

基于微波光子学的超分辨双波段雷达

彭韶文^{1,2}, 李尚远^{1,2}, 薛晓晓^{1,2}, 郑小平^{1,2}

(1. 清华大学电子工程系, 北京 100084; 2. 北京信息科学与技术国家研究中心, 北京 100084)

摘要: 本文提出并验证了一种基于微波光子学的双波段雷达, 并通过相参信号融合处理实现了超分辨一维距离像。相比于传统雷达, 该微波光子雷达不仅可以同时产生和处理宽带的双波段信号, 而且系统结构非常紧凑。同时, 由于双波段信号共用了一套收发机, 各波段信号的相位保持着很好的稳定性, 因此通过对这两波段的信号进行相参融合处理得以实现超分辨成像。在实验中, 雷达工作于 S 波段和 X 波段, 两波段的带宽分别为 1.5 GHz 和 3 GHz。对两金属板进行探测, 通过对双波段的信号进行融合处理, 该雷达的分辨率可高达 1.6 cm, 远高于工作于单频段模式的雷达。该技术将大大提高目标识别和分辨的准确性。

关键词: 微波光子; 超分辨一维距离像; 双波段雷达; 相参融合处理

中图分类号: TN29 文献标志码: A 文章编号: 1672-2337(2021)02-0172-06

Super-Resolution Dual-Band Radar Based on Photonics Technology

PENG Shaowen^{1,2}, LI Shangyuan^{1,2}, XUE Xiaoxiao^{1,2}, ZHENG Xiaoping^{1,2}

(1. Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Beijing National Research Center for Information Science and Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: We propose and demonstrate a photonics-based dual-band radar for super-resolution range profile by coherent fusion processing. Compared with the electronic counterpart, the photonic-based radar is able to generate and process the dual-band signals with large bandwidth. Besides, the structure is highly compact with a single transceiver. What's more, the sharing of a single transceiver for signals with different bands ensures perfect stability among the waveforms, which makes it possible to realize a super-resolution range profile by fusion of dual-band signals. In the experiments, a dual-band radar operating in the S-band with a bandwidth of 1.5 GHz and X-band with a bandwidth of 3 GHz is established. The evaluation of the radar system is achieved through range profiles of two metal planes and the range resolution is up to 1.6 cm by coherent fusion processing, much higher than any single-band radar. This technology would improve the accuracy of classification and recognition of the targets.

Key words: microwave photonics; super-resolution range profile; dual-band radar; coherent fusion processing

0 引言

雷达系统是探测目标最有效的方法之一, 它可以工作在全天候、全天时状态^[1]。目前, 外部空间环境变得越来越复杂多样, 使得人们对雷达性能的要求也变得越来越高。为了对观测场景有更加精细地识别, 从不同维度收集信息并且获得更加高分辨的成像变得尤为重要, 这也就催生了多波段雷达的产生。由于在不同的环境和目标下, 电磁波的传输特性和反射特性有所不同, 这使得

工作在不同频段下的雷达能够实现不同的功能。比如说 S 波段雷达由于其发射的电磁波波长较长, 在空间传输时, 尤其是在雨天等恶劣环境下依然能保持较低的损耗, 所以可以应用于预警。而 X 波段雷达则因其具有较小的空间波束角而广泛应用于目标跟踪^[2]。多波段雷达除了能够集多个单一频段雷达功能于一体外, 更独特的一项功能是能够通过相参信号融合实现高分辨的一维距离像 (High-Resolution Range Profile, HRRP)^[3]。

HRRP 是目标最重要的特征之一, 并且已经广泛应用于目标自动识别等领域。我们知道, 一

维距离像的分辨率是与带宽成正比的，并且带宽越大，分辨率越高。而为了获得目标的 HRRP，最有效的方法就是发射大带宽的雷达信号^[4]。近些年来，微波光子技术借助其独一无二的高频宽带、抗电磁干扰等特性得到迅速发展^[5-7]，许多基于微波光子的大时间带宽积信号的生成和接收技术被提出。在信号产生技术方面有光子倍频^[8-9]、光子数模转换^[10-11]、光学变频^[12-16]等，而在信号接收技术方面有光子去斜^[9]、光子模数转换^[17]、光子匹配滤波器^[18]等。尽管微波光子学的发展使得大带宽信号的产生成为可能，但是雷达射频前端器件带宽有限，且大带宽信号容易受到空中其他电磁波的干扰，目前的雷达难以工作在大带宽下。而另外一种实现目标 HRRP 的方案就是前面提及的多波段雷达。通过将多波段雷达的多频段回波信号进行融合处理，可以等效获得一个大带宽信号，进而获得目标的高分辨一维距离像。

