

微波光子雷达组网技术

范北辰, 杨悦, 马丛, 王祥传, 张方正, 潘时龙

(南京航空航天大学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: 雷达组网是目前雷达领域的研究热点之一。通过对空间区域进行多角度、多频段、多域协同探测, 雷达组网能够获取目标的多维度信息, 并利用数据的融合处理进一步地提升系统的目标探测与识别性能。随着系统对信号质量、信息传输链路带宽以及系统同步精度等需求的日益增长, 基于微波光子技术实现信号产生、传输和处理的雷达组网正逐渐获得研究者的关注。本文分析了微波光子雷达组网关键技术的工作原理, 介绍了近年来国内外微波光子雷达组网的发展现状, 并探讨了其未来的演进方向。

关键词: 雷达组网; 微波光子雷达; MIMO 雷达; 分布式相参雷达

中图分类号: TN957.52; TN958 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2337(2021)02-0195-13

Microwave Photonic Radar Network

FAN Beichen, YANG Yue, MA Cong, WANG Xiangchuan, ZHANG Fangzheng, PAN Shilong

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

Abstract: Radar network, one of the hot topics in the area of radar, can perform multi-angle, multi-band and multi-domain collaborative detection of targets. Thanks to the capability of multi-dimensional information fusion, radar network can greatly improve the target detection and recognition performance. With the increasing demands of radar network performance in terms of bandwidth, distance and synchronization accuracy of information transmission links, microwave photonic radar network is gaining great attention from researchers, on account of its capability of high-quality microwave signal generation, processing and phase-stable transmission. This paper analyzes key technologies in microwave photonic radar networks, reviews the recent advancement and discusses its possible research direction in the future.

Key words: radar network; microwave photonic radar; MIMO radar; distributed coherent radar

0 引言

雷达组网, 通过对多部雷达进行合理配置和优化部署, 增加了系统的自由度, 实现了对覆盖区域的信号截获、目标探测等能力的大幅提升。传统的多基地雷达系统, 可以通过观测目标不同散射角度的雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)起伏特性, 获得一定的空间分集增益, 从而突破单基地雷达的探测性能瓶颈, 应对电子干扰、超低空突防、反辐射导弹以及隐身武器等“四大威胁”所带来的挑战。近年来, 随着多输入多输出(Multiple Input Multiple Output, MIMO)雷达以

及分布式全相参雷达等新型探测体制的逐渐成熟, 雷达组网系统正逐渐成为多基地雷达系统协同探测的高级形式^[1-6]。然而, 新体制雷达的引入以及数据的融合处理对雷达组网链路架构也提出了更高的要求: 1) 为了保证信号的相参融合处理, 系统需要实现更高质量的多波段相参或正交信号产生; 2) 探测信号带宽的提升对高容量且稳定的数据传输链路有了进一步的需求, 且为满足分布式系统节点之间信号的高度一致性, 需要精确的同步校准以提升系统的探测性能; 3) 宽带雷达信号的多维度接收, 包括回波的频率、相位、极化等信息, 需要对传统的雷达接收机进行性能优化。传统基于电学的射频解决方案难以满足上述需求。

近年来,微波光子学的发展为上述问题提供了新的解决思路和优化方案^[7-11]。在信号产生方面,微波光子技术可在本地生成多路多频段相参微波信号^[12-16]与正交信号^[17-20]。与传统电学模拟射频信号产生方案相比,光生微波技术在频率灵活性和相噪特性方面有着明显的优势。在雷达信号传输及分发方面,携带有雷达波形的多路相参光信号在中心站生成后,可通过光纤稳相传输至各雷达基站。光纤的大带宽(>1 THz)和低损耗(0.2 dB/km)特性保证了宽带传输链路的高效和稳定。在雷达信号接收方面,微波光子宽带雷达接收机也为回波信号的多域多维(时域、空域、频域以及幅度、相位、极化等维度)接收处理提供了坚实的技术支撑。通过借鉴同源本振和分集 MIMO 的思路,国内外专家学者逐渐提出并实验验证了多种微波光子雷达组网系统架构的可行性和优越性。

本文将介绍近年来用于雷达组网系统中的微波光子雷达信号产生、传输和接收处理等关键技术及其工作原理,并回顾微波光子雷达组网的系统架构及其研究进展,同时对未来可能的发展方向进行展望。

1 微波光子雷达组网中的关键技术

随着微波光子技术的快速发展和不断成熟,微波信号的光学产生、传输以及接收处理等方向产出了丰硕的研究成果,为雷达组网系统带来了新的可能性。下面将分别对雷达组网系统中微波信号光学产生、长距离光纤稳相传输、微波光子信号接收处理等关键技术及其工作原理进行介绍和分析。

1.1 微波信号光学产生

微波信号光学产生方法是微波光子技术领域的研究重点。借助光子技术的优势可生成一系列参数优良的微波信号,包括正交化、多频段的大带宽微波信号以及低相噪的宽带捷变频本振信号等。雷达组网系统对信号的正交性、可复用性要求较高,如何产生满足这两种性质的高质量微波信号成为微波光子雷达组网系统需要首先考虑的问题。针对上述情况,目前微波光子雷达组网中微波信号光学产生方案主要分为两类,分别是多

路多波段相参信号产生方案和正交信号产生方案。其中,相参信号产生方案包括基于锁模激光器的多路信号产生以及基于双光频梳的多波段信号产生等,正交信号产生方案包括基于双输出光电调制器的相位编码-线性调频信号产生以及基于光电振荡器的混沌信号产生等。

1.1.1 基于锁模激光器的多路信号产生

锁模激光器(Mode-Locked Laser, MLL)可被用于产生多路的低相噪微波信号^[12],其基本原理如图 1 所示。由具有超低时延抖动特性的锁模激光器输出一串光频梳(Optical Frequency Comb, OFC),将其分成两路,分别用光滤波器选出一根梳齿,其中一根梳齿用于调制雷达基带信号;另一根梳齿经过移频操作后,在光电探测器中与前一组选出的梳齿进行拍频,产生待发射的雷达信号。通过在不同通道选取不同的梳齿便可以产生多路频率步进可调的微波信号。锁模激光器的超低时延抖动特性对克服电子高频采样极限有着重要意义,同时也可保证所产生信号的超低相噪特性。并且,锁模激光器的锁相结构也保证了其产生信号之间的相位同步性。值得注意的是,由于该 MLL 产生的光频梳同时也在接收端用作光采样信号,故其脉冲重复频率限制了基带信号的带宽,从而影响了该雷达系统的成像分辨率。通过采用高脉冲重复率的主动锁模激光器,该限制将会得到一定的改善^[13]。在后续的研究工作中,研究者将该结构生成的多路相参信号通过光纤远距离传输至分布式雷达基站,完成微波光子分布式相参雷达组网的搭建。

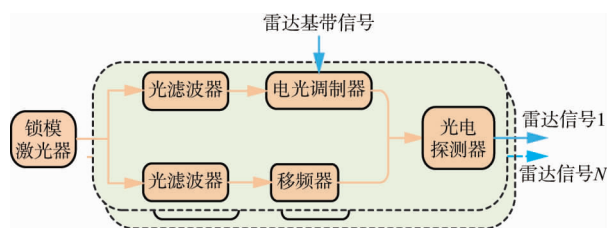


图 1 基于 MLL 的多路信号产生

1.1.2 基于双光频梳的多波段信号产生

基于双光频梳的可重构多波段线性调频信号产生方案于 2018 年被提出并进行了实验验证^[16],实验链路如图 2 所示。同一激光源产生的光载波信号被分为两路,其中一路产生一组自由光谱范围(Free Spectral Range, FSR)为 f_{FSR} 的光频梳,并在双平衡

