

基于微波光子倍频与去斜接收的宽带阵列雷达 (特邀)

张方正, 高彬栋, 潘时龙*

(南京航空航天大学 电子信息工程学院 雷达成像与微波光子技术教育部
重点实验室, 江苏南京 211106)

摘要: 微波光子雷达利用光子学方法实现雷达信号的产生与处理, 具有突出的宽带工作能力, 能显著提升雷达距离分辨率。为了提升雷达角度分辨能力并实现灵活波束控制, 将微波光子雷达技术与阵列技术相结合是必然的发展趋势。目前研究较多的宽带阵列雷达采用光真延时技术克服宽带波束倾斜问题, 通常面临复杂度高、灵活性差、延时精度有限等问题。近年来, 基于微波光子倍频与去斜接收的宽带雷达收发架构得到了广泛关注, 基于此技术构建的阵列雷达, 在实现宽带工作的同时具备实时数字补偿与处理功能, 为宽带阵列雷达的发展提供了新的思路。文中针对作者在此方面的最新研究进展进行了综述, 在阐明基于微波光子倍频与去斜接收实现宽带雷达收发机理的基础上, 介绍了构建宽带相控阵雷达的方法以及实现数字波束扫描与成像的性能。然后, 将阵列形式扩展至多输入多输出 (MIMO) 形式, 介绍了基于光波分复用技术实现宽带微波光子 MIMO 雷达的方法, 并分析了微波光子 MIMO 雷达在目标探测与成像方面的性能。

关键词: 微波光子学; 雷达; 相控阵; MIMO; 波束成形

中图分类号: TN29 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20211051

Broadband array radar based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp receiving (*Invited*)

Zhang Fangzheng, Gao Bindong, Pan Shilong*

(Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, College of Electronic and Information Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: Microwave photonic radar enables the generation and processing of broadband radar signals, which can significantly improve the range resolution of the radar system. To improve the radar angle resolution and realize flexible beam control, combining microwave photonic radar technology with array radar technology is an inevitable development trend. Previously, the optical truth delay technology is intensively investigated to achieve squint-free beam steering in broadband phased array radars, which usually face the problems of high complexity, poor flexibility, and limited delay accuracy. In recent years, the broadband radar architecture based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp receiving has received extensive attention. The array radar constructed based on this technology has wide operation bandwidth while enabling real-time digital compensation and processing functions, which provides a new idea for the development of broadband array radars. In this paper,

收稿日期:2021-04-05; 修订日期:2021-05-11

基金项目:国家自然科学基金 (61871214); 江苏自然科学基金 (BK20180066)

作者简介:张方正,男,教授,博士,主要从事微波光子技术、雷达成像技术等方面研究工作。

通讯作者:潘时龙,男,教授,博士,主要从事基于微波光子技术的新体制雷达、无线通信、测量系统和集成微波光子学等方面的研究。

the research progress of the broadband array radar based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp processing was reviewed. After expounding the transceiver mechanism of microwave photonic broadband radar, the method for constructing broadband phased array radar and the performance of digital beam scanning and imaging were introduced. Then, the radar array was extended to MIMO architecture. The broadband microwave photonic MIMO radar based on optical wavelength division multiplexing technology was introduced and its performance in target detection and imaging was analyzed.

Key words: microwave photonics; radar; phased array; MIMO; beamforming

0 引言

雷达 (Radar) 是 20 世纪最伟大的电子工程发明之一^[1], 它通过发射无线电电磁波并接收目标反射回波来获取目标的位置、速度等信息, 是人类进行目标探测与识别的重要手段之一。随着探测环境与探测目标的日益复杂与多样, 雷达迫切需要具备更高的分辨能力, 以实现目标的精细探测进而完成识别等功能^[2]。然而, 受到“电子瓶颈”的限制, 传统雷达在工作带宽和信号处理速度等方面面临巨大挑战, 越来越难以满足未来复杂环境下的探测需求。微波光子学是融合光子技术与微波技术的新兴交叉学科, 主要研究利用光子技术实现宽带微波信号产生、处理、传输与控制的机理、方法及系统性能^[3-5]。微波光子技术满足未来雷达在高频、宽带、多波段等方面的发展需求^[6-7], 能突破传统雷达面临的瓶颈, 是极具发展潜力的技术。2013 年, 意大利科学家成功构建了世界上第一部光子雷达系统^[8], 验证了光子技术在雷达中应用的可行性。自 2016 年以来, 国内清华大学^[9]、上海交通大学^[10]、中国科学院空天信息创新研究院^[11]、空军预警学院^[12]以及南京航空航天大学^[13-14]等单位都报道了微波光子雷达的相关研究成果, 证明了微波光子雷达在宽带高分辨探测方面的巨大优势。目前已报道的微波光子雷达能实现的距离分辨率达厘米甚至亚厘米量级^[15-16]。

为了提升雷达角分辨探测能力并实现波束扫描, 将微波光子雷达与阵列技术相结合是必然发展趋势^[17]。微波光子阵列雷达不仅具有突出的宽带工作特性, 还具备以下几方面优势^[18]: (1) 具有低传输损耗和抗电磁干扰能力; (2) 利用丰富的光谱资源能实现多维操控与复用; (3) 微波光子系统在宽带范围内的幅相特性平坦。早在 20 世纪 70 年代, 国际上便开展