截至目前，已经有很多工作致力于通过多波段信号融合实现目标的 HRRP。大量的融合处理算法被提出，并且仿真实验验证了它们的有效性^[19-24]。然而，频谱外推误差的存在导致融合处理获得的分辨率相比于子波段分辨率的提升倍数有限^[19]，而传统多波段雷达系统的各个子波段带宽本身就有限，因此，即使通过数据融合，传统多波段雷达的融合分辨率依然处于一个较低的水平^[20]。此外，还有一个因素大大限制了现有的多波段雷达应用于融合超分辨成像。现有的多波段雷达系统往往由多个不同频段的发射机和接收机组成，其系统复杂且成本较高^[14]，同时由于多本振的相位抖动和电混频器的噪声使得各个波段信号的相位无法存在确定的关系^[15]，相参融合处理变得更加复杂甚至难以实现。

本文提出了一种基于微波光子学的高分辨双波段雷达，通过信号融合，实现了目标的 HRRP。在发射端，双波段线性调频信号由光子数模转换器和光频梳共同产生。在接收端，通过光学偏振复用的方式实现了双波段信号的同时去斜接收处理，将两个宽带信号降为窄带信号，降低后端电模数转换器的采样压力。该系统仅用一个收发机实现了双波段信号的同时产生和处理，系统结构紧凑，且使得双波段信号具有稳定的相位关系，为双波段的信号融合奠定基础。

1 结构与原理

1.1 微波光子雷达系统

图 1 是微波光子双波段雷达的原理框图。在发射端，光载多波段信号产生模块产生一个光载的多波段线性调频波。这个模块可以通过光子数模转换器和光频梳^[25]共同实现。光子数模转换器^[10-11]在我们之前的文章中已经有过详细的描述，利用它先产生光载的中频线性调频波，这个中频线性调频波可以表示为

$$x(t) = \sum_{i=1}^2 \text{rect}\left(\frac{t}{T_{p_i}}\right) A_i \exp\left(j2\pi\left(f_i t + \frac{1}{2} k_i t^2\right)\right) \quad (1)$$

式中， $i(i=1,2)$ 表示两个中频的线性调频波， T_{p_i} 为脉冲宽度， f_i 为中心频率， k_i 为啁啾率， A_i 表示信号的幅度。由于光子数模转换器的高性能，两线性调频波的带宽可达数 GHz。该光载线性调频信号作为光源注入到光频梳中。此时，中频线性调频波频谱将会出现在光频梳的每一根梳齿两侧。光频梳的构建有很多方法，并且光频梳的重频可以高达数十 GHz，可以让中频线性调频波上变频至任意频段。经过光电转换后，输出信号的电谱如图 2 所示，通过射频前端的滤波器可以滤出我们需要的两个频段的线性调频波，其中心频率可以分别表示为 $CF_1 = Nf_{OFC} \pm f_1$ 和 $CF_2 = Mf_{OFC} \pm f_2$ ，其中 N 和 M 分别是正整数， f_{OFC} 是光频梳的重频。这两个线性调频波经射频前端放