光电调制器内用中频线性调频(Intermediate Frequency Linearly Frequency Modulated, IF-LFM)信号调制,生成携带有调制信号的光频梳;另一路光载波移频 f_s 后在电光调制器3中经频率为 $f_{FSR} + \Delta f$ 的微波信号调制(Δf 为步进频率),生成FSR为 $f_{FSR} + \Delta f$ 的多频光学本振作为参考信号。两路信号经混频拍频之后将产生一组具有不同中心频率的步进频 LFM 信号。通过调整两串 OFC 之间的频移,可以灵活地调谐线性调频信号的中心频率。需要注意到,当有 N 条频梳时,如果满足如

下两个条件:1) 进行电光调制的中频线性调频信号的带宽等于两个光频梳 FSR 的差值;2) 光可调延时线(Optical Tunable Delay Line, OTDL)产生的时延等于 IF-LFM 信号的持续时间。将通过光滤波器的信号在光域里延时拼接后拍频,将可产生时宽带宽积(Time-Bandwidth Product, TBWP)达到原中频线性调频信号 N^2 倍的微波信号。需要注意到,调节 OTDL 实现多路光信号时域拼接需要实现光延时的精确匹配。因此,该方案的可复现性受到了一定的限制。

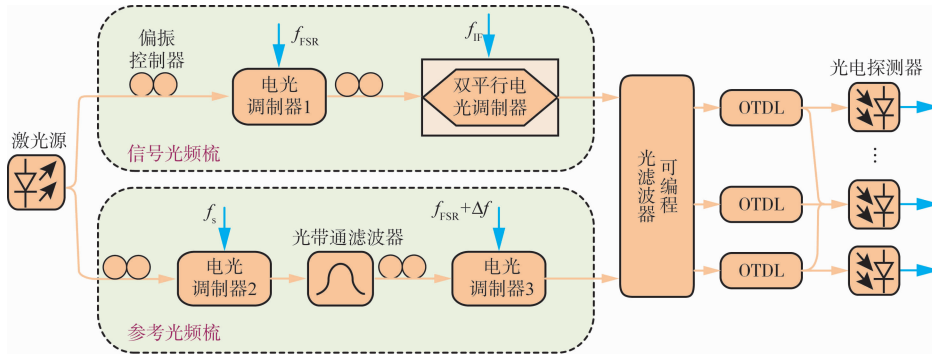


图2 双光频梳生成多波段信号

1.1.3 相位编码-线性调频信号产生

现代雷达系统中,线性调频信号与相位编码信号是脉冲压缩雷达常用的信号形式。相较于线性调频信号,相位编码信号通过设计编码序列,可以更为便捷地满足信号的正交需求。近些年来,一系列光域相位编码信号生成方案^[17-20]相继被提出。在此基础上,如何将光域生成的相位编码信号应用在微波光子雷达,或进一步地应用于微波光子雷达组网中,值得继续深入探索。这样的背景下,研究者于2018年提出了多路正交的相位编码-线性调频(Phase Coded Linear Frequency Modulated, PC-LFM)信号的光学产生方案并将其应用于分布式相参孔径雷达^[21]。在该雷达系统中,其信号产生链路主要的相位编码模块如图3所示。

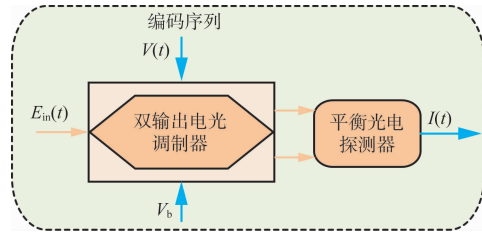


图3 相位编码-线性调频信号光学生成

假设调制有线性调频信号的光载波信号 $E_{in}(t)$,其表达式为

$$E_{in}(t) = E_0 e^{j2\pi f_0 t} \cdot \cos \left[m \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2) + \frac{\pi}{4} \right] \quad (1)$$

式中, E_0 和 f_0 分别为光载波的幅度和频率, m 为光电器件调制系数, f_0 和 k 分别为线性调频信号

的初始频率和调频斜率。将该信号加入相位编码模块,当加载的相位编码序列 $V(t) = V_0 \varphi(t)$ 时,双输出光电调制器(Dual-Output Mach-Zehnder Modulator, DO-MZM)的输出为

$$\begin{cases} E_1(t) = E_{in}(t) [e^{j\pi V(t)/2V_\pi + j\pi V_b/V_\pi} + e^{-j\pi V(t)/2V_\pi}] \\ E_2(t) = E_{in}(t) [e^{j\pi V(t)/2V_\pi + j\pi V_b/V_\pi} - e^{-j\pi V(t)/2V_\pi}] \end{cases} \quad (2)$$

式中, V_0 为相位编码信号的幅度, $\varphi(t)$ 为二相编码的相位,即“+1”或“-1”, V_π 和 V_b 分别为调制器的半波电压和偏置电压。将此两路光信号通过平衡光电探测器(Balanced Photodetector, BPD)后,输出的射频信号可表示为

$$\begin{aligned} I(t) &\propto |E_1(t)|^2 - |E_2(t)|^2 = \\ &2 |E_{in}(t)|^2 \cos \left[\frac{\pi}{V_\pi} V(t) + \frac{\pi V_b}{V_\pi} \right] = \\ &E_0^2 [1 - \sin(2m \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2))] \cdot \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \cos\left[\frac{\pi}{V_{\pi}}V(t) + \frac{\pi V_b}{V_{\pi}}\right] \propto \\ & -2J_1(2m)E_0^2 \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2) \cdot \\ & \cos\left[\frac{\pi}{V_{\pi}}V_0\varphi(t) + \frac{\pi V_b}{V_{\pi}}\right] \end{aligned} \quad (3)$$

当 DO-MZM 的偏置电压设置为半波电压的一半,即调制器偏置在正交点时,即可得到如式(4)所表示的脉内相位编码-脉间线性调频信号波形:

$$I(t) \propto \begin{cases} 2J_1(2m)E_0^2 \sin\left(\frac{\pi}{V_{\pi}}V_0\right) \cdot \\ \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2), \varphi(t) = +1 \\ 2J_1(2m)E_0^2 \sin\left(\frac{\pi}{V_{\pi}}V_0\right) \cdot \\ \cos(2\pi f_0 t + k\pi t^2 + \pi), \varphi(t) = -1 \end{cases} \quad (4)$$

当多波段相参线性调频信号分为多路并各自接入相位编码模块,通过编码序列的精确设计,即可生成正交的二相编码-线性调频雷达信号并应用于分布式相参雷达系统。

1.1.4 基于光电振荡器的混沌信号产生

光电振荡器 (Opto-Electronic Oscillator, OEO) 一般用于超低相噪的微波本振信号产生^[22],但当其工作于混沌状态时,也可以产生具有良好正交性的低相噪信号^[23]。常见的 OEO 链路由激光器、马赫-曾德尔电光调制器、单模光纤、电带通滤波器以及电放大器等组成,如图 4 所示。在 MZM 后接入光分束器使得部分光信号作为光电振荡反馈信号进入振荡环路,当反馈增益足够大时,该光电振荡器将陷入混沌振荡状态,产生混沌信号。由于混沌信号类随机特性以及对初始值的敏感特性,当其从不同的初始状态振荡时,不同的振荡链路便可产生相互正交的混沌信号。基于光电振荡器产生的混沌信号有着较大的带宽,被用在分布式系统定位时可保证延时估计的准确性,提高定位系统的精度。在文献^[23]给出的实