了大量基于光真延时的宽带相控阵研究^[19-22], 目的是克服宽带波束倾斜问题, 实现宽带波束扫描。在此后的数十年中, 研究人员提出了多种光真延时与光控宽带相控阵的实现方案, 并开展了实验验证。然而, 基于光真延时的宽带相控阵本质上是通过模拟的方式实现波束控制, 此类系统通常面临复杂度高、灵活性差、控制精度不高的问题。近年来, 随着微波光子信号处理技术的不断发展, 研究人员提出了一些新型的基于光子技术的阵列雷达^[23-29]。其中, 基于微波光子倍频与去斜接收的阵列雷达不仅具备突出的宽带信号产生与处理能力, 还能充分发挥先进数字信号处理技术的优势, 具备灵活数字补偿与处理能力, 为宽带阵列雷达的发展提供了新的思路。文中综述了作者在此方面研究的最新进展, 首先介绍了基于微波光子倍频与去斜接收的雷达收发单元, 然后阐述了基于以上雷达收发单元构建的宽带相控阵雷达与实现数字波束扫描的性能。最后, 将阵列形式扩展至多输入多输出 (MIMO) 阵列, 介绍了宽带微波光子 MIMO 雷达的实现方法并分析了其探测与成像性能。

1 基于微波光子倍频和去斜接收的宽带雷达收发单元

雷达收发单元是构成阵列雷达的关键部分, 其性能参数直接决定了雷达探测精度和探测范围。图 1 所示为基于微波光子四倍频与去斜接收的雷达收发单元示意图^[30]。半导体激光器 (Laser Diode, LD) 产生的直流光通过双平行马赫增德尔调制器 (Dual-parallel Mach-Zehnder modulator, DPMZM) 被任意波形发生器 (Arbitrary waveform generator, AWG) 产生的中频线性调频信号 (Intermediate-frequency linearly frequency modulated signal, IF-LFM) 调制。其中, DPMZM 由两

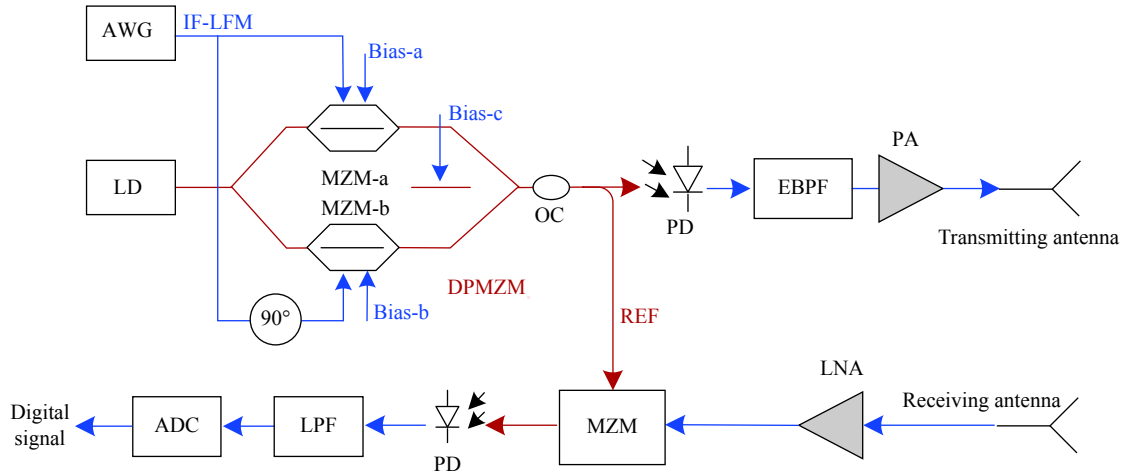


图 1 基于微波光子倍频与去斜接收宽带雷达收发单元

Fig.1 The broadband radar transceiver based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp receiving

个马赫增德尔子调制器 (Mach-Zehnder modulator, MZM) 构成, 输入其中的光信号被分成两路分别送入两个子调制器。AWG 产生的中频线性调频信号经过 90° Hybrid 后得到相位差为 90° 的两路信号, 分别驱动 DPMZM 的两个子调制器。调节两个子调制器的偏置电压使其均工作在最大强度传输点, 同时将 DPMZM 干涉臂偏置于最小强度传输点, 输出的光信号主要包含 ± 2 阶调制光边带。此信号经光耦合器 (Optical coupler, OC) 分成两路后, 一路送入光电探测器 (Photodetector, PD) 完成光电转换, 另一路作为参考信号 (REF) 用于去斜接收处理。使用带通滤波器 (Electrical band-pass filter, EBPB) 滤除 PD 输出信号中的直流分量和高次谐波后, 得到线性调频信号的频率和带宽均为中频信号的四倍, 即通过微波光子四倍频方法得到了宽带雷达发射信号。产生的雷达信号经功率放大器 (Power amplifier, PA) 后被天线发射至探测空间。

