

特邀文章

时间反演电磁学研究进展*

王秉中 王 任

(电子科技大学 应用物理研究所,成都 611731)

摘 要: 随着电磁时间反演理论日趋完善、实现日趋成熟、应用日趋广泛,针对电磁时间反演的研究已逐渐成为一个相对独立的学科领域——时间反演电磁学。文章从电磁时间反演理论、电磁时间反演实现和电磁时间反演应用三个方面较为系统地对时间反演电磁学的研究进展进行了综述,并以此为基础,对后续研究给出了建议。

关键词: 时间反演电磁学,理论,实现,应用,研究进展

Progress in Time-Reversed Electromagnetics

WANG Bing-zhong, WANG Ren

(Institute of Applied Physics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: As the theory of electromagnetic time reversal becomes increasingly refined, implementation methods increasingly mature, and its applications grow more widespread, research into electromagnetic time reversal has gradually emerged as a distinct and independent academic discipline known as "Time-Reversed Electromagnetics". This paper provides a comprehensive overview of the progress in the field of Time-Reversed Electromagnetics, systematically addressing three main aspects: the theory, implementation, and applications of electromagnetic time reversal. With this foundation in place, this paper also offers recommendations for future research directions.

Key words: time-reversed electromagnetics, theory, implementation, applications, progress

引 言

时间反演(Time Reversal, TR)技术起源于声学领域,从上世纪 80 年代开始在电磁学领域快速发展。在 Web of Science 中搜索电磁时间反演(electromagnetic time reversal)获得的结果如图 1 所示。因为时间反演电磁波具有空时同步聚焦等新奇且有价值的特性,所以相关研究从上世纪 90 年代开始呈现爆发式增长。

2013 年,王秉中等人对时间反演电磁波应用系统的研究进展进行了综述^[1]。近十年来,电磁时间反演相关研究在深度和广度方面都有了长足进展。在理论方面,学者们已经建立了时间反演腔和时间反演镜模型,并研究了时间反演电磁波在不同环境下的空间和时间聚焦特性;在实现方面,学者们已经

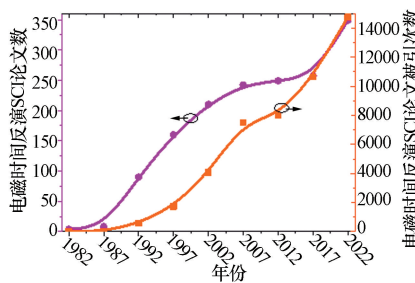


图 1 Web of Science 中时间反演电磁学论文发表情况

提出了时域成像、色散补偿、瞬变媒质等多种时间反演信号的产生方法;在应用方面,电磁时间反演已经广泛用于大容量无线通信、密集多端口阵列、自适应波束/场综合、远距离无线输能、远场雷达成像、超分辨探测、智能电磁逆设计等领域。随着电磁时间反演理论日趋完善、实现日趋成熟、应用日趋广泛,针对电磁时间反演的研究已逐渐成为一个相对独立的

* 收稿日期:2023-08-21

基金项目:国家自然科学基金(62171081,61901086);四川省自然科学基金(2022NSFSC0039)

学科领域——时间反演电磁学^[2],如图 2 所示。



图 2 时间反演电磁学知识树

本文从电磁时间反演理论、电磁时间反演实现和电磁时间反演应用三个方面较为系统地对时间反演电磁学的研究进展进行了综述,并以此为基础,对后续研究给出了建议。

1 电磁时间反演理论

时间反演电磁学的第一个需要明晰的问题是时间反演电磁波的存在性,即,其是否能够满足波动方程。学者们已经证明,如果 $E(\mathbf{r}, t)$ 是波动方程的一个解,则其时间反演变换 $E(\mathbf{r}, -t)$ 也是波动方程的一个解^[2],这奠定了时间反演电磁学的理论基础。

不过, $E(\mathbf{r}, -t)$ 表示将空间中所有位置的场都变换为正向场的时间反演,这在实现上存在困难,因此,学者们提出了时间反演腔模型,即只在一个闭合面上对场进行时间反演变换,如图 3 所示。理论推导表明,时间反演腔内的场是外向场和内向场的叠加,且可以在初始源位置处产生空时同步聚焦^[2]。