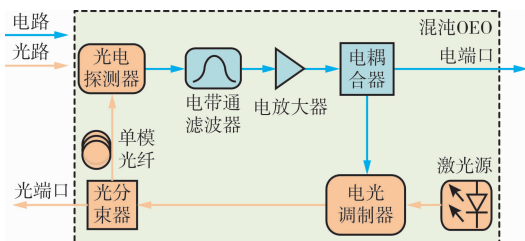


图 4 混沌 OEO 链路图

验结果中,其最大定位误差小于 6.5 cm。

1.2 微波信号光纤稳相传输

雷达组网系统中,各个基站间需要实现信号的时间同步、相位同步等。在微波光子雷达组网中,微波信号通过长距离光纤传输后,除了需要考虑本振噪声对多基地雷达的影响外^[24-28],光纤受环境影响产生的延时抖动也会对信号的相位稳定造成显著的恶化。为此,人们在上世纪 80 年代提出了基于光纤的射频信号稳相传输技术^[29]。近年来随着微波光子技术逐渐走向应用,结合光子技术实现长距离稳相传输重新成为研究热点^[30-34]。此节将介绍并分析基于混频器以及基于微波光子锁相环的微波信号稳相传输技术。

1.2.1 基于混频器的微波信号光纤稳相传输

基于混频器的稳相传输方案属于被动式的稳相,大致可分为后补偿与预失真两种。其中,后补偿式方案的原理为:在接收端引入一个辅助信号,其频率为待传输微波本振信号频率的一半。让该辅助信号在传输光纤中往返传输两次,得到的延时为本振信号在光纤中从发送端单向传输至接收端延时的两倍。由此,参考信号经传输造成的相位抖动与本振信号传输后的相位抖动相同,在接收端通过混频使两者相互抵消,从而得到光纤传输后的稳相射频信号^[31]。然而,此稳相传输方案需要提供另一个低相噪辅助信号,在实际场景中,其可行性与成本问题对其应用范围产生了一定限制。

针对后补偿式稳相传输的不足之处,研究者提出了改进的预失真式稳相传输方案^[32],如图 5 所示。在发送端利用分频器生成传输信号一半频率的辅助信号,将其分为两路,一路先与待传输信号混频并取上变频项;另一路送入传输链路来回传输两次,得到与传输线路延时对应的相位共轭项。将携带有相位共轭项的微波信号与前面得到的上变频信号进行混频并取下变频项,使得待传输的微波信号频率保持不变,但附加了相位预补偿信息,实现微波信号的稳相传输。

基于混频器的微波信号光纤稳相传输技术简单易行,但在信号的混频过程中会多次叠加信号噪声,对信号相位的短期稳定性造成一定程度的恶化。

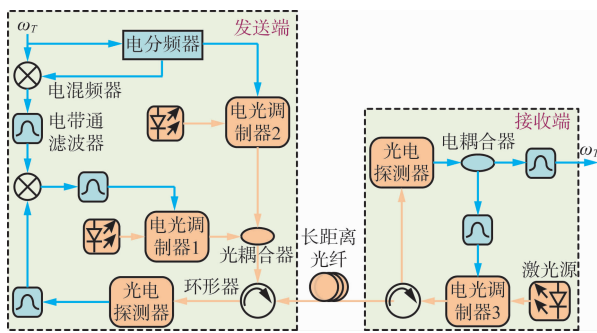


图5 预失真式稳相传输

1.2.2 基于锁相环的微波信号光纤稳相传输

与被动式稳相传输链路相比,锁相环稳相传输可以在不影响相位短时稳定性的前提下提高链路的长时稳定性。结合微波光子移相器和光可调延时线,研究者提出了双锁相环微波信号光纤稳相传输方案^[30],其链路如图6所示。该链路包含了微波光子移相器和电可调光延时线两个相位调节器,其中,微波光子移相器可在360°范围内移相,但是由于需要调节偏振控制器,其调节精度和速度受限;电可调光延时线虽然调节精度高反应

速度快,但对于频率为数GHz的微波信号来说,其调节范围太小,可能会造成锁相环失锁等问题。双锁相环方案结合了两者的优势,通过搭建并行的快慢双锁相环,可以做到同时兼顾快速小幅的相位抖动和缓慢大范围的相位变化。待传输微波源信号通过偏振调制器(Polarization Modulator, PolM)加载到光载波上,经过微波光子移相器后进入光纤稳相链路。在接收端处,光信号被光耦合器分为两部分:一部分通过光电探测器得到稳相的微波信号;另一部分经光反射镜原路返回至发射端,经过光环形器进入锁相环。返回的光信号通过光电探测器拍频得到微波信号,将其与待传输信号鉴相,得到光纤链路引入的相位差信号,通过该相位差信号反馈控制可调光延时线或者微波光子移相器,完成双锁相环的构建。为保证锁相环的长期稳定工作,该方案添加了比例积分微分电路来适当处理相位差信号。当锁相环链路稳定后,得到相位预补偿的传输光信号经过光传输链路后经光电探测器拍频,得到的微波信号可以保证相位的稳定。

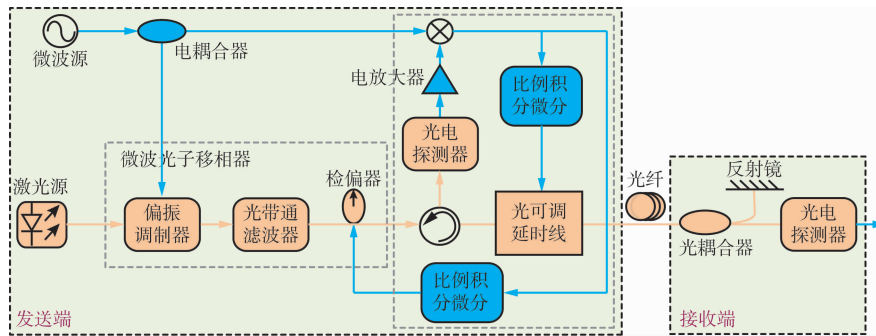


图6 双锁相环微波信号光纤稳相传输

1.3 微波光子信号接收处理

雷达组网提出的目标之一便是为了多域多维地全方位探测目标区域内的有用信息,因此对雷达接收机提出了更高要求。研究者结合光子优势,针对目标探测所需的相位、极化等回波信息,公开发表了一系列微波光子宽带雷达接收机的研究成果,实现了对目标频率、相位、极化等所需信息的探测。微波光子雷达信号接收处理的研究成果拓宽了微波光子雷达接收机的研究领域和适用场合,同时也为微波光子雷达组网系统提供了更为坚实的研究基础和更多可能的发展方向。

1.3.1 去斜接收

微波光子雷达的去斜接收可理解为在光域里实现雷达信号的下变频和去啁啾处理,得到携带目标回波信息的低频信号。此处以载波抑制双边带调制去斜接收四倍频信号为例,光谱图如图7所示。参考信号的光谱为载波抑制的±2阶边带(图7(a)),当接收到四倍频回波信号后,-2阶的参考信号边带调制到+2阶或-6阶,+2阶的参考信号边带调制到-2阶或+6阶,且雷达发射信号在自由空间中传播后会产生携带位置信息的频移(图7(b)),通过光带通滤波器选出+2阶或者-2阶光边带后(图7(c))送入光电探测器拍频,该频移差值即可被转换为电信号(图7(d))。拍频得到

