

引用格式:田思源,黄建冲,陈秋菊,等.时间反演技术在电子对抗中的应用及趋势分析[J].电光与控制,2020,27(4):55-60. TIAN S Y, HUANG J C, CHEN Q J, et al. Application of time reversal technology in electronic countermeasure and the trend analysis [J]. Electronics Optics & Control, 2020, 27(4):55-60.

时间反演技术在电子对抗中的应用及趋势分析

田思源¹, 黄建冲¹, 陈秋菊¹, 王伟²

(1. 国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037; 2. 中国人民解放军93046部队,山东 青岛 266109)

摘要: 时间反演电磁波具有的近、远场超分辨率聚焦特性和空时自适应聚焦特性,使得时间反演电磁波在超分辨率成像、高精度定位、低能耗保密通信等方面有着巨大的应用前景。总结了时间反演技术的研究现状,结合电子战领域的发展趋势,分析时间反演电磁波在电子对抗领域的技术优势及应用前景,并提出下一步的研究重点。

关键词: 时间反演电磁波; 电子对抗; 应用趋势

中图分类号: TN972 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2020.04.011

Application of Time Reversal Technology in Electronic Countermeasure and the Trend Analysis

TIAN Siyuan¹, HUANG Jianchong¹, CHEN Qiuju¹, WANG Wei²

(1. College of Electronic Countermeasures, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China;

2. No. 93046 Unit of PLA, Qingdao 266109, China)

Abstract: The time-reversal electromagnetic waves have the characteristics of adaptive spatio-temporal focusing and super-resolution focusing in the near field and the far field. These characteristics enable the time-reversal electromagnetic waves to have great application prospects in super-resolution imaging, high-precision positioning, low-energy secure communication and so on. The research status of time reversal technology is summarized. In view of the development trend of electronic warfare, the technical advantages and application prospects of time-reversal electromagnetic waves in electronic countermeasure are analyzed, and the research emphasis in the next step is proposed.

Key words: time-reversal electromagnetic wave; electronic countermeasure; application trend

0 引言

自海湾战争以来,电子战已经成为现代战争中一种重要的作战形式。对于电子战而言,其本质是对战场电磁频谱的争夺与控制,进而控制以电磁频谱为载体的战场信息,使战争转化为对己方有利的非对称战争。自20世纪80年代以来,通信、雷达和光电技术发展迅速,日益复杂的战场电磁环境和反辐射武器的出现对电子对抗系统提出了更高的要求。与此同时,电子对抗系统也在由传统的“硬件化”向“软件化”再向“认知化”转变^[1-4]。结合目前的热点研究项目时间反演电磁波技术,分析了时间反演电磁波技术在电子战

领域的技术优势、应用前景以及目前的研究现状,并展望下一步的研究方向。

1 时间反演技术的概念及研究现状

时间反演(Time Reversal, TR)技术是对光学领域中相位共轭法的一种推广,1989年FINK等提出了时间反演的概念并且首先在声学领域得到应用^[5]。2004年LEROSEY等将TR技术引入电磁学领域^[6],基本原理是将天线接收到的信号在时域上进行反转,然后发射出去。该技术建立在电磁场矢量波动方程和电磁场互易定理的基础之上。获取时间反演信号的方法可分为两种,即基于数字信号处理的时间反演和基于模拟信号处理的时间反演。

1.1 基于数字信号处理的时间反演

对数字信号在时域进行时间反演操作的原理如图1所示。

收稿日期:2019-03-26

修回日期:2019-04-26

基金项目:安徽省自然科学基金(1708085QF149)

作者简介:田思源(1996—),男,安徽合肥人,硕士生,研究方向为电磁波空间功率合成技术。

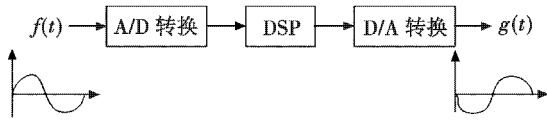


图1 数字信号时域时间反演处理原理框图
Fig.1 Schematic of time inversion processing of digital signal in time domain