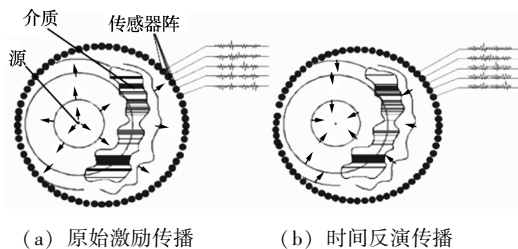


图 3 时间反演腔模型^[2]

为了进一步明晰时间反演电磁波在不同环境下的传播特性,并建立与应用场景吻合的模型,学者们建立了时间反演镜模型、分析了时间反演波在腔体和多径环境下的传播特性、明晰了时间反演电磁场的四域对称性^[2-4]。这些理论研究为电磁时间反演的应用奠定了基础。

2 电磁时间反演实现

探明时间反演电磁波在不同环境下的传播特性之后,另一个应用时间反演技术必须要解决的问题是:如何实现电磁时间反演。这包含两个方面的内容,一是如何在仿真中高效计算时间反演电磁波,二是如何在应用中有效产生时间反演电磁信号。

为了仿真不同场景下时间反演电磁波的传播,学者们提出了高阶复频率平移、区域分解、Newmark-Beta-FDTD 等方法,实现了多尺度复杂时间反演场景的高效计算^[5-6]。

为了有效产生时间反演电磁信号,学者们提出了两类实现方案,即基于数字信号处理的方案和基于模拟信号处理的方案^[2]。前者依赖于高速数字处理芯片,通过对时域信号采样、存储和反转实现时间反演;后者则利用器件的物理特性直接实现反演变换,不依赖高速芯片,更具实时性。

时域成像是基于模拟信号处理实现电磁信号时间反演的方案,其可以通过微波光子技术和全电子技术实现。一种微波光子时间反演系统如图 4 所示^[7]。相比微波光子系统,全电子技术方案采用微波色散延迟线产生群时延响应,具有易于集成的特点,适合用于微波时间反演处理^[8-9]。

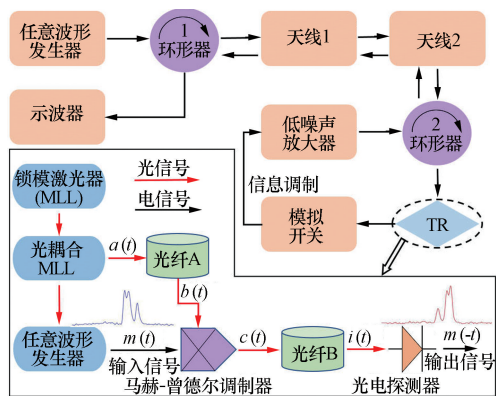


图 4 基于微波光子技术的时间反演系统^[7]

瞬变媒质方法是另一类基于模拟信号处理实现宽带信号时间反演的方法。当电磁波遇到时间界面时,会产生时间反演反射,这为实现电磁时间反演提供了理论基础^[10]。基于此方案,电子科技大学王秉中团队和纽约城市大学的 Alu 团队分别使用时变传输线实现了宽带微波信号时间反演^[11-13],如图 5 所示。瞬变媒质方案为电磁信号反演变换开辟了新的途径,其在转化效率、低时延和易集成方面展现出显著优势,值得进一步的探索和研究。

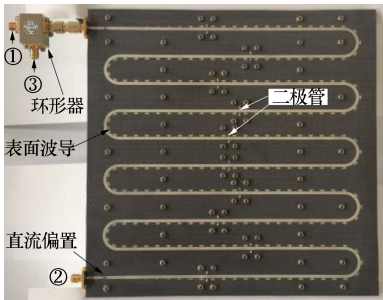


图 5 用于实现时间反演的时变传输线^[12]

3 电磁时间反演应用

3.1 时间反演大容量无线通信

基于空时同步聚焦特性,时间反演技术可以与多人多出(MIMO)、正交频分多路复用(OFDM)等技术结合,构建具有抗多径衰落能力的大容量无线通信系统。与传统通信系统相比,时间反演通信系统具有更低的误码率和更大的信道容量^[14-16]。此外,研究表明,时间反演技术还可以大幅提升通信系统的信噪比^[17]、准确获得信息传输的起始时间^[18]、降低频段干扰^[19]。电子科技大学的研究团队已经搭建了一套时间反演 MIMO 通信平台,实现了 1.5 Gbit/s 的传输速率^[20]。