的信号通常仅为兆赫兹量级,对 A/D 转换的采样率要求随之降低。在此基础上,后续的数字域中需要处理的数据量也大大减少,采用相对应的算法对回波数据进行二维成像,即可完成实时高分辨率逆合成孔径雷达(Inverse Synthetic Aperture Radar, ISAR)成像系统的搭建^[8]。值得注意的是,单通道的光子混频去斜存在着镜频干扰的影响,混淆目标相对参考点的位置判断;进一步地,在 ISAR 成像中,镜频带来的对称点目标也会影响到成像效果。

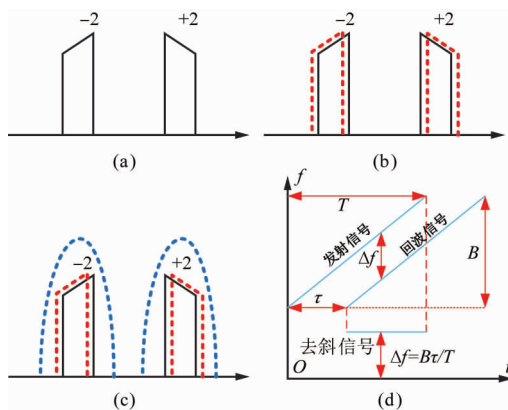


图 7 去斜接收过程光谱图及时频图

1.3.2 同向/正交(I/Q)解调接收

利用光子 90° 混波器与光电平衡探测可实现在光域中对微波信号的同向/正交(I/Q)解调接收。该方案的提出解决了光子混频去斜接收中存在的由镜频干扰导致的距离向模糊问题。以两倍频的 I/Q 解调雷达收发机为例^[35],装置框图如图 8 所示。将电光调制器的偏置电压调制到最大传输点,生成带有光载波与正负二阶边带的光信号。将其分成两路,一路作为参考信号传至接收机,另一路拍频后选取二倍频微波信号发射到自由空间中。参考信号在进入 90° 光混波器之前先通过光带通滤波器,选取 $+2$ 阶或 -2 阶的光边带作为去斜参考信号;接收到的二倍频回波信号通过另一个电光调制器调至正负一阶边带信号。值得注意的是,此处由回波信号调制产生的一阶边带,其调频斜率与参考信号的二阶边带相同,因此可以完成后续的去斜接收。接着,这里给出 90° 光混波器的输出矩阵:

$$\begin{bmatrix} e_{I+}(t) \\ e_{I-}(t) \\ e_{Q+}(t) \\ e_{Q-}(t) \end{bmatrix} \propto \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \\ 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{\text{ref}}(t) \\ e_{\text{echo}}(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中, $e_{\text{ref}}(t)$ 和 $e_{\text{echo}}(t)$ 分别为参考光信号和回波调制光信号。将光混波器的 4 个输出信号分别接入两个光电平衡探测器,即可实现对雷达回波信号的 I/Q 解调接收。与单通道光子去斜的方案相比,此方案通过平衡检测解决了镜频干扰,同时提高了去斜信号频率分量的功率,优化了探测效果。然而,该结构需要两路光纤传输参考信号实现去斜,当应用于微波光子分布式雷达系统中时,会使得光纤传输网络复杂化;且当传输距离较远或者两路器件不匹配时,两路延时的校准也相对困难。因此,该系统方案需要实现对传输参考信号的链路进行简化。

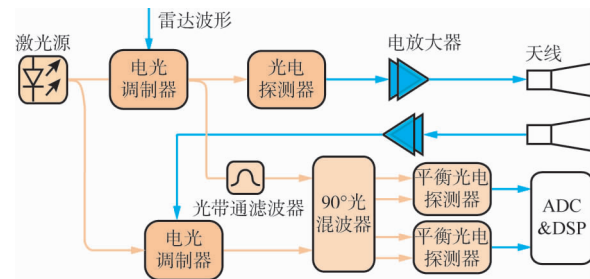


图 8 微波光子 I/Q 解调接收

1.3.3 极化接收

微波光子全极化雷达接收机研究成果的公开发表^[36]证明了利用微波光子技术测量雷达目标极化散射矩阵的可行性。如图 9 所示,在发射机中,在双偏振-双平行马赫-曾德尔调制器(Dual-Polarization Dual-Parallel Mach-Zehnder Modulator, DPoI-DPMZM)的一个偏振态上将任意波形发生器(Arbitrary Waveform Generator, AWG)产生的 LFM 信号调制到光载波上,并在另一个偏振态上调制出正负一阶边带。通过偏振分束器将 DPoI-DPMZM 输出信号分为两路,一路送入发射机,通过光带通滤波器后拍频出两路相反调频斜率的宽带线性调频信号发射出去;另一路则作为两个极化方向的激励参考信号送入接收机。在接收机中,用两根天线接收回波信号,并将其送入双偏振电光调制器。通过该电光调制器将接收到的回波信号分别调制到参考光载波信号的两个偏振态上,最后配合偏振分束器,利用光域的偏振分束完成对微波信号极化的区分,通过光电探测器拍频,完成对 4 个极化微波信号分量的接收。

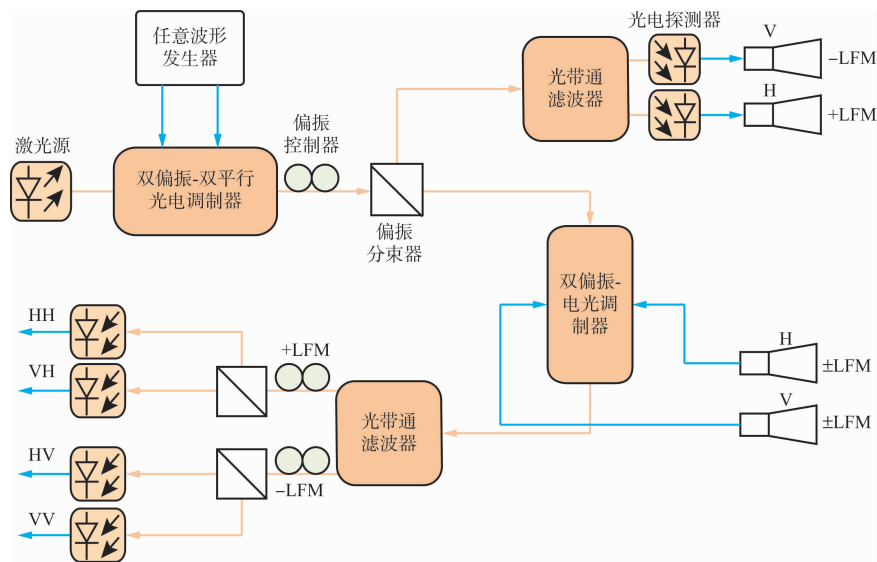


图9 微波光子全极化雷达接收机

2 微波光子雷达组网架构研究进展

随着微波光子雷达中关键技术的演进与迭代,微波光子雷达组网的发展主要经历了以下几个阶段:

1) 基于光载无线电(Radio over Fiber, RoF)技术的多基地远端探测^[37-39]。此阶段暂未提出微波光子雷达概念,基站系统仍为电微波器件组成。由于同轴电缆的笨重、昂贵,研究者在信号传输过程中使用了更为轻便且抗电磁干扰的光纤链路。并且,光纤的大带宽、低传输损耗特性还可以减少微波毫米波信号在自由空间中的衰减。RoF技术的运用扩大了原有多基站雷达的分布范围。