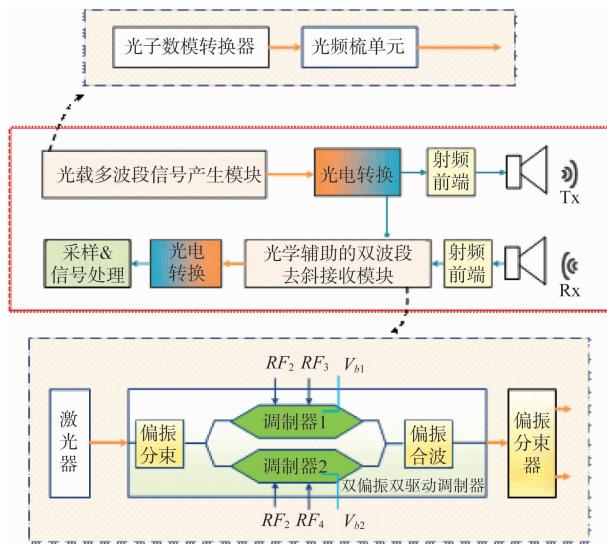


图 1 微波光子双波段雷达系统原理框图

大后分别被耦合成两部分,其中一部分作为回波去斜处理的参考信号,另外一部分由一个宽带天线辐射到空中。

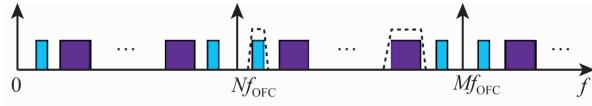


图 2 发射机中光电转换后输出信号的频谱

在接收端,目标回波信号由射频前端放大滤波后送入光学辅助的双波段去斜接收模块。该模块可以由激光器、双偏振双驱动调制器以及偏振分束器构成,如图 1 所示。激光器输出的光进入到双偏振双驱动调制器后,分成两束正交的偏振光,每个偏振光作为子调制器的光源被调制。每个子调制器上的调制信号分别是其中一个波段的参考信号和回波信号。两个子调制器的偏置电压都偏置在最小偏置点,仅考虑光信号的一阶边带,每个子调制器的输出光信号可以表示为

$$E_{\text{out}i}(t) \propto e^{j\omega_c t} \cdot [jJ_1(\beta_{ui})e^{-j\theta_{ui}(t)} + J_0(\beta_{ui}) + jJ_1(\beta_{ui})e^{j\theta_{ui}(t)}] - e^{j\omega_c t} \cdot [jJ_1(\beta_{ri})e^{-j\theta_{ri}(t)} + J_0(\beta_{ri}) + jJ_1(\beta_{ri})e^{j\theta_{ri}(t)}] \quad (2)$$

式中, $i(i=1,2)$ 表示两个正交偏振光及相对应的频段, $\theta_{ui}(t) = CF_i \cdot t + \frac{1}{2}k_i t^2$, $\theta_{ri}(t) = CF_i \cdot (t - \tau) + \frac{1}{2}k_i(t - \tau)^2$, τ 为回波信号的延时, $\beta_{ui} = \pi V_{ui}/V_\pi$

和 $\beta_{ri} = \pi V_{ri}/V_\pi$ 为子调制器两个臂上的调制系数, V_{ui} 和 V_{ri} 分别为参考信号和回波信号幅度, V_π 为调制器的半波电压。调制后的两偏振光合波到一起后从双驱动调制器的输出口输出,之后它又经过偏振分束器重新变成正交的两束光并经过光电转换变成电信号,至此两波段信号同时完成了去斜处理。这两个波段的去斜信号可表示为

$$I_i \propto J_1(\beta_{ui})J_1(\beta_{ri})\cos\left(k_i\tau t - \frac{1}{2}k_i\tau^2 + CF_i\tau\right) \quad (3)$$

两个去斜信号最后经模数转换器采样后送入数字信号处理器进行融合相参成像处理等分析。根据文献[4]可知,成像的距离分辨率 $\delta_r = c/2B$, 其中 c 为光速, B 为信号带宽, 由于每个子带信号的带宽都较大, 因此每个子波段都可以获得目标的一个较高分辨率的一维距离像。此外两频段的信号产生和去斜都是同时在一个收发机里完成