对信号进行 A/D 转换,利用数字信号处理技术(DSP)实现信号翻转,再进行 D/A 转换得到时间反演信号。对数字信号在频域实现时间反演的原理如图2所示。

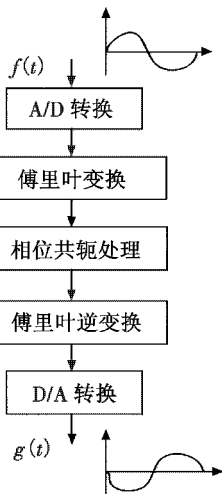


图2 数字信号频域时间反演处理原理框图
Fig.2 Schematic of time inversion processing of digital signal in frequency domain

信号在时域上的翻转等同于在频域上对各个频率分量做相位共轭变换。对采样后的数字信号进行傅里叶变换得到信号频谱,对各频率分量做相位共轭处理,再由傅里叶逆变换得到时域时间反演信号。

由于受 ADC 设备采样速率的限制,基于数字信号的时间反演变换只适用于低频信号,如在声波、超声波时间反演系统中该技术的应用比较成熟。虽然利用一些高端的研究设备,如任意波形发生器(AWG)、高端示波器(DSA)等可以实现微波频段信号的时间反演,但由于其成本高、设备复杂,都很难得到大规模运用。有学者考虑将方向回溯天线系统中的相位共轭技术运用于宽带信号的时间反演^[7],但也存在一些局限性,主要表现在:首先,该技术只能处理周期性的宽带信号,对于非周期性的一般信号则不适用;其次,基于数字信号处理技术的相位共轭处理所需时间较长,对信号变化的响应较差;另外,相位共轭处理中外加的本振频率源会限制系统能够处理的信号的工作频段。

所以,基于数字信号处理技术的高频信号时间反演实现还存在许多问题亟待进一步研究解决。

1.2 基于模拟信号处理的时间反演

基于时域成像原理可以直接对模拟信号进行时间反演操作,具体实现方案可以根据时间反演过程中信号形式变化分为微波光子技术和全电子技术两类。

根据光波的色散补偿原理,利用微波光子技术实现时间反演操作的原理如图3所示。

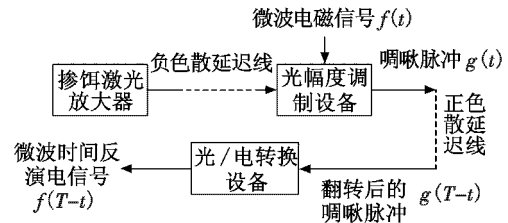


图3 基于微波光子技术的时间反演原理框图
Fig.3 Schematic of time inversion based on microwave photonic technology

利用掺铒激光放大器发射超短光脉冲,经过负色散光纤后光脉冲发生色散,输入微波电磁信号对光脉冲进行调制,调制后的信号经过正色散光纤,正色散对负色散光脉冲进行补偿,脉冲波形被压缩,进一步加大正色散补偿会使脉冲波形在时域上翻转,最后通过光/电转换器件得到翻转后的微波信号,即实现微波信号的时间反演。该方法具有系统时间带宽积高、分辨率高等优点,但是需要用到激光源以及电/光和光/电转换设备,导致系统成本高,设备结构复杂。

全电子技术方案相比微波光子技术方案更易实现,成本更低并且易于集成,其原理如图4所示。

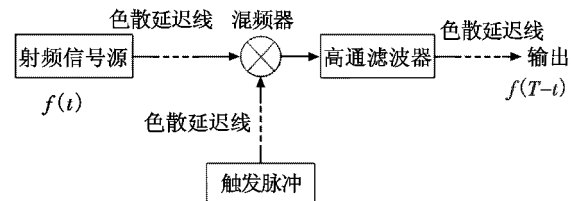


图4 基于全电子技术的时间反演原理框图
Fig.4 Schematic of time inversion based on full-electronic technology

由图4可知,射频信号经过色散延迟线形成啁啾脉冲,与触发脉冲经过色散延迟线形成的啁啾脉冲一起输入混频器进行平方相位调制,最后通过滤波和色散延迟处理得到时间反演信号。

微波光子技术和全电子技术中都要利用色散延迟线对信号进行处理,通过设置色散延迟线不同的群时延斜率,可以实现信号的时域波形拉伸、压缩以及翻转,所以需选择合适的群时延斜率以达到信号时间反演的目的。