2) 微波光子分布式雷达组网^[23,40-46]。此阶段可以认为是微波光子雷达组网概念的萌芽,从信号产生、传输到接收都采用光子器件,光学方法产生的大带宽信号提升了系统定位的精度;同时,双/多基地雷达的收发分置特性也通过光纤链路被巧妙地应用到了此类系统之中。研究者利用到达时间(Time of Arrival, TOA)定位原理做了多基地联合定位,验证了基于微波光子技术的多基地雷达系统在探测精度、基站同步等方面的优越性。

3) 微波光子 MIMO 雷达^[47-48]。作为雷达组网里不可缺少的系统架构,微波光子 MIMO 雷达的提出丰富了微波光子雷达组网的框架,为组网内基站节点的信号收发架构和复用形式提供了新

的思路和研究领域,并且到达角(Direction of Arrival, DOA)估计和 MIMO 目标定位的实验也验证了微波光子 MIMO 雷达在角度分辨率和估计误差等方面的优势。

4) 微波光子分布式相参雷达组网^[21,49-51]。分布式相参雷达系统采用多个分布式可移动的、天线孔径相对较小的雷达,通过先进信号处理技术提升系统探测性能,自提出以来便逐渐成为雷达领域的研究热点。微波光子学由于其在相参信号产生、分布式光纤网络等研究领域深厚的技术积淀,被认为是开发分布式相参雷达组网的重要技术之一。

2.1 基于 RoF 技术的多基地远端探测

RoF 传输是微波光子学的重要研究方向之一。在基于 RoF 传输的多基地远端探测系统中,微波信号的产生和处理可以在中心站完成,通过光纤链路将微波信号传输至远端的探测基站。探测基站将中心站传输来的信号进行光电转换并发射出去,再将接收到的回波信号调制到光载波上通过光纤链路传输回中心站。日本监察通讯部电子导航研究所用此技术在机场外来物(Foreign Object Debris, FOD)探测领域进行了一系列的研究^[38-39]。通过长距离传输光纤,本地信号产生系统与远端的毫米波探测模块相连接,构成全新的 FOD 检测系统,扩大了原 94 GHz 雷达系统的探测范围。同时,研究者们也对该系统的 RoF 链路

稳定性和 FOD 检测性能进行了一定的分析与研究,证实了将光纤传输网络应用于多传感器探测系统的可行性。

2.2 微波光子分布式混沌组网

随着光生微波技术的成熟,波分复用技术以及光纤传输的大带宽优势被逐步应用在雷达组网中。2015 年,南京航空航天大学潘时龙课题组提出了基于波分复用技术的分布式混沌雷达^[23],其框架如图 10 所示。多个雷达基站通过 OEO 产生正交的混沌信号,由天线发射至自由空间后,由位于空间另一处的天线接收散射信号并在接收站调制到光载波上。发射站的光参考信号与接收站的回波调制光载波信号通过波分复用光纤网络传输至中心基站,在中心站内完成后续的数据融合处理。由于光纤长度的确定,时间同步过程随之简

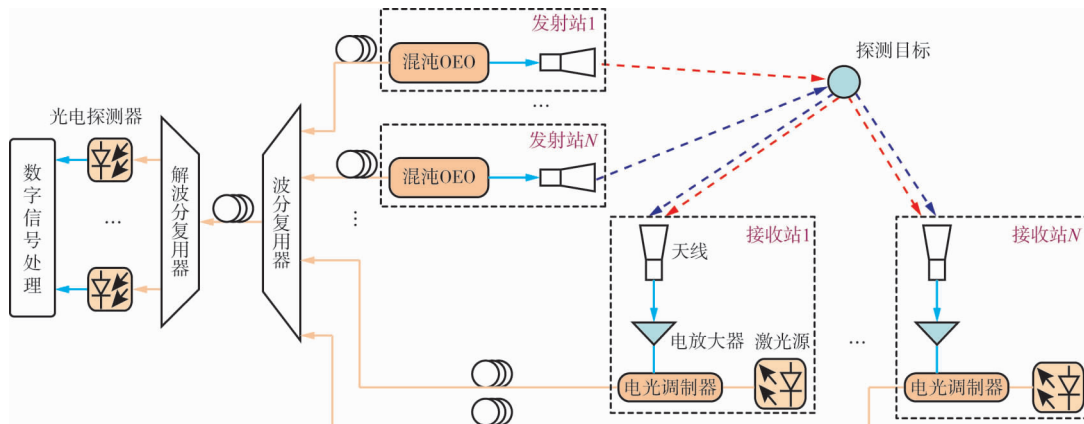


图 10 微波光子分布式混沌雷达

上述微波光子雷达组网架构中,信号是由多个发射站独立产生并由各个接收站分别接收的,这样的非相参架构在进行信号处理时相对快捷,且由于各基站间的光纤长度相对固定,完成各基站间的时间同步只需补偿光纤传输链路带来的延时。

2.3 微波光子集中式 MIMO 雷达

2018 年,南京航空航天大学潘时龙课题组提出了基于波分复用和频率分集的微波光子集中式 MIMO 雷达^[47],其结构如图 11 所示。该结构在发射端通过光子倍频技术实现大带宽的频率分集线性调频信号生成,在接收端结合了波分复用技术和光子去斜技术完成对频率分集 LFM 信号的接收处理。当 N 个接收天线接收 M 个不同频段的回波信号后,在电光调制器中将

化,同时,波分复用技术进一步完善了中心站的信号接收处理过程,有力地推动了微波光子学在分布式多基地雷达系统中的创新与应用。

2018 年,该课题组又提出了基于波分复用技术的光纤分布式超宽带雷达组网并进行了实验验证^[43]。该雷达组网系统与上述微波光子分布式混沌雷达都是通过波分复用技术实现的分布式多基地雷达系统,区别在于此分布式超宽带雷达组网采用光生超宽带脉冲信号作为探测信号。在信号产生端,高斯脉冲序列对光载波阵列进行相位调制,随后调相光载波通过解波分复用器分离并由单模光纤传输至远程雷达基站。各雷达基站收发超宽带脉冲信号,并将回波信号传输回中心基站进行信号处理,从而获取目标定位信息。在二维定位实验中,通过两个分布式的收发站,该系统实现了一厘米的定位精度。

制到携带有不同频段 LFM 信号的光载波参考信号上,在接收器中将不同波长的光载波信号分离并分别拍频,实现对每一路 M 个回波信号的区分,从而完成 $M \times N$ 个线性调频信号的光域去斜接收。基于光子技术的宽带信号生成以及去斜接收使得该 MIMO 雷达系统可以突破现有电子设备的带宽限制。在验证实验中,该系统对两个反射目标的到达角估计误差分别为 0.08° 和 0.19° ,达到较高的角度分辨率。

文献^[47]通过分析光电探测器中正确区分频率分集 LFM 信号应该满足的频率条件,解释了在光域里如何实现多波段回波信号去斜接收的过程,为今后的微波光子 MIMO 雷达架构提供了一定的理论支撑,同时也进一步充实了微波光子雷达组网系统的框架。

