistatic radar: data processing schemes and ex-
perimental results. *IEEE Trans on Aerospace and Elec-
tronics Systems*, 2012, 48(2): 1061-1079
- [49] Wang Q, Hou C, Lu Y. An experimental study of
WiMAX-based passive radar. *IEEE Trans on Microwave
Theory and Techniques*, 2010, 58(12): 3502-3510
- [50] Colone F, Cardinali R, Lombardo P, et al. Space-time
constant modulus algorithm for multipath removal on the
reference signal exploited by passive bistatic radar. *IET
Radar Sonar Navig*, 2009, 3(3): 298-309
- [51] 吴海洲, 陶然, 单涛. 基于 DTTB 照射源的无源雷达
直达波干扰抑制. 电子与信息学报, 2009, 3(9):
2033-2038
- [52] 李辉, 何友, 唐小明等. 非合作双基地雷达中直达波
信号的重构. 系统工程与电子技术, 2010, 32(10):
2025-2030
- [53] Coleman C, Yardley H. Passive bistatic radar based on
target illuminations by digital audio broadcasting. *IET
Radar Sonar Navig*, 2008, 2(5): 366-375
- [54] 刘志强, 马红光, 杨利锋. 强干扰下无源雷达弱目标
探测. 西南交通大学学报, 2008, 43(6): 782-787
- [55] 刘志强, 马红光, 杨利锋. 非合作无源探测系统接收
机设计. 数据采集与处理, 2008, 23(3): 372-376
- [56] 王魁, 陶然, 单涛. 基于波束聚焦的外辐射源雷达干
扰抑制技术研究. 兵工学报, 2010, 31(12): 1557-
1561
- [57] 朱家兵, 洪一, 陶亮等. 基于自适应分数延迟估计的
FM 广播辐射源雷达直达波对消. 电子与信息学报,
2007, 29(7): 1674-1677
- [58] Wang H, Wang J, Li H. Target detection using CDMA
based passive bistatic radar. *Journal of Systems Engineer-
ing and Electronics*, 2012, 23(6): 858-865
- [59] Meller M. Cheap cancellation of strong echoes for digital
passive and noise radar. *IEEE Trans on Signal Process-
ing*, 2012, 60(5): 2654-2655
- [60] Kulpa K S, Czeka Z. Masking effect and its removal in
PCL radar. *IEE Proc Radar Sonar Navig*, 2005, 152
(3): 173-177
- [61] 刘志强, 马红光, 杨利锋. 基于混合模型的强直达波
与多经杂波消除. 现代雷达, 2008, 30(6): 57-61
- [62] 赵东耀, 吕晓德, 李纪传等. 基于插值理论的分数延
迟杂波自适应对消算法. 系统工程与电子技术,
2013, 35(7): 1409-1414
- [63] Colone F, O'Hagan D W, Lombardo P, et al. A multi-
stage processing algorithm for disturbance removal and
target detection in passive bistatic radar. *IEEE Trans on
Aerospace and Electronics Systems*, 2009, 42(2): 698-
722
- [64] 吕东泽, 徐定杰, 沈锋. 基于 ICSA-MWF 的多级投影
干扰抑制方法. 系统工程与电子技术, 2012, 34(4):
686-691
- [65] Fabrizio G, Colone F, Lombardo P, et al. Adaptive
beamforming for high-frequency over-the-horizon passive
radar. *IET Radar Sonar Navig*, 2009, 3(4): 384-405