1.3 时间反演技术的应用

时间反演电磁波的近场、远场超分辨率聚焦特

性^[8-9]和空时同步聚焦特性^[10-12]使得TR技术在超分辨率成像、高精度定位、低能耗保密通信等方面有着巨大的应用前景。

1.3.1 在雷达领域的应用

时间反演技术可以用来改善SAR雷达的探测和成像效果。其基本工作原理为:时间反演雷达阵列辐射电磁波照射目标区域,接收目标区域的回波,并对回波信号进行时间反演处理后再发射出去。由于时间反演电磁波的空时同步聚焦特性,再次发射出去的电磁波会聚焦于目标物所在位置。针对TR信号在成像过程中无法应对多目标的情况^[13],1996年PRADA等^[14]提出了时间反演算子(Time Reversal Operator, TRO)的概念,基于此概念得到两种时间反演信号的处理方法:1)时间反演算子分解法(Decomposition of the Time Reversal Operator, DORT)^[15-16];2)时间反演多重信号分类法(Time Reversal Multiple Signals Classification, TR-MUSIC)^[17-18]。MOURA等^[19-20]提出了时间反演自适应干扰消除技术(TRAIC),通过实验将TRAIC技术成功地运用于SAR雷达成像系统,并验证了采用时间反演技术的SAR雷达性能优于传统的SAR雷达^[21-22]。

1.3.2 在通信领域的应用

时间反演技术在通信领域主要用来改善恶劣环境下的通信质量。2006年,QIU等^[23]对采用时间反演技术的超宽带通信系统的可行性进行了理论分析与实验验证。2012年,QIU等又成功搭建了基于现场可编程逻辑门阵列(FPGA)的超宽带多输入多输出时间反演通信系统,通过实验验证了该技术可以有效提高通信的质量及稳定性。

2010年,NAQVI等^[24]和DUBOIS等^[25]利用亚波长微结构阵列天线,结合时间反演技术成功突破了衍射极限,验证了时间反演电磁波具有超分辨率聚焦特性。目前,国内某些研究机构对基于时间反演的超宽带通信技术也进行了较为系统的研究^[26-28]。

1.3.3 在其他领域的应用

2010年,DAVY等^[29]采用TR技术利用8个低功率源合成得到了一个功率较高的微波信号。美国佛罗里达大学在2007年申请了将时间反演技术应用于高功率微波武器的专利^[30],但至今仍未有对相关武器系统进行试验验证的报道。

2012年,TREFNA等^[31]提出利用基于时间反演技术的功率合成方法进行微波热疗,并建立了试验系统,进行了初步的调试和验证,但目前还未见到进一步的研究报道。

2015年,中国某大学申请了基于时间反演技术的电磁对消主动隐身方法的专利^[32]。该技术首先利用

Clean算法获取敌方雷达与己方对消信号发射天线之间的信道冲激响应,再将信道冲激响应在时域上进行翻转并调制到回波信号上,由此得到对消信号,最后将对消信号发射出去,通过聚焦传输,将对消信号聚焦于敌方雷达接收机天线处,消除己方目标物本身回波信号,达到主动隐身的目的。

2 时间反演在电子对抗领域的技术优势

传统的电子对抗多采用“一对一”的干扰模式,即单部干扰设备干扰单部目标设备。在目标设备独立运行且工作体制简单的情况下,这种干扰模式效率很高。但随着电子设备的工作体制越来越复杂,传统电子干扰方法很难达到理想的干扰效果,具体表现在:1)仅靠单部干扰设备难以获得足够高的功率;2)传统电子干扰辐射电磁波多呈扇面,容易对己方电子设备造成电磁误扰。另外,单部干扰设备或密集布阵的干扰机集群物理形态较大,容易被敌方测向定位,易受反辐射武器的攻击,系统抗打击能力较弱。

早在2009年,美国DARPA战略技术办公室^[33]率先提出了精确电子战的概念:“精确电子战的目的在于设计并验证一个按照特殊稀疏阵部署的原型系统,该系统包含诸多地面和/或空中节点,可规划射频能量,使相干功率聚焦在一小片感兴趣区域(如孔径尺寸为100 m)内,从而对该区域内敌方的通信、雷达等辐射源信号进行精确的外科手术式干扰,而不影响或干扰附近其他区域内友军的信号”。精确电子战的实现途径是利用分散布阵的干扰站,通过组织协调使各干扰站辐射的干扰信号在指定区域内相干合成。以上过程涉及到的关键技术包括电磁波的空间功率合成和相干干扰信号的产生。