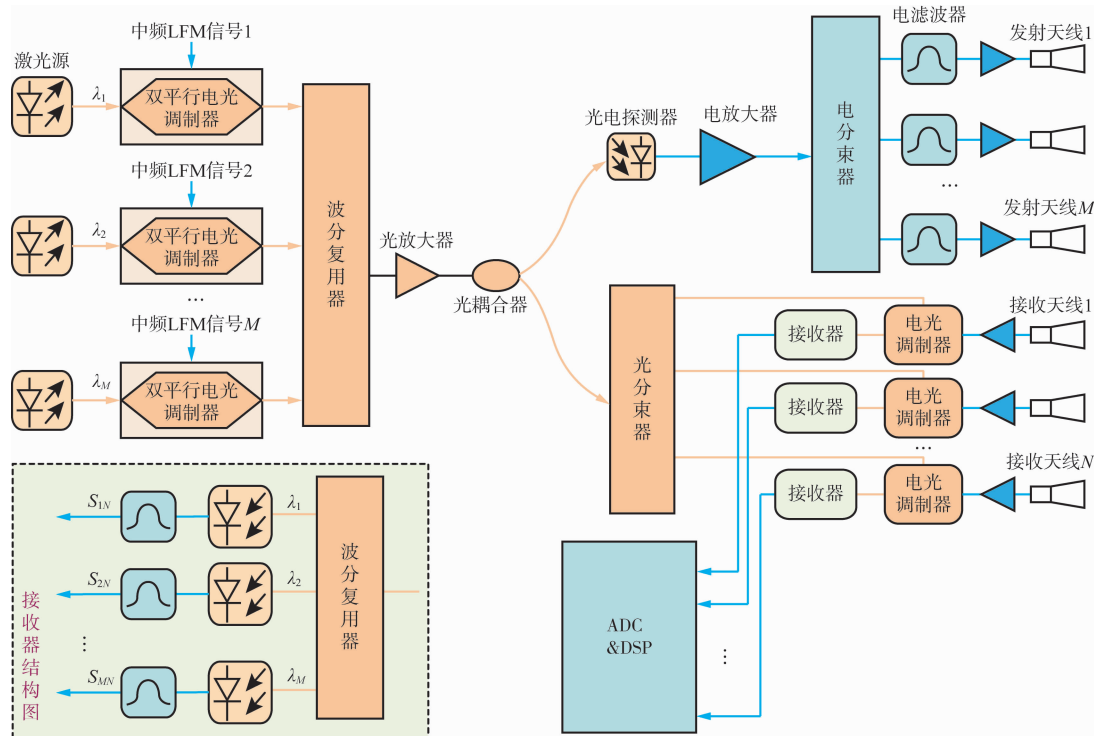


图 11 微波光子集中式 MIMO 雷达

2.4 微波光子分布式相参雷达组网

2018年,基于微波光子技术的宽带分布式相参孔径雷达(Distributed Coherent Aperture Radar, DCAR)系统被清华大学郑小平课题组提出并被实验验证^[21]。该雷达网络系统由中心处理控制系统,空间上分散的雷达收发机以及时间同步网络组成,如图12所示。中央控制系统完成信号产生和处理工作,通过多通道光任意波形发生器生成光载的正交且相干的相位编码-线性调频信号并传输至远端的收发机;由光可调延时线组成的时间同步网络完成不同远程收发机的同步;雷达收发机则仅执行光学/射频和射频/光学转换和信号收发功能。当该系统工作在接收相参模式时,每部雷达接收不同雷达基站发射波形的回波,通过与自身发射的波形作匹配滤波,计算相参参数和各基站到目标的距离。当系统工作在全相参模式时,各雷达根据相参参数调整发射波形的时间和相位,使得发射出的信号在目标处相参叠加,完成发射相参;其后通过数字信号处理,将每部雷达匹配滤波后的结果进行相参处理,实现收发全相参。在验证实验中,当一个X波段,带宽为3GHz的两单元微波光子DCAR

系统工作在全相参模式时,单个雷达的信噪比(SNR)增益达到8.3dB。

该系统通过利用光子技术在产生大带宽信号、搭建分布式光纤网络等领域的积累与优势,简化了远端雷达单元,降低了分布式系统的传输损耗,使得DCAR系统的性能得到了进一步的提升。在后续的工作中,该课题组改进了接收相参过程,提出了基于光子技术的宽带雷达相参接收结构,并对目标进行了ISAR成像实验^[51],完善了分布式相参孔径雷达系统。

2019年,意大利Bogoni课题组提出了基于光子学的相参MIMO雷达组网架构^[49-50]。该微波光子分布式MIMO雷达的实验验证系统由一个光学主时钟、本地协作处理系统和远程雷达基站组成,如图13所示。其中,光学主时钟由一个可视多频光本振的锁模激光器构成,其脉冲重复频率为 f_{PRF} 。雷达中频信号在电/光转换模块中被调制到MLL的多个频梳上,通过长距离光纤传输至远端雷达基站,并在雷达基站完成光电转换后发射到自由空间。由于不同雷达基站至目标的距离不同,为了实现发射相参,需要在光线传输线后添加光可调延时线控制发射信号的相关参数。同时,MLL产生的

频梳分出一路作为参考光信号,通过光纤传输至雷达基站。天线接收到回波信号经过放大滤波后,将其调制到参考光信号上,由光纤传输回

中心站,完成光电转换,得到回波信号中的探测信息。光纤同步网络的存在保证了多路宽带信号的收发相参性。

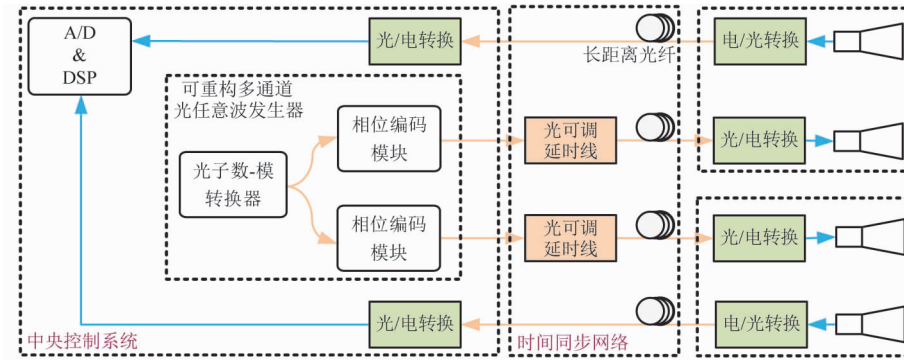


图 12 微波光子分布式相参孔径雷达

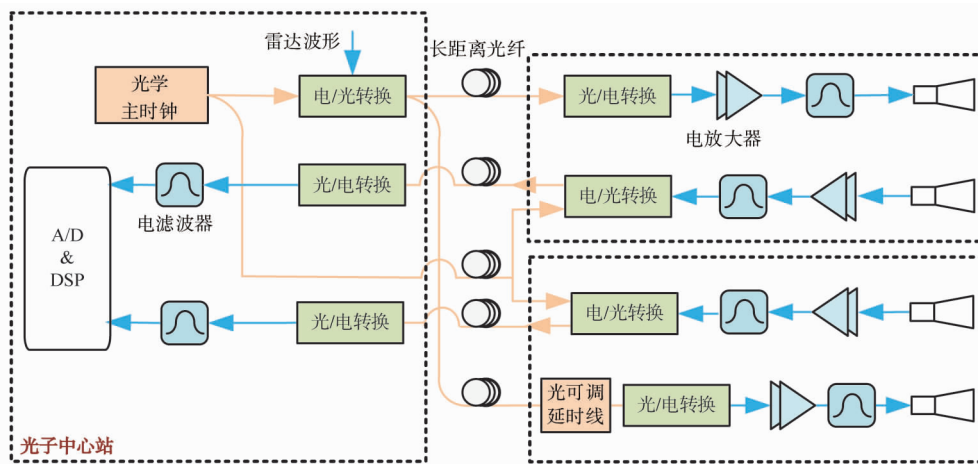


图 13 微波光子分布式相参 MIMO 雷达

在户外实验中,该分布式相参雷达系统由 MLL 生成两路相参的 X 波段雷达信号,带宽为 100 MHz。通过调节光可调延时线完成两路雷达基站的相参发射,并且在数字域经过相干 MIMO 处理后,检测精度提升了 20 倍,实现了精度为 10 cm 的合作目标探测。相较于室内实验条件,该外场实验是在存在杂波和干扰信号以及有着 RCS 波动和多径衰落等因素影响的真实环境下进行的,有效地验证了相参雷达信号光学产生方法的稳定性,以及光纤链接的相参 MIMO 雷达在工程应用中的可行性。