的,保证了两信号都具有稳定的相位关系,同时去斜降低了信号的采样和计算处理压力,为相参融合奠定了基础。

1.2 相参融合原理

目标的散射特性是随频率的不同而不同的。如果能够构建一个模型来描述这种散射特性,那么根据子波段回波波形及此模型就可以进行频谱外推获得等效大带宽信号,从而提高目标成像的分辨率。多波段雷达信号融合的思想最早由林肯实验室提出,他们通过构建全极点模型来描述并匹配散射特性,然后利用测量的回波数据对模型中的参数进行估计^[3]。这种估计算法在之后的研究中又得到进一步的改进,比如改进的 root-MUSIC 算法。这种全极点模型可以描述为

$$M(n) = \sum_{l=1}^P \alpha_l p_l^n \quad (4)$$

式中, n 为采样的数据序列, P 为散射中心点数, α_l 为这些散射点的复散射强度, p_l 为极点, 反映的是目标与雷达的相对距离以及它的频谱散射特性。利用该模型可以实现频谱外推获得大的等效带宽。如图 3 所示, 子波段 1 和子波段 2 是双波段雷达的工作频段, 定义它们的带宽分别为 Δf_1 和 Δf_2 。通过模型和极点估计算法, 我们可以进一步外推出空白频段 Δf_3 的信号, 进而获得一个等效带宽达 $\Delta f = \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3$ 的信号。

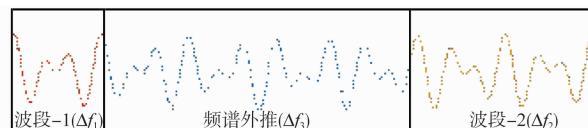


图 3 对两个子波段进行相参融合处理的示意图

2 实验结果与分析

为了验证所提双波段雷达的性能,我们设计了如图 4 所示的实验系统。原理图中的光频梳由马赫-曾德尔调制器和信号源产生。一个 4 比特的光子数模转换器产生一个光载中频双波段线性调频波。这两个线性调频波的周期均为 $10 \mu s$, 脉宽为 $8 \mu s$, 中心频率分别为 2.75 GHz 和 6 GHz , 带宽分别为 1.5 GHz 和 3 GHz 。之后该光信号注入到马赫-曾德尔调制器中(AVANEX SD40)。调制器偏置在正交偏置点, 并且被产生于信号源(Agilent

E8403A)的16 GHz的射频信号调制。调制器输出的光信号进入光电探测器(U2T XPDV2120RA)拍频后可以产生多波段信号,利用多通道滤波器可以将其中的S和X波段滤出,中心频率分别为2.75 GHz和10 GHz,这个滤波器中的两个通道频带分别为2~4 GHz和8~12 GHz。这两个信号经过放大器放大后由功分器分别耦合成两份,一份作为参考信号去驱动双偏振调制器,另外一份先通过耦合器合路后再由天线辐射到空中。该天线的工作带宽为2~18 GHz。

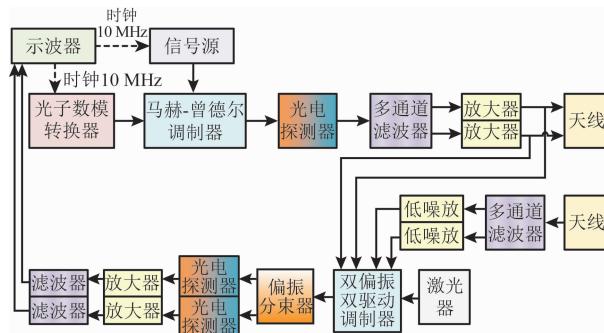


图4 双波段雷达实验框图

产生的S和X波段的线性调频波通过示波器采样获得。S波段时域波形和时频曲线分别如图5(a)和(b)所示。X波段的时域波形和时频曲线如图5(c)和(d)所示。为了测量这两个信号的性能,我们将这两个信号分别和各自对应的理想信号进行脉压处理。图6中的红色虚线是理想的S信号的自相关结果,其主瓣宽度和峰值旁瓣比分别为590 ps和13.2 dB;蓝色实线是测量的S信号和理想的S信号的互相关结果,其主瓣宽度和峰值旁