雷达回波信号经接收天线收集并通过低噪声放大器 (Low-noise amplifier, LNA) 后, 用于驱动一个 MZM, 对参考信号 (REF) 进行电光调制。由于回波信号具有一定的时间延迟, 由雷达回波调制产生的光边带与参考信号中的光边带存在一个瞬时频率差, 经光电探测器 (PD) 进行光边带混频并完成低通滤波 (Low-pass filter, LPF) 后, 可以得到此频率差对应的时域信号。使用模数转换器 (Analog-to-digital converter, ADC) 进行采样后, 对得到数字信号进行频

谱分析可以获得雷达回波的延迟以及目标距离的信息。此过程类似于传统雷达对线性调频信号的去斜处理, 如图 2 所示, 但利用微波光子混频完成去斜处理在理论上具有大于 50 GHz 的带宽处理能力, 结合正交平衡微波光子混频方法可以抑制杂散与噪声, 具备大于 60 dB 的动态范围^[31]。微波光子去斜接收的另一个突出优势是可以将宽带雷达回波信息转移至低频去斜信号, 能极大降低信号采集、存储与处理方面的硬件需求, 进行实时高分辨目标探测。作者基于微波倍频与去斜接收原理, 构建了带宽为 12 GHz (28~40 GHz)、理论距离分辨率为 1.25 cm 的 Ka 波段宽带微波光子雷达, 并进行了目标探测实验, 实验场景与去斜信号的频谱图如图 3 所示。可以发现, 构建的宽带微波光子雷达能够清晰地分辨出沿雷达距离向间距为 1.3 cm 的两个目标, 证明了其极高的距离分辨能力。

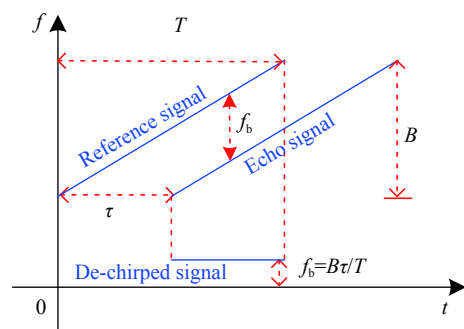


图 2 去斜处理的基本原理

Fig.2 Principle of de-chirp processing

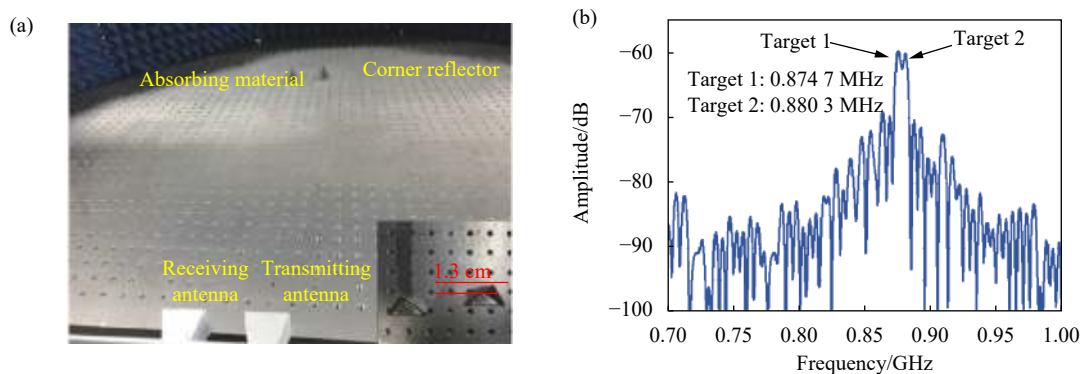


图 3 (a) 探测场景实物图; (b) 去斜信号的频谱图

Fig.3 (a) Picture showing the detection scenario; (b) Spectra of the de-chirped signal

2 基于微波光子倍频与去斜接收的宽带相控阵雷达

基于微波光子倍频与去斜接收的雷达收发单元具有宽带工作能力,并且去斜信号的采样率低、数据量小,用于构建阵列雷达时,可以在数字域完成真延时补偿与波束扫描。图 4 所示为基于微波光子倍频与去斜接收构建的 1 发 N 收相控阵雷达结构示意图^[27]。该系统利用 DPMZM 进行微波光子四倍频调制,得到的光信号经过掺铒光纤放大器 (Erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA) 与光分路器 (Optical splitter) 后得到 N+1 路信号,其中 1 路经光电转换后得到雷达发射信号,其余 N 路作为参考信号,分别对接收

的 N 路回波信号进行去斜处理,得到的多个去斜信号经低通滤波、采样后完成数字信号处理。在数字信号处理模块中,首先将多路去斜信号进行快速傅里叶变换得到对应的一维距离像,然后以其中一个接收天线对应的一维距离像为参考计算每个天线之间的延时差并进行真延时补偿,得到补偿后的信号为^[27]:

$$R'_i(r) = \left\{ F[S_i(t)] e^{j2\pi f r \tau_i} \right\}_{f=2kr/c} \quad (1)$$

式中: $F(\cdot)$ 表示快速傅里叶变换; $S_i(t)$ 是第 i 个接收机接收到的去斜信号 ($i=1,2,\dots,N$); τ_i 为第 i 个回波与参考信号对应的延时差; k 为发射的线性调频信号的啁啾率; c 是信号在空气中的传播速度。这里 $f=2kr/c$ 是一个与距离相关的函数,能保证对所有探测