时间反演的空时同步聚焦特性能够使多径信号在同一时刻汇聚到初始源位置处,而非聚焦区域的信号极其微弱^[21],这使得时间反演无线通信系统具有保密传输特性。基于此特性,学者们提出了基于时间反演的时域匿迹无线传输系统^[22],在保持无线系统大容量特性的前提下可以实现物理加密的保密传输,如图 6 所示。

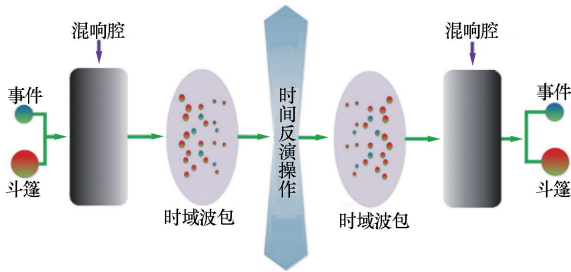


图 6 时间反演时域匿迹系统原理图^[22]

3.2 时间反演密集多端口阵列

一般而言,当 MIMO 天线单元的间距远小于半波长时,由于单元间的信道具有强相关性,各通道无法独立传输数据。而基于时间反演电磁波的空时同步聚焦特性,可以构建密集多端口阵列,即在单元间距远小于波长的情况下实现数据的独立传输。

一种实现时间反演密集多端口阵列的方法是在

天线近场设置微散射结构,通过微散射结构实现凋落波和传输波之间的转化^[23-24]。上述多通道系统中每个端口都需要连接一个带有微结构的辐射器,限制了天线的小型化和集成化。因此,王任等人提出了一种共用辐射器多端口阵列并实现了车内密集多通道传输(如图 7 所示)^[25]。结果表明,在时间反演系统中,密集多通道阵列的接收信号幅度与发射信号幅度之比比普通通信系统高出 8 倍以上。将时间反演与密集多端口阵列相结合,可以显著增强接收信号。

另一种实现密集多端口阵列的方法是使用色散延迟线(DDL)、脉冲整形电路(PSC)等器件在天线后端构造辅助信道^[26-28]。使用该方法可以实现密集多端口天线的定量设计,甚至使用单个天线实现多通道独立传输^[29]。

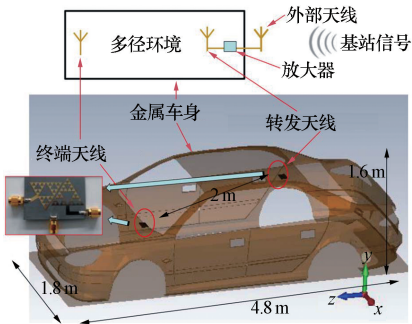


图 7 时间反演车内密集多通道传输^[25]

3.3 时间反演自适应波束/场综合

基于时间反演电磁波的空时同步聚焦特性可以实现任意形状的场赋形^[30-32]。将时间反演与缺陷超表面结合,可以将赋形场的精度提高到 1/10 波长量级^[31]。此外,使用时间反演技术还可以产生 Bessel 波束等非衍射波^[33-34],如图 8 所示。该综合方法具有速度快、全局优化、不累积误差等优点^[35]。

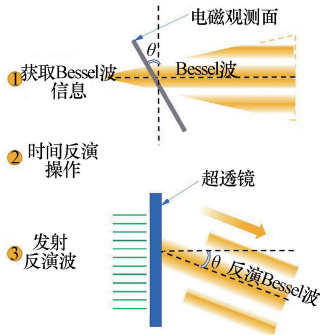


图 8 基于时间反演产生 Bessel 波束^[33]

当初始源距离时间反演镜阵列无穷远时,时间反演电磁波的自适应空时同步聚焦表现为方向回溯特性。因此,使用时间反演技术还可以实现波束综合。理论研究表明,使用时间反演波束综合方法获得的方

向图在目标方向的增益比使用其它任何方法获得的增益都要大^[36]。而且,因为时间反演电磁波的空时同步聚焦是环境自适应的,所以,时间反演波束综合方法可以纠正天线罩形变、结冰等引起的波束畸变^[37],从而在复杂条件下产生具有优异性能的波束。

3.4 时间反演远距离无线输能

远距离高效无线输能是无线输能领域的难题。基于时间反演电磁波的自适应点聚焦特性,可以在保持受能位置场强满足需求的同时使非受能位置保持较低功率,从而实现高效率、高安全性、多用户无线能量传输^[38-39]。