上述两种架构的提出验证了基于光子学发展分布式相干雷达网络的可行性:高度稳定的光子时钟以及光纤传输的稳定时延可以简化并实现分布式雷达节点的同步;同时,光纤大带宽传输特性使得分布式雷达各站点的信号可以集中产生,保

证信号之间的相参性。微波光子分布式相参雷达组网结合了分布式相参雷达和微波光子技术两者的优势,有望成为未来相干雷达网络发展的重要方向。

3 总结与展望

雷达组网作为现代雷达系统的重要发展方向之一,在战略预警、防空反隐、数据级探测信息融合等领域发挥着日趋重要的作用。解决雷达组网系统的关键技术难题是完成区域探测并进一步地实现多维度信息融合的基础与前提。在此背景下,微波光子技术的研究者们巧妙地将光子学的优势应用于雷达组网架构,开拓了微波光子雷达组网新方向,为微波光子技术和雷达组网系统提供了越来越多的可能性,同时也将面临更多挑战:

1) 对于微波光子雷达组网(以下简称组网)内各基站的信号产生与接收预处理,如何利用光子技术的优势,产生满足协同探测需求的微波信号,并在光域里实现对回波信号中携带着的多维信息的接收预处理,需要进一步的探索。同时,对于组网内各基站之间同步性能的量化分析,除了需要考虑系统的拓扑结构对网络节点接收信息的实时性带来的影响,环境因素对光纤传输网络带来的畸变、散射效应所造成的传输误差,同样值得研究者更为深入的研究。

2) 对于组网系统而言,当多个微波光子功能模块级联时,其链路信噪比将会受到多级电光/光电转换(包括调制器消光比、探测器响应度等)、长距离光纤传输带来的色散衰减以及掺铒光纤放大器引入的放大器自发辐射(Amplifier Spontaneous Emission, ASE)噪声等诸多因素的干扰,致使整个系统的性能恶化。如何将多基站内各个单元模块进行高效整合,提高系统整体的稳定性,成为微波光子雷达组网系统需要面临的重大挑战之一。

3) 对于组网协同探测算法的研究,需要考虑到微波光子产生信号的特性以及光纤传输网络的系统同步性能。例如,当利用微波光子雷达进行 ISAR 成像时,其回波信号的大带宽和较小波长的特性使得目标转动分量引起的二次项距离徙动和相位误差不可忽略,需要更高精度的补偿方法^[52-53];在进行组网雷达多目标跟踪时,多个分布式基站的数据频繁到来,且由于光纤的宽带数据传输能力,数据传输次数与单次传输的数据量相结合,使得中心处理基站接收到的数据存在着量级的提升,其计算资源面临严峻的挑战。因此,若要充分发挥出微波光子雷达组网的性能,对应数据处理的算法理论不可或缺。

4 结束语

本文对基于微波光子技术的多基地雷达组网系统进行了回顾、总结与展望。由于可以在光域中精细地产生、传输以及处理大带宽微波信号,微波光子技术逐渐受到国内外专家学者们的广泛关注,有着广阔的研究及应用前景。在此技

术基础上发展的微波光子分布式多基地雷达网络,在系统作用范围、定位精度以及成像二维分辨率等参数指标上可获得较大的优势,有着一定的发展潜力。本文详细介绍了现有的可用于微波光子分布式雷达系统中的微波信号生成技术、稳相传输方式以及多种回波信号去斜接收机结构,并对这些方法的优缺点进行了一定的分析与总结。同时,本文综合并归纳了已被提出的各微波光子分布式雷达组网结构,对该类微波光子链路系统可能的技术手段及未来发展方向作出了一定的展望,对今后的拓展研究起到一定的参考作用。

参考文献:

- [1] FISHLER E, HAIMOVICH A M, BLUM R S, et al. Spatial Diversity in Radars—Models and Detection Performance[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2006, 54(3): 823-838.
- [2] 徐洋,袁振涛,朱景雷,等. 网络化雷达现状及技术发展趋势[J]. 现代雷达, 2019, 41(10): 14-18.
- [3] HAIMOVICH A M, BLUM R S, CIMINI L J, Jr. MIMO Radar with Widely Separated Antennas [J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 25(1): 116-129.
- [4] CUOMO K M, COUTTS S D, MCHARG J C, et al. Wideband Aperture Coherence Processing for Next Generation Radar (NexGen) [R]. US: MIT Lincoln Laboratory, 2004.
- [5] 刘继业,陈西宏,刘强,等. 国外双(多)基地雷达发展现状及关键技术分析[J]. 飞航导弹, 2013(6): 54-59.
- [6] 郭冠斌,方青. 雷达组网技术的现状与发展[J]. 雷达科学与技术, 2005, 3(4): 193-197.
- [7] BOGONI A, GHELFI P, LAGHEZZA F. Photonics for Radar Networks and Electronic Warfare Systems [M]. London: IET SciTech Publishing, 2019.
- [8] ZHANG Fangzheng, GUO Qingshui, WANG Ziqian, et al. Photonics-Based Broadband Radar for High-Resolution and Real-Time Inverse Synthetic Aperture Imaging[J]. Optics Express, 2017, 25(14): 16274-16281.
- [9] 郭清水. 基于微波光子技术的实时高分辨率雷达系统研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2018.
- [10] 潘时龙,张亚梅. 微波光子雷达及关键技术[J]. 科技导报, 2017, 35(20): 36-52.
- [11] 田跃龙,刘志国. 微波光子雷达技术综述[J]. 电子科技, 2017, 30(5): 193-198.