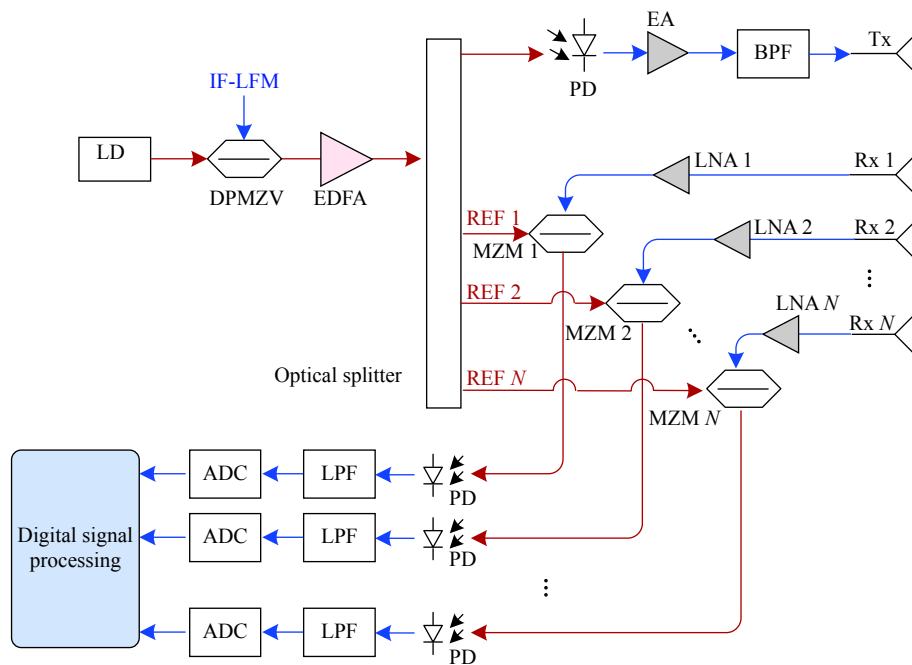


图 4 基于微波光子倍频与去斜接收的相控阵雷达结构示意图

Fig.4 Setup of the phased array radar based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp receiving

距离均能完成真延时补偿,从而克服宽带波束倾斜问题。完成数字真延时补偿后,依据阵列的导向矢量,即:

$$\Phi(\theta) = [1 \quad e^{j2\pi f d \sin\theta/c} \quad \dots \quad e^{j2\pi f(N-1)d \sin\theta/c}] \quad (2)$$

通过改变 θ 可实现数字波束扫描。需要注意的是,与窄带数字波束扫描中载波频率视为定值的情况不同,公式 (2) 中的 f 为需要考虑发射信号的各个频率。

基于以上原理,搭建了 1×4 的宽带微波光子相控阵雷达,其工作带宽为 4 GHz (22~26 GHz),每个接收通道的采样率为 500 MSa/s。图 5(a) 所示为 DPMZM 四倍频调制后输出的光信号频谱图,可以看出此信号主要包含 ±2 阶调制光边带,光载波的功率抑制比大于 20 dB。经过光电转换后得到的线性调频信号频率范围为 22~26 GHz,其频谱与时域波形如图 5(b) 所示。图 6(a) 为对单个小尺寸金属板进行探测的实验场景图片。在完成真延时数字补偿后进行波束扫描成像,结果如图 6(b) 所示。需要说明的是,由于使用的天线尺寸较大(间距约为 5 倍中心波长),导致成像结果中存在栅瓣。对主瓣成像目标进行分析,获得图 7

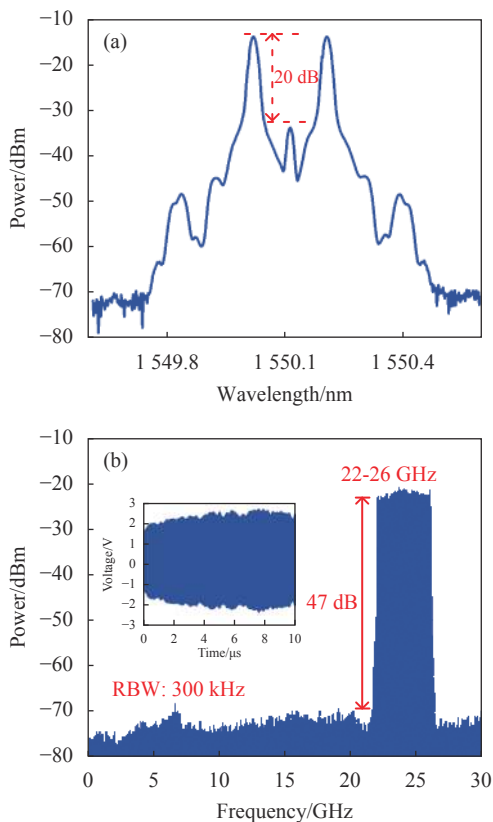


图 5 (a) DPMZM 输出的信号光谱图; (b) 发射的雷达信号频谱和时域波形

Fig.5 (a) Optical spectrum of the signal after DPMZM; (b) Spectra and waveform of the transmitted radar signal