在时间反演远距离无线输能系统中,受能设备首先发送信标信号,然后各辐射单元对接收到的信标信号进行时间反演操作,再将其放大后重新发送。根据时间反演理论,这些信号会自适应地聚焦于用户位置,从而实现追踪式无线输能^[40],如图 9 所示。

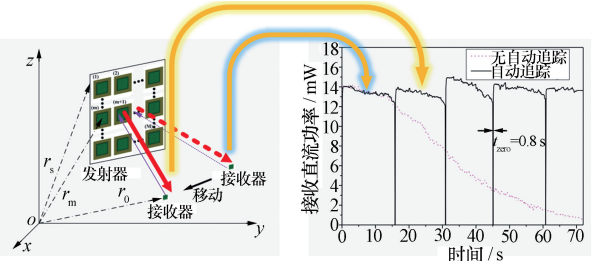


图 9 时间反演方法自追踪远距离无线输能^[40]

3.5 时间反演远场雷达成像

一般而言,雷达成像的过程为使用接收到的电磁信号恢复出散射物体形状等信息的过程。因为散射体可以视为空间波激励的次生源,时间反演电磁波具有在初始源位置处聚焦的特性,所以时间反演过程和成像过程是非常吻合的。基于此,刘小飞等人提出了用于远场雷达成像的时间反演多信号分类法 (TR-MUSIC)、时间反演算子分解法 (DORT) 等雷达成像算法,并将其用于地下探测、光学全息扫描等^[41-45],实现了高鲁棒性精确成像,如图 10 所示。此外,使用时间反演技术还可以实现周期分层材料相对介电常数的精确测量^[46]。

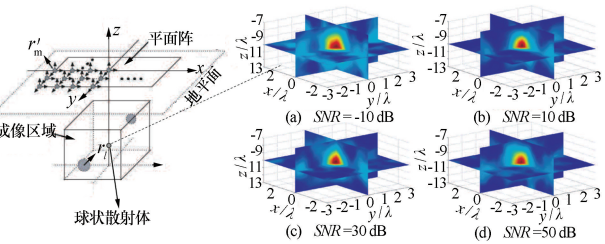


图 10 时间反演方法多信号分类法雷达成像^[42]

3.6 时间反演超分辨率探测

在成像探测中,衍射极限的存在严重限制了分辨率,使系统难以获得目标物体的细微结构。通过在目标近场设置波数调制结构,可以将目标发射或散射的凋落波转化为传输波并传输到远场,再结合时间反演技术即可恢复出物体的精细结构,即实现超分辨率探测^[47-48]。研究表明,将光栅结构、金属丝阵列、螺旋线阵列、谐振环阵列、多孔金属板等周期/非周期亚波长阵列与时间反演结合,均可以实现 1/10 波长量级的超分辨率探测^[49-54],如图 11 所示。

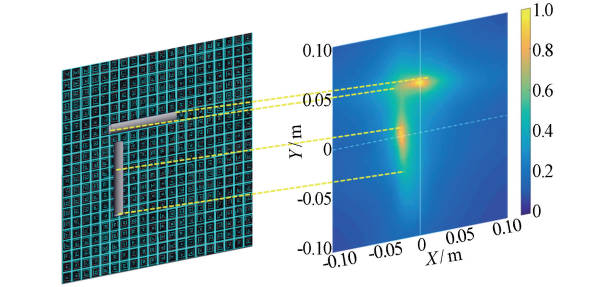


图 11 亚波长阵列辅助的时间反演超分辨率探测^[51]

除在目标近场加载亚波长阵列外,基于时间反演电磁波本身的空时同步聚焦特性和相位敏感特性也可以构建超分辨率探测系统。基于该原理,学者们已经成功实现了对深度亚波长扰动和肿瘤等目标的探测^[55-56]。

3.7 时间反演智能电磁逆设计

近期,电磁时间反演的应用已经从通信、探测等领域拓展至器件设计领域。基于时间反演技术可以将电磁器件的端口场转换成内部场^[57];通过将电磁器件看作散射系统,可以基于时间反演由器件的目标特性逆向构造出器件初始结构,从而实现高效的智能逆设计^[58],如图 12 所示。范劲松等人的研究表明,通过将时间反演和主成分分析等方法结合,可以实现宽带器件的智能电磁逆设计,并有效提高设计效率^[59]。