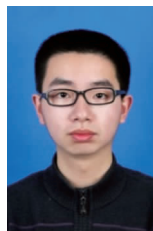
- [12] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A Fully Photonics Based Coherent Radar System[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [13] XU Shaofu, ZOU Weiwen, YANG Guang, et al. Ultra-High Range Resolution Demonstration of a Photonics-Based Microwave Radar Using a High-Repetition-Rate Mode-Locked Fiber Laser [J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(6): 1-5.
- [14] LEMBO L, GHELFI P, BOGONI A. Analysis of a Coherent Distributed MIMO Photonics-Based Radar Network[C]//15th European Radar Conference, Madrid, Spain :IEEE, 2018:170-173.
- [15] GAO Bindong, ZHANG Fangzheng, YAO Yao, et al. Photonics-Based Multiband Radar Applying an Optical Frequency Sweeping Comb and Photonic De-Chirp Receiving[C]//2018 Asia Communications and Photonics Conference , Hangzhou, China: IEEE, 2018:1-3.
- [16] CHEN Wenjuan, ZHU Dan, XIE Chenxu, et al. Photonics-Based Reconfigurable Multi-Band Linearly Frequency Modulated Signal Generation [J]. *Optics Express*, 2018, 26(25): 32491-32499.
- [17] ZHANG Fangzheng, GE Xiaozhong, GAO Bindong, et al. Phase-Coded Microwave Signal Generation Based on a Single Electro-Optical Modulator and Its Application in Accurate Distance Measurement [J]. *Optics Express*, 2015, 23(17): 21867-21874.
- [18] CHEN Yang, WEN Aijun, YAO Jianping. Photonic Generation of Frequency Tunable Binary Phase-Coded Microwave Waveforms[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, 25(23): 2319-2322.
- [19] LI Ze, LI Wangzhe, CHI Hao, et al. Photonic Generation of Phase-Coded Microwave Signal with Large Frequency Tunability [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(11): 712-714.
- [20] LIU Shifeng, ZHU Dan, WEI Zhengwu, et al. Photonic Generation of Widely Tunable Phase-Coded Microwave Signals Based on a Dual-Parallel Polarization Modulator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3958-3961.
- [21] XIAO Xuedi, LI Shangyuan, PENG Shaowen, et al. Photonics-Based Wideband Distributed Coherent Aperture Radar System [J]. *Optics Express*, 2018, 26(26): 33783-33796.
- [22] 刘世锋, 徐晓瑞, 张方正, 等. 超低相噪光电振荡器及其频率综合技术研究[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 243-250.
- [23] YAO Tingfeng, ZHU Dan, BEN De, et al. Distributed MIMO Chaotic Radar Based on Wavelength Division Multiplexing Technology [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(8): 1631-1634.
- [24] LAU K Y, LUTES G F, TJOELKER R L. Ultra-Stable RF-over-Fiber Transport in NASA Antennas, Phased Arrays and Radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3440-3451.
- [25] KRIEGER G, YOUNIS M. Impact of Oscillator Noise in Bi-Static and Multi-Static SAR [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2006, 3(3): 424-428.
- [26] WANG W Q, DING C B, LIANG X D. Time and Phase Synchronisation via Direct-Path Signal for Bi-static Synthetic Aperture Radar Systems [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2008, 2(1): 1-11.
- [27] WANG Xiangchuan, LI Shupeng, JIANG Xin, et al. High Accuracy Optical Time Delay Measurement in Fiber Link [J]. *Chinese Optics Letters*, 2019, 17(6): 5-10.
- [28] LI Shupeng, WANG Xiangchuan, QING Ting, et al. Optical Fiber Transfer Delay Measurement Based on Phase-Derived Ranging [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2019, 31(16): 1351-1354.
- [29] PAN J J. Fiber Optics and Opto-Electronics for Radar and Electronic Warfare Applications [C]// International Society for Optics and Photonics, [S. l.]: [s. n.], 1987: 23-31.
- [30] 魏娟. 面向分布式相参雷达的微波光子信号产生与传输研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
- [31] WEI Juan, ZHANG Fangzheng, ZHOU Yonggang, et al. Stable Fiber Delivery of Radio-Frequency Signal Based on Passive Phase Correction [J]. *Optics Letters*, 2014, 39(11): 3360-3362.
- [32] PAN Shilong, WEI Juan, ZHANG Fangzheng. Passive Phase Correction for Stable Radio Frequency Transfer via Optical Fiber [J]. *Photonic Network Communications*, 2016, 31(2): 327-335.
- [33] WEI Juan, ZHANG Fangzheng, PAN Shilong. Stable Frequency Dissemination via Optical Fiber Based on Passive Phase Fluctuation Cancellation [C]// 2015 European Microwave Conference, Paris, France: IEEE, 2015: 1276-1278.
- [34] CHEN Xilun, WANG Xiangchuan, PAN Shilong. Accuracy Enhanced Distance Measurement System Using Double-Sideband Modulated Frequency Scanning

- Interferometry[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(3): 1-4.
- [35] YE Xingwei, ZHANG Fangzheng, YANG Yue. 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.
- [36] YE Xingwei, ZHANG Fangzheng, YANG Yue. Photonics-Based Radar Transceiver for Full-Polarimetric Inverse Synthetic Aperture Imaging[C] // 2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Toulouse, France; IEEE, 2018: 1-4.
- [37] 张本成, 王东进, 陈卫东. 多基地雷达光纤传输系统的设计[J]. *火控雷达技术*, 2005(4): 47-52.
- [38] KOHMURA A, FUTATSUMORI S, YONEMOTO N, et al. Optical Fiber Connected Millimeter-Wave Radar for FOD Detection on Runway[C] // 2013 European Radar Conference, Nuremberg, Germany; IEEE, 2013: 41-44.
- [39] FUTATSUMORI S, MORIOKA K, KOHMURA A, et al. Design and Field Feasibility Evaluation of Distributed-Type 96 GHz FMCW Millimeter-Wave Radar Based on Radio-over-Fiber and Optical Frequency Multiplier[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(20): 4835-4843.
- [40] 姚汀峰. 基于微波光子技术的分布式雷达研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [41] 朱丹, 徐威远, 陈文娟, 等. 基于光波分复用网络的分布式多目标定位系统[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 171-177.
- [42] FU Jianbin, CHEN Xilun, PAN Shilong. A Fiber-Distributed Multi-Static Ultra-Wideband Radar[C] // 2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks, Nanjing, China; IEEE, 2015: 1-3.
- [43] FU Jianbin, ZHANG Fangzheng, ZHU Dan, et al. Fiber-Distributed Ultra-Wideband Radar Network Based on Wavelength Reusing Transceivers [J]. *Optics Express*, 2018, 26(14): 18457-18469.
- [44] ZHENG Jianyu, WANG Hui, FU Jianbin, et al. Fiber-Distributed Ultra-Wideband Noise Radar with Steerable Power Spectrum and Colorless Base Station [J]. *Optics Express*, 2014, 22(5): 4896-4907.
- [45] 谢牧彤. 光控分布式相参雷达中的光真延时技术与应用研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2019.
- [46] LIN Chunting, SHIH Potsung, CHEN Jason, et al. Frequency Quadrupling Technique and no Optical Filtering[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, 20(12): 1027-1029.
- [47] ZHANG Fangzheng, GAO Bindong, PAN Shilong. Photonics-Based MIMO Radar with High-Resolution and Fast Detection Capability[J]. *Optics Express*, 2018, 26(13): 17529-17540.
- [48] MARESCA S, SERAFINO G, SCOTTI F, et al. Photonics for Coherent MIMO Radar: An Experimental Multi-Target Surveillance Scenario[C] // 2019 20th International Radar Symposium (IRS), Ulm, Germany; IEEE, 2019: 1-6.
- [49] LEMBO L, MARESCA S, SERAFINO G, et al. In-Field Demonstration of a Photonic Coherent MIMO Distributed Radar Network[C] // 2019 IEEE Radar Conference, Boston, MA, USA; IEEE, 2019: 1-6.
- [50] GHELFI P, LEMBO L, SCOTTI F, et al. Distributed Coherent Radars Enabled by Fiber Networks[C] // 2019 21st International Conference on Transparent Optical Networks, Angers, France; IEEE, 2019: 1-4.
- [51] XIAO Xuedi, LI Shangyuan, XUE Xiaoxiao, et al. Photonics-Assisted Broadband Distributed Coherent Aperture Radar for High-Precision Imaging of Dim-Small Targets[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2019, 11(5): 1-9.
- [52] 杨利超, 高悦欣, 邢孟道, 等. 基于广义 keystone 和频率变标的微波光子 ISAR 高分辨实时成像算法[J]. *雷达学报*, 2019, 8(2): 215-223.
- [53] 杨利超, 邢孟道, 孙光才, 等. 一种微波光子雷达 ISAR 成像新方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(6): 1271-1279.

作者简介:



范北辰 男, 1996年生, 安徽马鞍山人, 硕士研究生, 主要研究方向为微波光子分布式雷达系统及信号处理。



杨悦 男, 1996年生, 江苏镇江人, 博士研究生, 主要研究方向为微波光子成像雷达及信号处理。