目前实现电磁波空间功率合成的方法主要为采用类似相控阵雷达的相位控制方法,如图5所示。

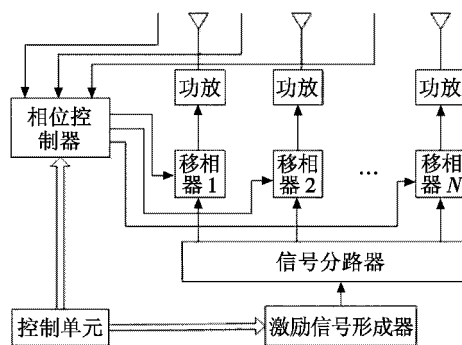


图5 密集式阵列相干功率合成原理框图

Fig. 5 Schematic diagram of power synthesis of signals emitted by dense arrays

该方法通过精确控制发射信号到达目标区域的相

位,使信号实现相干合成。而对于分布式布阵的干扰阵列而言,干扰站之间的距离往往在数百至上千米,干扰站与干扰目标区域之间的距离甚至可以达到几十千米,在这种情况下,采用传统相位控制方法产生的相干信号很难克服多径效应的影响,所以很难在目标区域获得较好的信号合成效果。

结合 TR 电磁波的特性以及目前高功率微波的空间功率合成、微波相位精确控制等技术难点可以发现,TR 技术在电子对抗领域有着明显的技术优势和巨大的应用前景。其技术优势大致有以下几点。

1) 确保干扰信号的相干性。

相干干扰信号产生方面,可以直接对接收到的敌方雷达信号进行时间反演操作再发射出去,时间反演干扰信号可以实现时域相位自适应相干、频域频率自适应对准、空域方向自适应回溯,不需要己方另行设计干扰信号,保证了干扰的及时性和高效性。

2) 增强系统的鲁棒性。

TR 电磁波系统在恶劣电磁环境下的鲁棒性强。在存在多径效应的传播环境中,TR 电磁波可以利用信道的多径效应等效扩大接收阵列口径,获取更多的有用信号;自适应回溯特性可以使各阵元辐射的时间反演信号回溯至辐射源处并实现精确的相干合成,且多径效应越丰富,信号的聚焦效果越明显。

3) 提升干扰设备的战场生存率。

基于 TR 技术建立的采用稀疏阵列布阵的电子对抗系统具有单部干扰设备功耗低、干扰信号合成效率高等优点,可以降低被敌方进行精确测向定位的概率,并能有效对抗反辐射武器的攻击,战场生存率大大提高。

已有学者对基于分布式阵列的时间反演电磁波的空间功率合成技术进行了较为系统的研究^[34-37]。研究的内容包括采用分布式阵列的单频时间反演信号功率合成建模与仿真,信号波束干涉合成建模及信号交汇区域特征提取算法等。通过研究验证了时间反演技术在电磁波的空间功率合成领域的可行性和技术优势,也为该技术在电子对抗领域的应用打下了基础。

3 时间反演技术在电子对抗领域的应用趋势分析

目前武器装备的综合化趋势越来越明显,电子对抗系统的一体化、智能化、网络化程度不断提高;赛博空间的范围不断扩大,网络攻防对象已经从最初的因特网迅速扩展为涵盖电信、卫星、电力、能源、运输等关键基础设施;空间信息对抗已经成为传统电子对抗领域一个新的制高点^[38]。

结合电子战本身的发展趋势,认为时间反演技术

在电子对抗领域的应用将会朝着以下几个方向发展。

3.1 精确化发展方向

传统的粗放式干扰存在诸多缺点,如干扰设备容易被敌方侦察测向定位、容易对己方形成电磁误扰、难以获得足够高的功率等,所以电子干扰的精确化是未来战争的基本要求。电子干扰精确化可分为两种类型:1) 针对特定目标辐射源的精确电子干扰,在该种干扰模式下,系统已经掌握了诸如目标设备工作频段、目标设备信号调制方式等先验信息,在对辐射源信号进行高精度参数测量的基础上对辐射源进行个体识别,判断是否为目标辐射源设备,若确定是目标设备,则对其进行精确干扰;2) 针对特定区域的精确电子干扰,在该种干扰模式下,在目标区域设置信标,系统各阵元接收信标信号,进行时间反演操作生成干扰信号,对目标区域实施精确干扰。两种干扰模式如图 6、图 7 所示。