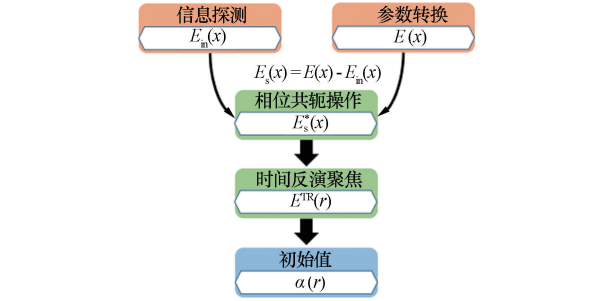


图 12 基于时间反演构造逆设计初始结构的过程^[58]

4 结论

目前,电磁时间反演理论已日趋完善、实现方法已日趋成熟、实际应用已日趋广泛,针对电磁时间反演的研究已逐渐成为一个相对独立的学科领域——时间反演电磁学。

作者认为,时间反演电磁学领域需要开展的后续重要研究包括:(1)复杂电磁信号的高效高精度实时反演;(2)时间反演技术与现有应用系统的深度融合;(3)新型时间反演应用技术的持续开发。

参考文献

- [1] 王秉中,臧锐,周洪澄. 时间反演电磁波应用系统的研究进展[J]. 微波学报, 2013, 29(5-6): 23-28
Wang B Z, Zang R, Zhou H C. Progress in the application systems based on time-reversed electromagnetic waves [J]. Journal of Microwaves, 2013, 29(5-6): 23-28
- [2] 王秉中,王任. 时间反演电磁学[M]. 北京: 科学出版社, 2019
Wang B Z, Wang R. Time-reversed electromagnetics [M]. Beijing: Science Press, 2019
- [3] Chen Y, Wang B Z. Polycentric spatial focus of time-reversal electromagnetic field in rectangular conductor cavity[J]. Optics Express, 2013, 21(22): 26657-26662
- [4] Chen Y, Wang B Z. Four-domain dual-combination operation invariance and time reversal symmetry of electromagnetic fields [J]. Optics Express, 2013, 21(21): 24702-24710
- [5] Wei X K, Shao W, Ou H, et al. Efficient WLP-FDTD with complex frequency shifted PML for super-resolution analysis[J]. IEEE Antennas Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 1007-1010
- [6] Wei X K, Shao W, Shi S B, et al. An optimized higher-order PML in domain decomposition WLP-FDTD method for time reversal analysis[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2016, 64(10): 4374-4383
- [7] Wang Z, Wang B Z, Zhao D, et al. Full analog broadband time-reversal module for ultra-wideband communication system[J]. IEEE Photonics Journal, 2019, 11(5): 1-10
- [8] Liang M S, Wang B Z, Ding S, et al. Time reversal of electromagnetic waves using the dispersion compensation approach[J]. IEEE Photonics Journal, 2015, 7(4): 1-7
- [9] Wang D, Wang B Z, Ge G D, et al. The feasibility of envelope-based time reversal[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2011, 25(1): 63-74
- [10] Wang R, Wang B Z, Zhou H C, et al. A transient material scheme for realizing time reversal mirror[A]. International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology[C], Guangzhou, China, 2019
- [11] Sun C G, Li J L, Wang B Z. Time reversal of a high frequency signal based on time-varying guided wave system [J]. AEU-International Journal of Electronics and Communications, 2018, 84: 186-191
- [12] Li J L, Yin S Y, Sun C G, et al. Spoof surface plasmon polaritons for time reversal electromagnetic signals [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2021, 20(8): 1547-1551
- [13] Moussa H, Xu G, Yin S, et al. Observation of temporal reflection and broadband frequency translation at photonic time interfaces[J]. Nature Physics, 2023, 19: 863-868
- [14] Liu X F, Wang B Z, Xiao S, et al. Performance of impulse radio UWB communications based on time reversal technique [J]. Progress in Electromagnetics Research-pier, 2008, 79: 401-413
- [15] Yang Y, Wang B Z, Ding S. Shannon information capacity of time reversal wideband multiple-input multiple-output system based on correlated statistical channels [J]. Chinese Physics B, 2016, 25(5): 050101
- [16] Liu X F, Wang B Z, Li L W. Tradeoff of transmitted power in time reversed impulse radio ultra-wideband communications[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2009, 9: 1426-1429
- [17] Liu X F, Wang B Z, Xiao S, et al. Post-time-reversed MIMO ultra-wideband transmission scheme [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010, 58(5): 1731-1738
- [18] Zhao D, Wang B Z, Jin Y. Time reversal based timing acquisition for ultra-wideband wireless communications: numerical and experimental study[J]. Wireless Personal Communications, 2014, 77: 3013-3026
- [19] Liu J, Zhao D, Wang B Z, et al. Time reversal method for coexistence between ultrawideband radios and IEEE802.11a systems[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(4): 1065-1071
- [20] Ge G D, Wang B Z, Wang D, et al. Subwavelength array of planar monopoles with complementary split rings based on far-field time reversal[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2011, 59(11): 4345-4350
- [21] Yang Z, Zhao D, Wang J. Point focusing wireless communication: a diffraction limit communication paradigm [J]. International Journal RF and Microwave Computer-aided Engineering, 2022, 32(9): e23282
- [22] Ding S, Fang Y, Zhu J F, et al. Wireless cloaking system based on time-reversal multipath propagation effects