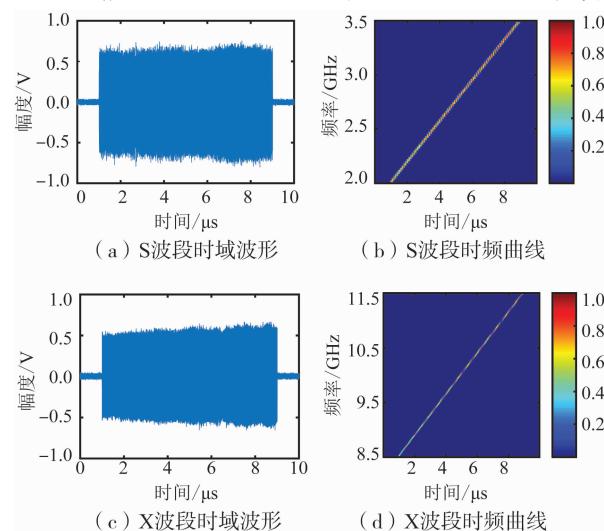


图5 S波段和X波段的时域波形和时频曲线

瓣比分别为594 ps和13.2 dB。图7中的红色虚线是理想的X信号的自相关结果,其主瓣宽度和峰值旁瓣比分别为295 ps和13.2 dB;蓝色实线是测量的X信号和理想的X信号的互相关结果,其主瓣宽度和峰值旁瓣比分别为296 ps和13.2 dB。这两个信号与理想信号的互相关结果和理想信号的自相关结果相当,展现了该方案产生的多波段信号具有良好的性能。

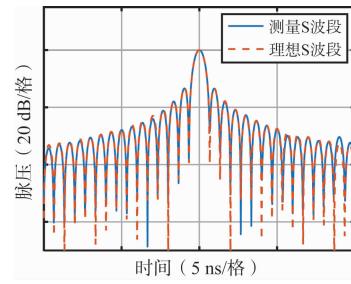


图6 S波段信号的脉压曲线

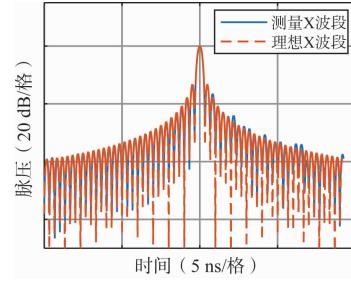


图7 X波段信号的脉压曲线

接收天线收下来的回波信号被送往和前面所述性能一致的多通道滤波器中,滤波器将其分成S波段和X波段回波。这两个回波作为驱动信号分别加载到双偏振双驱动马赫-曾德尔调制器(Fujitsu FTM7980EDA)的两个子调制器中,每个子调制器上的另一个驱动信号就是对应频段的参考信号。从双偏振双驱动马赫-曾德尔调制器中输出的光信号被偏振分束器分成正交的两束光后分别进入光电探测器完成光电转换,该探测器的工作带宽为3 GHz。光电转换后的两路信号经过低通滤波器和放大器后被示波器同时采样获得。示波器和信号源以及光数模转换器共用一个10 MHz的时钟,保证了整个系统的参考时钟是一致的。

完成双波段雷达系统的基本校准之后,我们设计实验验证系统的成像性能。实验场景如图8所示,首先我们将两金属板相距20 cm放置在天线前方。利用雷达对其探测,S和X波段的去斜信号同时由示波器采样获得,示波器的采样速率为100

MS/s。对采样获得的信号进行分析可以获得 S 和 X 波段测得的目标一维距离像, 分别如图 9 中的浅红色曲线和橙色曲线。对采样获得的 S 和 X 波段信号进行相参融合处理获得了一个等效大带宽信号, 其目标一维距离像如图 9 中的淡蓝色。此时, S 波段和 X 波段以及融合处理都可以清晰地观测到两金属板。并且从这些一维距离像中可以计算获得 S 波段、X 波段以及融合处理测得的两目标间距分别为 19.1, 19.8 和 19.9 cm。之后我们将距离天线较远的那个金属板依次移近距离天线较近的金属板, 在这个过程中 S 波段和 X 波段依次变得无法将两个金属板分开, 而经过融合处理的成像结果依然能够清晰地看到两目标, 直至两目标相距 1.6 cm, 如图 10 所示。此时, S 和 X 波段无法区分出两目标, 而融合处理可以分辨出两目标且测得其相距 1.8 cm。可见, 利用该雷达通过相参融合处理可以显著提高雷达系统的性能, 其成像分辨率要高于其中单个频段信号获得的分辨率。