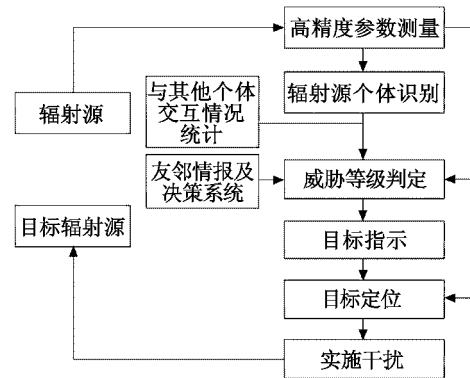


图 6 特定目标电子对抗系统原理图

Fig. 6 Schematic of electronic countermeasure system against a specific target

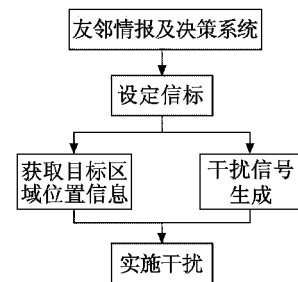


图 7 特定区域电子干扰系统基本原理图

Fig. 7 Basic principle of electronic jamming system in a specific area

通过计算机仿真可以发现,基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号功率合成的效率较高,通过部署合理的阵型,得到的信号聚焦区域形状也可以很好地满足电子对抗精确化的要求^[35]。

3.2 智能化发展方向

随着近几年人工智能的迅猛发展,在电子对抗领域也出现了一个新的概念——认知电子战。2016 年 2

月,美国《国家利益》杂志报道称,DARPA 正致力于开发基于人工智能的新型电子战系统。2016年5月,英国《简氏防务评论》报道,美国海军正在研究将自适应电子战行为学习项目开发的技术应用于反简易爆炸装置^[39]。

未来采用时间反演技术的电子对抗装备将会搭载在某些人工智能平台上,比如智能无人机、智能无人车等。智能时间反演干扰系统工作原理如图8所示,平台上搭载多种传感器与通讯设备,可通过态势感知获取周围战场的实时信息,并将信息及时反馈至上级指挥机构,电子对抗集群内的各个智能平台可以实现数据共享。利用平台的深度学习及自主决策能力,结合上级指挥机构传送的战场信息,通过设定所搭载时间反演干扰设备的发射功率和选择干扰设备辐射信号的样式,可以灵活实现对敌方电子设备的精确测向定位、精确高功率微波毁伤、压制性干扰、欺骗性干扰以及对己方设备的主动电磁对消隐身,真正实现电子对抗装备的多功能化、智能化。

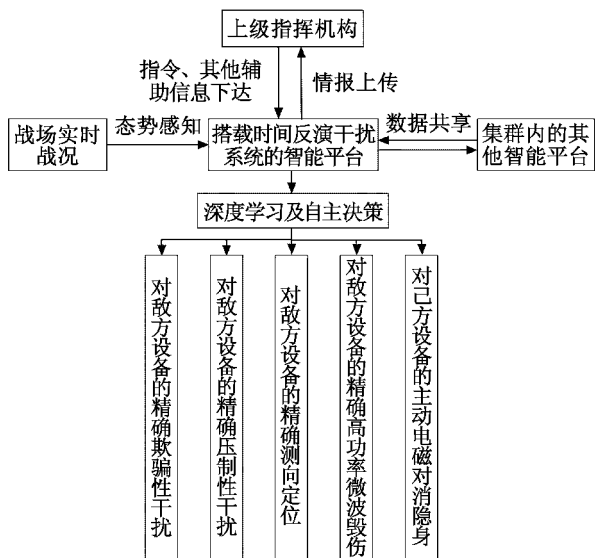


图8 智能时间反演干扰系统工作原理图

Fig. 8 Working principle diagram of intelligent time inversion jamming system

3.3 系统化发展方向

现代战争早已不是敌我双方单一类型的武器装备之间的对抗,而是武器装备体系之间的对抗。未来搭载时间反演技术的电子对抗装备也应形成一个完整的装备体系,大到星载电子对抗设备、陆基高功率远程干扰设备,小到单兵便携式干扰站。