- [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2019, 67(2): 1386-1391
- [23] Ge G D, Wang D, Wang B Z. Subwavelength array of planar triangle monopoles with cross slots based on far-field time reversal[J]. Progress in Electromagnetics Research-pier, 2011, 114: 429-441
- [24] Ge G D, Zang R, Wang D, et al. Sub-wavelength array of planar antennas with defect oval rings based on far-field time reversal[J]. Electronics Letters, 2011, 47(16): 901-903
- [25] Wang R, Wang B Z, Gong Z S, et al. Compact multiport antenna with radiator-sharing approach and its performance evaluation of time reversal in an intra-car environment[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(9): 4213-4219
- [26] Ding S, Wang B Z, Ge G, et al. Sub-wavelength array with embedded chirped delay lines based on time reversal technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2013, 61(5): 2868-2873
- [27] Liang M S, Wang B Z, Zhang Z M, et al. Simplified pulse shaping network for microwave signal focusing based on time reversal[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015, 14: 225-228
- [28] Ding S, Gupta S, Zang S, et al. Enhancement of time-reversal subwavelength wireless transmission using pulse shaping[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(9): 4169-4174
- [29] Wang R, Wang Z, Chen C, et al. Time-reversal multi-channel transmission with single receiving antenna[J]. IEEE Access, 2019, 7: 66476-66484
- [30] Chen Z, Liang F, Zhang Q, et al. Synthesis method for one-dimensional uniform microwave field generation based on Fourier transform and time reversal[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2021, 69(10): 7011-7016
- [31] Wang R, Liu J, Lv Y, et al. Subwavelength field shaping approach based on time reversal technique and defective metasurfaces[J]. IEEE Access, 2019, 7: 84629-84636
- [32] Li B, Zhao D, Liu S, et al. Precise transient electric field shaping with prescribed amplitude pattern by discrete time reversal[J]. IEEE Access, 2019, 7: 84558-84564
- [33] Jia Q S, Ding S, Dong H B, et al. Synthesis of Bessel beam using time-reversal method incorporating metasurface[J]. IEEE Access, 2021, 9: 30677-30686
- [34] Han X, Ding S, Jia Q S, et al. Control of time-reversal aperture by high-precision phase modulated and dual-polarized metasurface[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023, 71(6): 5446-5451
- [35] Han X, Ding S, Jia Q S, et al. Limit values acquisition in field control problems using information based time reversal technique[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2023 (Early Access)
- [36] Zhao D, Jin Y, Wang B Z, et al. Time reversal based broadband synthesis method for arbitrarily structured beam-steering arrays[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 164-173
- [37] 安腾远, 丁霄, 王秉中. 基于时间反演技术的复杂天线罩辐射波束畸变纠正研究[J]. 物理学报, 2023, 72(3): 030401-1-9
- An T Y, Ding X, Wang B Z. Time-inversion technique based correction of complex radome radiation beam distortion[J]. Acta Physica Sinica, 2023, 72(3): 030401-1-9
- [38] Cheng Z H, Li T, Hu L, et al. Selectively powering multiple small-size devices spaced at diffraction limited distance with point-focused electromagnetic waves[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 13696-13705
- [39] Yang Z, Zhao D, Bao J, et al. Asynchronous focusing time reversal wireless power transfer for multi-user with equal received power assignment [J]. IEEE Access, 2021, 9: 150744-150752
- [40] Hu L, Ma X, Yang G, et al. Auto-tracking time reversal wireless power transfer system with a low-profile planar RF-channel cascaded transmitter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(4): 4245-4255
- [41] Liu X F, Wang B Z, Li L. Transmitting-mode time reversal imaging using MUSIC algorithm for surveillance in wireless sensor network[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2012, 60(1): 220-230
- [42] Liu X F, Wang B Z, Xiao S. Electromagnetic subsurface detection using subspace signal processing and half-space dyadic Green's function[J]. Progress in Electromagnetics Research-pier, 2009, 98: 315-331
- [43] Ou H, Wu Y, Lam E, et al. Axial localization using time reversal multiple signal classification in optical scanning holography[J]. Optics Express, 2018, 26(4): 3756-3771
- [44] Wang X H, Gao W, Wang B Z. Efficient hybrid method for time reversal superresolution imaging[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2015, 26(1): 32-37
- [45] Gao W, Wang X H, Wang B Z. Time-reversal ESPRIT imaging method for the detection of single target [J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2014, 28(5): 634-640
- [46] Zhang Z M, Wang B Z, Liang M S, et al. The determination of the relative permittivity of periodic stratified