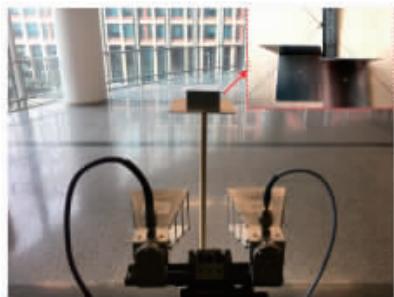


图 8 实验场景图

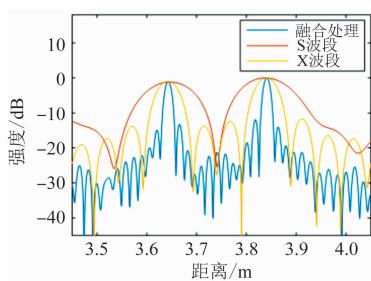


图 9 测距结果图

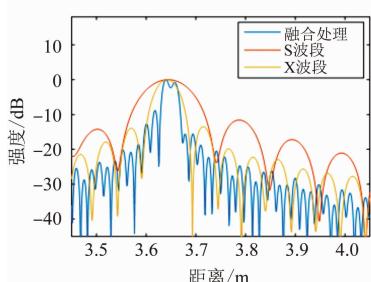


图 10 测距结果图

根据前面的相参融合原理部分的分析可知, 1.5 GHz 的 S 波段线性调频波和 3 GHz 的 X 波段线性调频波进行融合处理后, 其等效带宽为 9.5 GHz, 相对应的理论分辨率为 1.58 cm。实验测得的 1.6 cm 分辨率和该理论值基本一致, 展现了系统良好的性能, 其主要的误差来源为收发系统幅相校正的准确性。

3 结束语

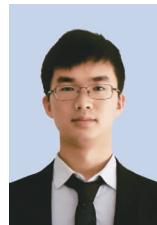
本文提出了一种光学辅助的融合超分辨双波段雷达。该雷达基于一套收发机就可以实现双波段宽带线性调频波的同时产生和去斜接收处理。通过对各个子频段信号的相参融合处理, 可实现超分辨一维距离像。实验中, 基于光子数模转换器和光频梳结构产生了 S 和 X 波段线性调频波, 带宽分别为 1.5 GHz 和 3 GHz, 通过互相关处理验证了信号的优异性能。接收端, 利用偏振复用的思想基于光偏振双驱动调制器实现了双波段回波的同时去斜接收处理, 最后对双金属板的成像实验验证了该雷达可实现距离分辨率达 1.6 cm 的融合超分辨一维距离像。这项技术将使得成像雷达的能力进一步得到显著提升, 有望应用于目标识别等领域。

参考文献:

- [1] SKOLNIK M I. Introduction to Radar Systems[M]. New York: McGraw-Hill, 1990.
- [2] SCOTTI F, ONORI D, LAGHEZZA F. Fully Coherent S- and X-Band Photonics-Aided Radar System Demonstration [J]. IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 2015, 25(11): 757-759.
- [3] CUOMO K M, PION J E, MAYHAN J T. Ultra-Wideband Coherent Processing [J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 1999, 47(6): 1094-1107.
- [4] CHEN V C, MARTORELLA M. Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging: Principles, Algorithms and Applications[M]. UK: Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [5] GHELFI P, SCOTTI F, PORZI C, et al. Microwave Photonics Technologies for 5G and Industry 4.0[C]// 45th European Conference on Optical Communication, Dublin, Ireland: Institution of Engineering and Tech-