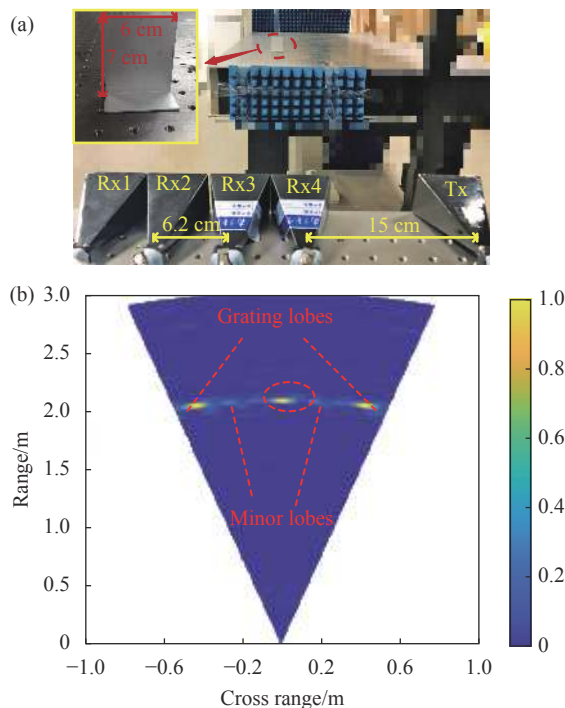


图 6 (a) 相控阵天线与探测目标实物图; (b) 数字波束扫描成像结果

Fig.6 (a) Photograph of the phased array antennas and target; (b) Image

constructed by digital beamforming

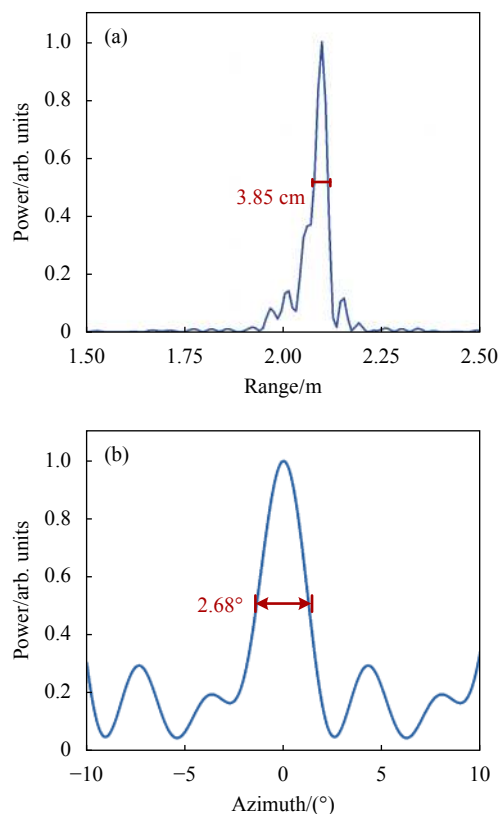


图 7 主瓣目标在 (a) 距离向和 (b) 方位向的点扩散函数

Fig.7 Point spread functions along (a) range direction and (b) azimuth direction in the main beam

所示的距离向与角度向的点扩散函数 (Point spread function, PSF), 发现距离分辨率与角分辨率分别为 3.85 cm 和 2.68°, 与理论值相符。将四个间距较近的小目标

依次排开进行多目标探测成像实验, 结果如图 8 所示。可以发现, 四个目标可以清晰地分辨出来, 进一步证明了微波光子宽带相控阵雷达的高分辨探测能力。

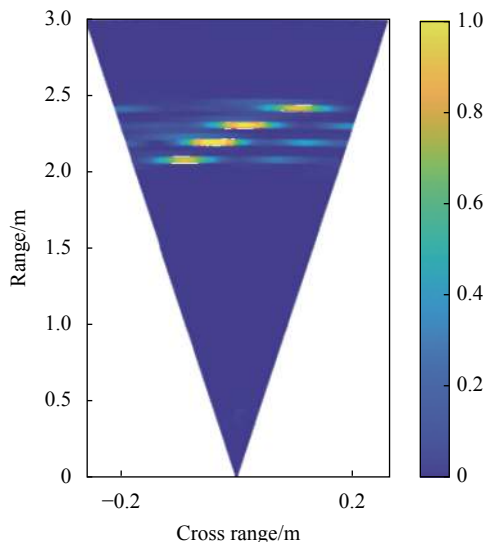
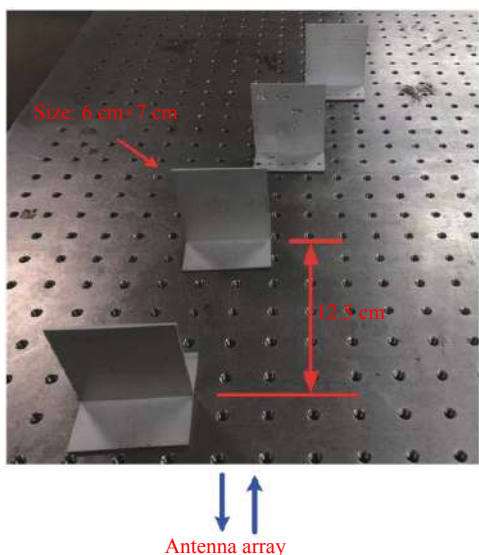