除了某类型装备的系统化建设,世界各军事强国都在加快指挥、控制、通信、计算机、情报、侦察与监视系统(C⁴ISR)的建设,即不同武器系统之间的系统化。C⁴ISR系统包含的电子设备可以实现目标搜索与识别、跟踪、决策、攻击和效能评估、战场态势评估等。时

间反演技术在目标侦察、超分辨率成像、低功耗保密通信、电子攻击及防御方面都有良好的应用前景,可以考虑将时间反演技术整合进C⁴ISR系统中,以提高系统的整体性能。

4 展望

目前,时间反演电磁波在电子对抗领域的研究刚刚起步,想要建设完善的基于时间反演技术的电子战系统并运用于实战还有很长的路要走,就现状而言,以下3个方面值得深入研究。

1) 之前的研究大多以单频信号为研究对象,而实际战场的电磁环境更为恶劣,信号样式繁杂且多变,需要对各种不同体制信号在时间反演操作过程中自相关性、功率谱特性的变化,以及合成过程中的干涉特性的变化进行深入研究。

2) 从系统层面完善时间反演操作的相关电路设计,解决对高频段信号进行时间反演操作时信号失真的问题;解决系统中各阵元组织协调问题,保证各阵元时钟高度同步。

3) 开展外场实物实验,研究信号体制、阵型部署、节点天线方向和极化特性等因素对信号聚焦效果的影响。

参考文献

- [1] 李延轩,赵智亿,赵阳. 浅议精确电子对抗[J]. 国防科技,2008,29(3):49-52.
- [2] 赵国庆. 雷达对抗原理[M]. 2版. 西安:西安电子科技大学出版社,2015.
- [3] 张春磊,杨小牛. 认知电子战初探[J]. 通信对抗,2013(2):1-4.
- [4] PARVULESCU A, CLAY C S. Reproducibility of signal transmissions in the ocean[J]. Radio and Electronic Engineer, 1965, 29(4):223-228.
- [5] FINK M, PRADA C, WU F, et al. Self focusing in inhomogeneous media with time reversal acoustic mirrors[C]// Proceedings of IEEE Ultrasonics Symposium, 1989:681-686.
- [6] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Time reversal of electromagnetic waves[J]. Physical Review Letters, 2004, 92(19):193904-193906.
- [7] ZHAI H Q, SHA S S, SHENOY V K, et al. An electronic circuit system for time-reversal of ultra-wideband short impulses based on frequency-domain approach[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(1):74-86.
- [8] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Time reversal of wideband microwaves[J]. Applied Physics Letters, 2006, 88(15):154101-1-154101-3.