- nology, 2019;1-4.
- [6] MARPAUNG D, YAO J P, CAPMANY J. Integrated Microwave Photonics[J]. *Nature Photonics*, 2019, 13(2):80-90.
- [7] PAN S L, ZHANG Y M. Microwave Photonic Radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2020, 38(19): 5450-5484.
- [8] 张舟, 王天亮, 朱维. 基于微波光子的 24 倍频毫米波信号生成[J]. 半导体光电, 2019, 40(6):852-856.
- [9] LI R M, LI W Z, DING M L, 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.
- [10] 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.
- [11] LI J D, XUE X X, ZHA Y, et al. A Segmented Photonic Digital-to-Analog Converter with a High Effective Number of Bits[C] // 2019 International Topical Meeting on Microwave Photonics, Ottawa, ON, Canada; IEEE, 2019;1-3.
- [12] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. A Fully Photonics-Based Coherent Radar System[J]. *Nature*, 2014, 507(7492):341-345.
- [13] GAO B D, ZHANG F Z, YAO Y, et al. Photonics-Based Multiband Radar Applying an Optical Frequency Sweeping Comb and Photonic Dechirp Receiving[C] // 2018 Asia Communications and Photonics Conference (ACP), Hangzhou, China; IEEE, 2018;1-3.
- [14] SCOTTI F, LAGHEZZA F, GHELFI P, et al. Photonic-Assisted Dual Band Coherent Radar System[C] // 2014 11th European Radar Conference, Rome, Italy; IEEE, 2014:145-148.
- [15] GHELFI P, LAGHEZZA F, SCOTTI F, et al. Photonics for Radars Operating on Multiple Coherent Bands[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, 34(2):500-507.
- [16] BRANDÃO T H, SCOTTI F, FILGUEIRAS H R D, et al. Coherent Dual-Band Radar System Based on a Unique Antenna and a Photonics-Based Transceiver [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2019, 13(4): 505-511.
- [17] YANG J Q, LI S Y, XIAO X D, et al. Broadband Photonic ADC for Microwave Photonics-Based Radar Receiver[J]. *Chinese Optics Letters*, 2018, 16(6):060605.
- [18] LI M, SUN S Q, MALACARNE A, et al. Reconfigurable Single-Shot Incoherent Optical Signal Processing System for Chirped Microwave Signal Compression[J]. *Science Bulletin*, 2017, 62(4):242-248.
- [19] CUOMO K M. A Bandwidth Extrapolation Technique for Improved Range Resolution of Coherent Radar Data. Revision 1[R]. US:Massachusetts Inst of Tech Lexington Lincoln Lab, 1992.
- [20] WANG C, HU W D, DU X Y, et al. High Resolution Range Profile Formation Based on LFM Signal Fusion of Multiple Radars[J]. *Journal of Electronics*, 2007, 24(1):75-82.
- [21] 贾龄童, 赵宏钟, 杜梦园. 基于模型外推的异源雷达相参配准[J]. 电讯技术, 2018, 58(4):450-457.
- [22] YUAN S S, CHEN C Z, XU X J. Block-Division Based Ultra-Wideband Fusion of Multiple Radar Bands for Resolution Enhanced Imagery[C] // 2018 12th International Conference on Signal Processing and Communication Systems(ICSPCS), Cairns, Australia; IEEE, 2018;1-5.
- [23] XU J, SONG D W, DING D Z, et al. High Resolution 2D-Imaging Based on Data Fusion Technique [C] // 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM), Chengdu, China; IEEE, 2018;1-3.
- [24] HUSSAIN B, MALACARNE A, MARESCA S, et al. Auto-Regressive Spectral Gap Filling Algorithms for Photonics-Based Highly Sparse Coherent Multi-Band Radars in Complex Scenarios[C] // 2018 IEEE Radar Conference, Oklahoma City, OK, USAZ; IEEE, 2018:993-998.
- [25] TORRES-COMPANY V, WEINER A M. Optical Frequency Comb Technology for Ultra-Broadband Radio-Frequency Photonics[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2014, 8(3):368-393.

作者简介:



彭韶文 男,1994 年生,江西吉安人,清华大学电子工程系在读博士研究生,主要研究方向为基于微波光子学的高分辨成像雷达。



李尚远 男,1982 年生,山东济南人,清华大学电子工程系助理研究员,主要研究方向为微波光子学。

(下转第 182 页)