图 8 多目标成像结果

Fig.8 Imaging result of multiple targets

3 基于光子倍频与去斜接收的宽带 MIMO 雷达

MIMO 雷达通过发射并接收多通道正交信号实现目标探测, 一个 $M \times N$ 的 MIMO 天线阵列可以等效为具有 MN 个单元的天线阵列, 如图 9 所示^[32]。因此, MIMO 雷达可以通过较少的物理阵元实现较大的等效孔径从而获得较高的角分辨能力。考虑到目前微波光子雷达中器件成本较高, 将微波光子技术与 MIMO 雷达相结合, 对于简化微波光子阵列的复杂度

以及降低系统成本具有重要意义。此外, 微波光子 MIMO 雷达的优势还体现在具备高分辨探测、高精度参数估计、多波束扫描与多目标跟踪等能力^[32-33]。

图 10 所示为基于微波光子倍频与去斜接收, 并结合光波分复用 (WDM) 技术构建的 $M \times N$ 微波光子 MIMO 雷达结构示意图^[24]。其中, M 个雷达发射单元利用不同的光载波完成微波光子四倍频, 得到不同频率范围的正交多通道雷达发射信号, 同时获得用于多通道回波去斜的光参考信号。接收单元收集的多通道回波信号首先与光参考信号进行微波光子混频, 经过波分解复用后进行光电转换和低通滤波, 从而完成正交多通道回波信号的去斜与分离, 最后经过采样后可获得 MN 路包含目标信息的数字信号。此过程中, 为了避免多通道回波去斜信号的混叠与干扰, 每个发射机产生的线性调频信号带宽应远大于去斜信号的频率, 并且各通道雷达信号的载频应大于相邻通道线性调频信号的初始频率差^[24]。实验搭建了 2×2 的微波光子 MIMO 雷达, 每个发射通道的信号带宽为 4 GHz, 实现了误差小于 5 cm 的目标定位, 实验中收发阵列的位置以及目标定位结果如图 11 所示。