- [66] 杨博,周一宇,黄知涛. 基于非合作空基运动平台连续波信号照射的无源雷达杂波建模. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(6): 586-592
- [67] 杨博,周一宇,黄知涛. 空基运动平台照射源的无源雷达杂波建模. 电波科学学报, 2009, 24(6): 1099-1104
- [68] 杨博,周一宇,黄知涛. 非合作运动辐射源照射的目标检测方法研究. 宇航学报, 2011, 32(3): 582-591
- [69] 杨博,周一宇,黄知涛. 基于杂波方位抑制的无源雷达目标检测方法研究. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(6): 586-593
- [70] 杨金禄,单涛,陶然. 数字电视辐射源雷达的相参积累徙动补偿方法. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 407-411
- [71] Hack D E, Patton L K, Himed B, et al. Centralized passive MIMO radar detection without direct-path reference signals. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2014, 62(11): 3013-3023
- [72] 宋杰,何友,蔡复青等. 非合作双基地雷达参数测量与定位方法研究. 系统工程与电子技术, 2008, 30(7): 1206-1209
- [73] 杨博,黄知涛,周一宇. 基于空间非合作运动辐射源照射的目标定位研究. 宇航学报, 2008, 29(1): 224-229
- [74] 刘志强,马红光,杨利锋. 非合作无源探测中的快速测向. 电波科学学报, 2008, 23(3): 585-591
- [75] 刘志强,马红光. 阵列误差对无源探测快速测向性能的影响. 西南交通大学学报, 2010, 45(4): 609-614
- [76] 徐亮,曾操,廖桂生等. 基于特征波束形成的强弱信号波达方向与信源数估计方法. 电子与信息学报, 2011, 33(2): 321-325
- [77] Malanowski M, Kulpa K. Two methods for target localization in multistatic passive radar. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(1): 572-580
- [78] 李军,刘红明,何子述等. 一种多频外辐射源雷达信号相参处理方法. 电子学报, 2011, 39(12): 2890-2894
- [79] 李军,李会勇,刘红明等. 基于多输入多输出技术的无源雷达信号模型. 电波科学学报, 2011, 26(4): 802-807
- [80] 高志文,陶然,王越. 单频网数字电视广播辐射源雷达目标定位算法. 兵工学报, 2010, 31(6): 791-795
- [81] Radmard M, Karbasi S M, Nayebi M M. Data fusion in MIMO DVB-T-based passive coherent location. *IEEE Trans on Aerospace and Electronics Systems*, 2013, 49(3): 1725-1737
- [82] Radmard M, Khalaj B H, Chitgarha M M, et al. Receivers' positioning in multiple-input multiple-output digital video broadcast-terrestrial-based passive coherent location. *IET Radar Sonar Navig*, 2012, 6(7): 603-610
- [83] 同非,王俊,李红伟. Memetic 优化的外辐射源雷达方位-多普勒定位新方法. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2012, 39(4): 57-64
- [84] Brown J, Woodbridge K, Stove A, et al. Air target detection using airborne passive bistatic radar. *Electronics Letters*, 2010, 46(20): 1396-1397
- [85] Kulpa K, Malanowski M, Samczynski P, et al. The concept of airborne passive radar. In: *Proceedings of the Microwaves, Radar and Remote Sensing Symposium (MRRS)*, Kiev, Ukraine, 2011. 267-270
- [86] Tan D K P, Lesturgie M, Sun H, et al. Target detection performance analysis for airborne passive bistatic radar. In: *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Honolulu, USA, 2012. 3553-3556
- [87] Dawidowicz B, Kulpa K, Malanowski M, et al. DPCA detection of moving targets in airborne passive radar. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems*, 2012, 48(2): 1347-1357
- [88] Tan D K P, Lesturgie M, Sun H, et al. Signal analysis of airborne passive radar using transmissions of opportunity. In: *Proceedings of the IEEE CIE International Conference on Radar*, Chengdu, China, 2011. 169-172
- [89] Wang H, Wang J, Zhong L. Mismatched filter for analogue TV-based passive bistatic radar. *IET Proc on Radar Sonar and Navig.*, 2011, 5(5): 573-581
- [90] 万红,李申堂,冯向荣等. 基于 FM 广播的 MIMO 无源雷达性能分析. 现代雷达, 2008, 30(3): 30-33
- [91] Gumiero F, Santarelli S, Bongioanni C. Using real data for the implementation of multistatic passive radar geometry

try optimization procedure. In: Proceedings of the European Radar Conference (EuRAD), Manchester, England, 2011. 93-96

[92] 刘玉春, 王俊, 杨杰等. 基于单频连续波的无源雷达成像研究. 电子与信息学报, 2013, 35(5): 1108-1113

[93] 王海涛, 王俊. 基于压缩感知的无源雷达超分辨 DOA 估计. 电子与信息学报, 2013, 35(4): 877-881

[94] Berger C R, Demissie B, Heckenbach J, et al. Signal processing for passive radar using OFDM waveforms. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2010, 4(1): 226-238

Development and prospect of passive detection technology based on non-cooperative illuminators

Ying Tao, Huang Gaoming, Zuo Wei, Gao Jun
(College of Electronic Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract

The development and prospect of non-cooperative passive detection is presented after illustrating the principle and characteristics of non-cooperative passive detection technology. To begin with, the domestic and overseas research development of non-cooperative passive detection is introduced. Followed is the commentary on the key techniques and problems of non-cooperative passive detection, including the illuminating signal analysis, reference signal extraction, interference rejection and target detection, location and tracking. Finally, the prospects of non-cooperative passive detection are given.

Key words: non-cooperative illuminator, passive detection, target location and tracking