- [9] CARMINATI R, PIERRAT R, DE ROSNY J, et al. Theory of the time reversal cavity for electromagnetic fields[J]. *Optics Letters*, 2007, 32(21):3107-3109.
- [10] LEROSEY G, DE ROSNY J, TOURIN A, et al. Focusing beyond the diffraction limit with far-field time reversal[J]. *Science*, 2007, 315(5815):1120-1122.
- [11] DE ROSNY J, FINK M. Focusing properties of near-field time reversal[J]. *Physical Review A*, 2007, 76(6):065801-1-065801-4.
- [12] PENDRY J B. Time reversal and negative refraction[J]. *Science*, 2008, 322(5898):71-73.
- [13] 王晔然. 时间反演技术及其在雷达中的应用[D]. 西安:西安电子科技大学, 2017.
- [14] PRADA C, MANNEVILLE S, SPOLIANSKY D, et al. Decomposition of the time reversal operator: detection and selective focusing on two scatterers[J]. *Journal of the Acoustical Society of America*, 1996, 99(4):2067-2076.
- [15] MICOLAU G, SAILLARD M, BORDERIES P. DORT method as applied to ultrawideband signals for detection of buried objects[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(8):1813-1820.
- [16] YAVUZ M E, TEIXEIRA F L. Full time-domain DORT for ultrawideband electromagnetic fields in dispersive random inhomogeneous media[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2006, 54(8):2305-2315.
- [17] DEVANEY A J. Super-resolution processing of multi-static data using time reversal and MUSIC[EB/OL]. [2019-03-26]. https://ece.northeastern.edu/fac-ece/devaney/preprints/paper02n_00.pdf.
- [18] LEV-ARI H, DEVANEY A J. The time-reversal technique re-interpreted: subspace-based signal processing for multi-static target location[C]//*Proceedings of the IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, 2000:509-513.
- [19] MOURA J M F, JIN Y W. Time reversal imaging by adaptive interference canceling[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, 56(1):233-247.
- [20] JIN Y W, MOURA J M F, JIANG Y, et al. Time reversal detection in clutter: additional experimental results[J]. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 2011, 47(1):140-154.
- [21] JIN Y W, MOURA J M F. TR-SAR: time reversal target focusing in spotlight SAR[C]//*IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 2007:957-960.
- [22] JIANG Y, ZHU J G, STANCIL D D. Synthetic aperture radar ghost image cancellation using broadband time reversal averaging techniques[C]//*IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, 2007:1479-1482.
- [23] QIU R C, ZHOU C M, GUO N, et al. Time reversal with MISO for ultrawideband communications: experimental results[J]. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2006, 5:269-273.
- [24] NAQVI I H, ZEIN G E, LEROSEY G, et al. Experimental validation of time reversal ultra wide-band communication system for high data rates[J]. *IET Microwaves, Antennas and Propagation*, 2010, 4(5):643-650.
- [25] DUBOIS T, CRUSSIÈRE M, HELARD M. On the use of time reversal for digital communications with non-impulsive waveforms[C]//*Proceedings of the 4th International Conference on Signal Processing and Communication Systems*, 2010:1-6.
- [26] 丁帅,王秉中,葛广顶,等. 时间反演镜对时间反演电磁波聚焦特性影响因素的研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(10):253-259.
- [27] 陈英明,王秉中,葛广顶. 微波时间反演系统的空间超分辨率机理[J]. *物理学报*, 2012, 61(2):247-251.
- [28] 高强,王晓华,王秉中. 基于宽带立体超透镜的远场超分辨率成像[J]. *物理学报*, 2018, 67(9):094101-1-094101-7.
- [29] DAVY M, DE ROSNY J, JOLY J C, et al. Focusing and amplification of electromagnetic waves by time reversal in a leaky reverberation chamber[J]. *Comptes Rendus Physique*, 2010, 11(1):37-43.
- [30] ZMUDA H, LI J, SFORZA P M. Time reversal antenna network based directed energy systems: US60/736673[P]. 2007-05-24.
- [31] TREFNA H D, TOGNI P, SHIEE R, et al. Design of a wideband multi-channel system for time reversal hyperthermia[J]. *International Journal of Hyperthermia*, 2012, 28(2):175-183.
- [32] 电子科技大学. 一种用于主动隐身的时间反演电磁对消方法:CN201510226796.7[P]. 2015-08-12.
- [33] Strategic Technology Office (STO). Precision Electronic Warfare (PREW), DARPA-BAA 09-65[R]. Arlington: Strategic Technology Office (STO) of the US Defense Advanced Research Projects Agency, 2009.
- [34] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列相干信号功率合成栅基仿真技术[J]. *现代雷达*, 2015, 37(11):87-91.
- [35] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 基于时间反演电磁波的稀疏阵列单频信号空间功率合成[J]. *物理学报*, 2015, 64(20):204101-1-204101-6.
- [36] 陈秋菊,曾芳玲,姜秋喜,等. 稀疏点源波束干涉合成建模与特征提取算法[J]. *探测与控制学报*, 2015(5):35-39.
- [37] 陈秋菊,姜秋喜,曾芳玲,等. 稀疏阵列时间反演脉冲信号空间功率合成方法[J]. *电波科学学报*, 2016, 31(3):553-561.
- [38] 沈小东. 信息对抗装备发展趋势及应对措施分析[J]. *舰船电子对抗*, 2015, 38(2):11-14.
- [39] 田锦昌,齐大志,李书香. 人工智能干扰技术发展现状及趋势探析[J]. *航天电子对抗*, 2017(4):1-3, 16.