- media based on the iterative time-reversal method [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(4): 048403-1-6
- [47] Wang K, Shao W, Ou H, et al. Time reversal focusing beyond the diffraction limit using near-field auxiliary sources [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2017, 16: 2828-2831
- [48] Zang R, Wang B Z, Ding S, et al. Evanescent-wave reconstruction in time reversal system [J]. Frequenz, 2018, 72(5-6): 285-292
- [49] Gao Q, Wang B Z, Wang X H. Far-field super-resolution imaging with compact and multifrequency planar resonant lens based on time reversal [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2015, 63(12): 5586-5592
- [50] Gong Z S, Wang B Z, Yang Y, et al. Far-field super-resolution imaging of scatterers with a time reversal system aided by a grating plate [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-8
- [51] Gao Q, Wang X H, Wang B Z. Far-field sub-wavelength imaging of 2D extended target aided by compact planar resonant structures [J]. IEEE Photonics Journal, 2018, 10(1): 1-11
- [52] Huang H Y, Ding S, Wang B Z, et al. Split-ring-based metamaterial for far-field subwavelength focusing based on time reversal [J]. Chinese Physics B, 2014, 23(6): 064101-1-7
- [53] Wang R, Wang B Z, Gong Z S, et al. Far-field subwavelength imaging with near-field resonant metalens scanning at microwave frequencies [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 11131
- [54] Wang X H, Hu M, Wang B Z, et al. Near-field periodic subwavelength holey metallic plate for far-field super resolution focusing [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(1): 1-7
- [55] Chen Y, Wang B Z. Far-field detection of sub-wavelength Tetris without extra near-field metal parts based on phase prints of time-reversed fields with intensive background interference [J]. Optics Express 2014, 22(14): 17073-17078
- [56] Zhou H C, Fusco V, Wang B Z, et al. Using dispersive delay lines and time reversal for low contrast tumour detection [J]. Electronics Letters, 2015, 51(9): 678-679
- [57] 陈传升, 王秉中, 王任. 基于时间反演技术的电磁器件端口场与内部场转换方法 [J]. 物理学报, 2021, 70(7): 070201
- Chen C S, Wang B Z, Wang R. Conversion method between port field and internal field of electromagnetic device based on time-reversal technique [J]. Acta Physica Sinica, 2021, 70(7): 070201
- [58] Wang Z, Wang B Z, Liu J P, et al. Method to obtain the initial value for the inverse design in nanophotonics based on a time-reversal technique [J]. Optics Letters, 2021, 46(12): 2815-2818
- [59] Fan J, Wang R, Wang B Z. Initial structure construction for multi-frequency nanophotonic devices based on TR-PCA method [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2023, 35(18): 967-970



王秉中 男, 1962 年生, 教授, 中国电子学会会士, 微波分会副主任委员。主要研究领域: 时间反演电磁学, 天线与传播, 计算电磁学。

E-mail: bzwang@uestc.edu.cn



王任 (通信作者) 男, 1990 年生, 博士, 副教授。主要研究领域: 时间反演电磁学, 天线与传播, 计算电磁学。