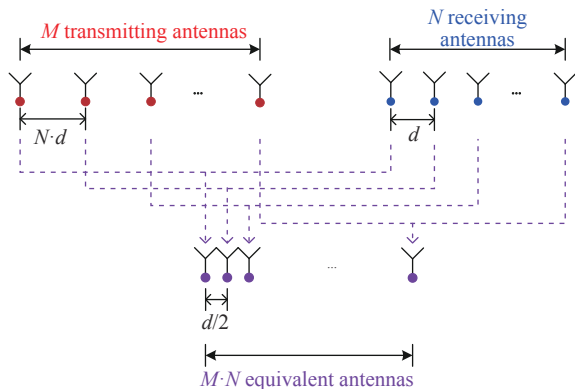


图 9 基于相位中心近似原理的等效 MIMO 阵列示意图

Fig.9 Equivalent MIMO array by the principle of the phase center approximation

上述微波光子 MIMO 雷达发射阵列需要多个激光器提供光载波, 为了降低复杂度与系统成本, 可以

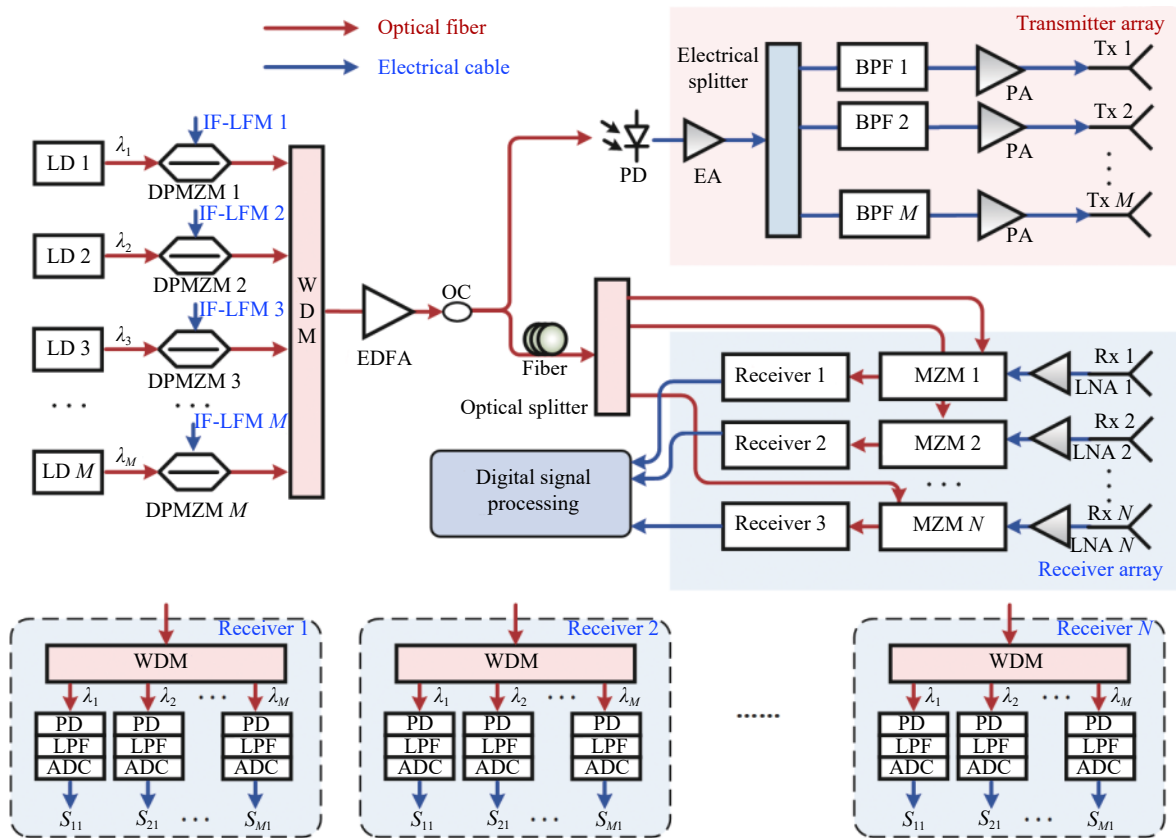


图 10 基于波分复用结构的微波光子 MIMO 雷达

Fig.10 Schematic diagram of the microwave photonic MIMO radar based on wavelength division multiplexing

采用双光频梳拍频的方法同时产生多个不同频段
的正交雷达信号^[29],接收阵列仍通过微波光子混频的方
式实现多通道回波去斜与分离。此方法在降低发射
阵列复杂度的同时还能提升多路雷达信号的相干性。
基于此方法构建了单通道带宽为 2 GHz 的 4×8 微

波光子 MIMO 雷达,采用宽带后向投影成像算法完成
了二维成像实验。图 12 所示为实验中的目标实物图

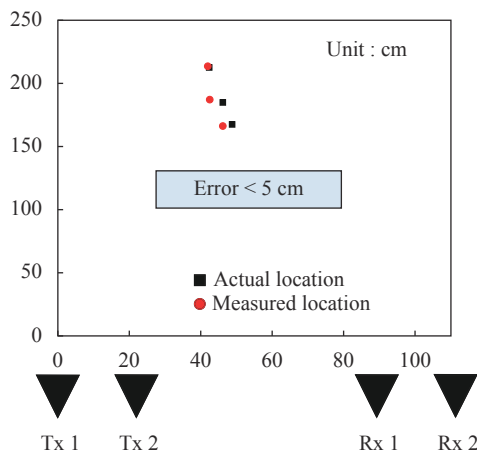


图 11 微波光子 MIMO 雷达目标定位实验结果示意图

Fig.11 Results of the target location with microwave photonic MIMO radar

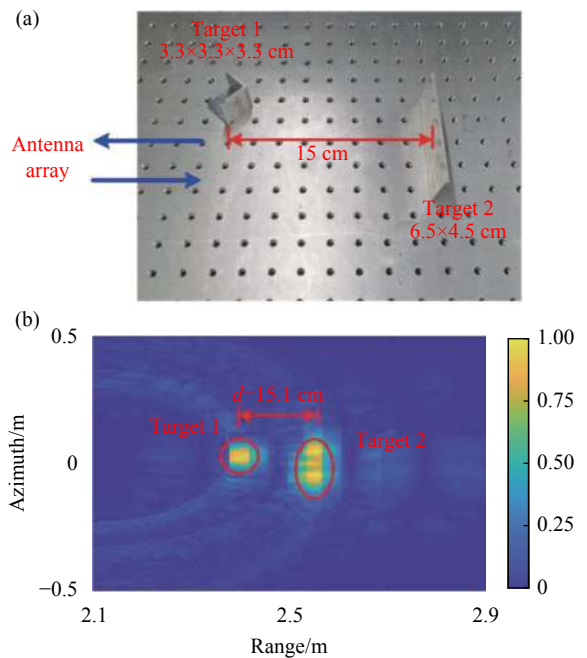


图 12 (a) 探测目标实物图; (b) 二维成像结果图

Fig.12 (a) Picture of the targets; (b) 2D imaging result of the targets

与成像结果图。实验中形成的等效 32 单元均匀线阵的阵元间距为中心波长的一半,因此成像结果不受栅瓣影响。根据距离向和方位向的点散射函数可得此微波光子 MIMO 雷达的距离分辨率和角度分辨率分别为 7.67 cm 和 2.18°,均与理论值相符。以上结果证明了宽带微波光子 MIMO 雷达在高精度目标探测与成像方面的优势。

4 总结与展望

微波光子技术具有高频、宽带、低传输损耗、抗电磁干扰等方面优势,为突破电子瓶颈、发展宽带阵列雷达提供了关键技术支撑。文中综述了作者在基于微波光子倍频与去斜接收的宽带阵列雷达方面的研究进展,从宽带雷达收发单元、宽带相控阵雷达、宽带 MIMO 雷达三方面展示了此技术在高分辨探测与成像方面的优势。需要指出的是,文中在介绍微波光子相控阵雷达时,强调了针对接收阵列的信号处理技术,并给出了 1 发 4 收相控阵探测与成像的实验结果。为实现发射阵列的波束扫描,将进一步研究基于电域中频数字处理结合微波光子倍频实现发射阵列波束成形方法。

参考文献:

- [1] Skolnik M I. Introduction to Radar [M]. New York: Mc Graw Hill Professional, 1962: 1-29.
- [2] Chen X L, Guan J, Huang Y, et al. Radar low-observable target detection [J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(11): 30-38. (in Chinese)
- [3] Yao J P. Microwave photonics [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. *Nature Photonics*, 2007, 1(6): 319-330.
- [5] Seeds A, Williams K. Microwave photonics[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2007, 24(12): 4628-4641.
- [6] Pan S L, Zhang Y M. Microwave photonic radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [7] Grodensky D, Kravitz D, Zadok A. Ultra-wideband microwave-photonics noise radar based on optical waveform generation [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2012, 24(10): 839-841.
- [8] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [9] Peng S W, Li S Y, Xue X X, et al. High-resolution W-band ISAR imaging system utilizing a logic-operation-based photonic digital-to-analog converter [J]. *Optics Express*, 2018, 26(2): 1978-1987.
- [10] Zou W W, Zhang S T, Wu K, et al. All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar[C]// URSI Asia-Pacific Radio Science Conference. IEEE, 2016, doi: 10.1109/UR-SIAP-RASC.2016.7883546.
- [11] Li R, Li W, Ding M, et al. Demonstration of a microwave photonic synthetic aperture radar based on photonic-assisted signal generation and stretch processing [J]. *Optics Express*, 2017, 25(13): 14334-14340.
- [12] Wang A L, Wo J H, Luo X, et al. Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information [J]. *Optics Express*, 2018, 26(16): 20708-20717.
- [13] Zhang F Z, Guo Q S, Wang Z Q, et al. Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging [J]. *Optics Express*, 2017, 25(14): 16274-16281.
- [14] Zhang F Z, Guo Q S, Zhang Y M, et al. Photonics-based real-time and high-resolution ISAR imaging of non-cooperative target [J]. *Chinese Optics Letters*, 2017, 15(11): 112801.
- [15] Yao Y, Zhang F Z, Zhang Y M, et al. Demonstration of ultra-high-resolution photonics-based Ka-band inverse synthetic aperture radar imaging[C]//2018 Optical Fiber Communication Conference (OFC 2018), 2018: Th3G. 5.
- [16] Ma C, Yang Y, Liu C, et al. Microwave photonic imaging radar with a sub-centimeter-level resolution [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(18): 4948-4954.
- [17] Sun G Q, Zhang F Z, Pan S L, et al. Frequency-domain versus time-domain imaging for photonics-based broadband radar [J]. *Electronics Letters*, 2020, 56(24): 1330-1332.
- [18] Pan S L, Ye X W, Zhang Y M, et al. Microwave photonic array radars [J]. *IEEE Journal of Microwaves*, 2021, 1(1): 176-190.
- [19] Dolfi D, Michel-Gabriel F, Bann S, et al. Two-dimensional optical architecture for time-delay beam forming in a phased-array antenna [J]. *Optics Letters*, 1991, 16(4): 255-257.
- [20] Corral J, Marti J, Fuster J, et al. True time-delay scheme for feeding optically controlled phased-array antennas using chirped-fiber gratings[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1997, 9(11): 1529-1531.
- [21] Yi X, Li L, Huang T X, et al. Programmable multiple true-time-delay elements based on a Fourier-domain optical processor [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(4): 608-610.
- [22] Li W, Zhu N H, Wang L X, et al. True-time delay line with separate carrier tuning using dual-parallel MZM and stimulated

- Brillouin scattering-induced slow light [J]. *Optics Express*, 2011, 19(13): 12312-12324.
- [23] Lembo L, Ghelfi P, Bogoni A. Analysis of a coherent distributed MIMO photonics-based radar network[C]//2018 15th European Radar Conference (EuRAD). IEEE, 2018: 170-173.
- [24] Zhang F Z, Gao B D, Pan S L. Photonics-based MIMO radar with high-resolution and fast detection capability [J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17529-17540.
- [25] Xiao X D, Li S Y, Peng S W, et al. Photonics-based wideband distributed coherent aperture radar system [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33783-33796.
- [26] Tegegne Z, Bin C, Fromenteze T, et al. Single channel microwave photonics digital beamforming radar imaging system [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(3): 675-681.
- [27] Gao B D, Zhang F Z, Zhao E M, et al. High-resolution phased array radar imaging by photonics-based broadband digital beamforming [J]. *Optics Express*, 2019, 27(9): 13194-13203.
- [28] Dong J W, Zhang F B, Jiao Z K, et al. Microwave photonic radar with a fiber-distributed antenna array for three-dimensional imaging [J]. *Optics Express*, 2020, 28(13): 19113-19125.
- [29] Gao B D, Zhang F Z, Sun G Q, et al. Microwave photonic MIMO radar for high-resolution imaging[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2021, PP(99): 1-1 10.1109/JLT.2021.3070591.
- [30] Zhang F Z, Guo Q S, Pan S L. Photonics-based real-time ultra-high-range-resolution radar with broadband signal generation and processing [J]. *Scientific Reports*, 2017, 7: 13848.
- [31] Ye X W, Zhang F Z, Yang Y, et al. Photonics-based radar with balanced I/Q de-chirping for interference-suppressed high-resolution detection and imaging [J]. *Photonics Research*, 2019, 7(3): 265-272.
- [32] Li J, Stoica P. MIMO radar with colocated antennas [J]. *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, 24(5): 106-114.
- [33] Bekkerman I, Tabrikian J. Target detection and localization using MIMO radars and sonars [J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2006, 54(10): 3873-3883.