

# 激光与光电子学进展

## 基于线性调频的雷达通信一体化波形研究进展

李轩\*, 周逸潇, 赵尚弘\*\*, 王国栋, 朱子行, 李赫, 于龙强

空军工程大学信息与导航学院通信系统教研室, 陕西 西安 710077

**摘要** 雷达通信一体化是指在实现二者硬件共用的基础上,进一步进行波形融合,即用一个信号同时执行雷达和通信功能的技术,以优化系统性能,节约频谱资源。阐述了一体化的技术内涵及发展阶段,分析了线性调频(LFM)信号在一体化系统中的应用潜力,总结了 LFM 一体化波形设计、高频宽带 LFM 信号以及 LFM 一体化波形成光产生和处理的研究进展。分析认为,微波光子将在雷达通信一体化系统中发挥重要作用,未来的雷达通信一体化系统不仅是光学和电学技术相融合的系统,也是模拟和数字技术相结合的系统。

**关键词** 光通信; 射频光子; 雷达通信一体化; 波形融合; 线性调频

中图分类号 TN29

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213152

### Research Progress of Integrated Radar-Communication Waveform Based on Linear Frequency Modulation

Li Xuan\*, Zhou Yixiao, Zhao Shanghong\*\*, Wang Guodong, Zhu Zihang,

Li He, Yu Longqiang

Office of Communication System, Information and Navigation School, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, Shaanxi, China

**Abstract** Integrated radar-communication refers to waveform fusion based on hardware sharing to simultaneously perform radar and communication functions using one signal. Consequently, the system performance can be optimized, and the frequency-spectrum resources can be saved. In this paper, a systematic overview of the integrated radar-communication waveform is provided. Specifically, the technical connotation and development stage of the radar-communication integration are presented, the application potential of linear frequency modulation (LFM) signal in the integrated system is analyzed. And the research progresses of LFM-integrated waveform design, high-frequency broadband LFM signal, and LFM-integrated waveform optical generation and processing are summarized. Studies have shown that microwave photons play an important role in the future of integrated radar-communication systems, and radar-communication integration is a system integrating optical and electrical technologies and linking analog and digital technologies.

**Key words** optical communication; radio frequency photon; integrated radar-communication; waveform fusion; linear frequency modulation

## 1 引言

雷达是利用电磁波在自由空间的传播和反射进行目标检测、定位、跟踪和成像处理的电磁系统,在气象预报、警戒监视和地形测绘等诸多领域发挥着重要作用。无线通信指利用电磁波携带信息进行自由空间传播实现信息交互的技术,是移动设备、卫星、机载舰载设备等进行通信的基础手段。

雷达和无线通信表现出高度的相似性,如:工作原理基本相同,都是电磁波的发射和接收,其理论基础雷达方程和通信方程均由电磁波自由空间传播损耗决定<sup>[1]</sup>;系统结构部分重叠,都具有本振、变频器、功放、天线等器件<sup>[2]</sup>;使用的频段趋于融合,5G 技术的迅猛发展使无线通信对频谱资源的需求日益迫切,推动了雷达通信进行频谱共享<sup>[3]</sup>。目前在民用领域,以物联网以及智能交通为代表的新兴应用需要对感知与通信

收稿日期: 2021-12-06; 修回日期: 2022-01-14; 录用日期: 2022-01-18; 网络首发日期: 2022-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(61901507,62001505)、陕西省自然科学基金基础研究计划(2020JQ-469)

通信作者: \*lixuankgd@163.com; \*\*zhaoshangh@aliyun.com

进行联合设计,提升用户体验<sup>[4-5]</sup>;在军用领域,战争已由单一平台对抗转换为多功能体系对抗,需要对雷达、通信、导航、电子战等进行功能融合,提升作战效能<sup>[6-8]</sup>。为满足系统小型化、集成化发展要求,高效利用频谱资源,各国针对雷达通信一体化展开了密集研究<sup>[9-10]</sup>。设计一种硬件共用、频谱共享、功能协同的通信雷达一体化系统,对于无线通信技术发展和我军军事技术变革具有极为重要的科学意义和价值。

## 2 雷达通信一体化的发展阶段

雷达通信一体化不仅包括促成雷达与通信设备硬件共用、频谱共享、互不干扰,还包括设计兼容二者的新型一体化系统,高效利用各种资源,使系统能同时完成信息传输和目标探测两种功能<sup>[11-12]</sup>。相应地,通信雷达一体化的研究可以划分为两个阶段,第一阶段为硬件共用、波形独立、部分资源复用,第二阶段为硬件共用、波形融合、各种资源共享。随着宽带有源相控阵的广泛应用,世界各国展开了多种基于复用技术、共用射频(RF)前端的雷达通信一体化应用研究<sup>[13-15]</sup>,其基本原理如图 1 所示。可以发现,通信和雷达波形相互独立,通过时/频/空域等资源划分避免相互干扰,共用同一射频前端进行信号发射和接收,解决天线堆叠产生的体积、质量和信号串扰问题。但不同复用技术的一体化系统存在一些问题,如:时分复用雷达在通信时间段内无法工作;频分复用频谱资源利用率低,难以满足日益增加的频谱需求;空分复用时会减小雷达波束能量,降低雷达探测距离。

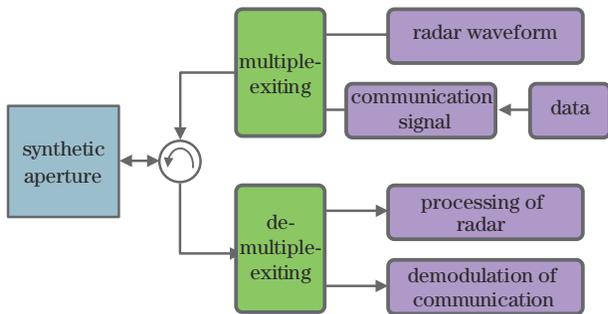


图 1 基于复用技术、共用 RF 前端的雷达通信一体化系统  
Fig. 1 Integrated radar-communication system based on multiplexing technology and RF front end sharing

针对复用技术一体化系统存在的技术问题,研究人员提出了基于波形融合、各种资源共享的新型一体化系统,用一个信号同时进行探测与通信。在接收端,先将一体化信号的雷达和通信功能分离开,然后分别进行处理,其原理如图 2 所示。基于复用技术的一体化系统核心在于资源的划分和调度,基于波形融合的一体化系统核心则在于波形的设计和处理<sup>[16]</sup>。目前,受到人们广泛关注的一体化信号有直接序列扩频一体化波形<sup>[17-20]</sup>、正交频分复用(OFDM)一体化波形<sup>[21-27]</sup>和

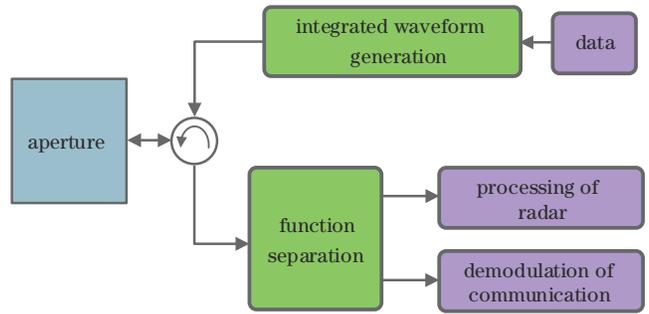


图 2 基于波形融合、共享各种资源的一体化系统  
Fig. 2 Integrated system based on waveform fusion and all resources sharing

线性调频(LFM)一体化波形。其中序列扩频一体化信号需要通过相关运算进行脉冲压缩和解扩,处理数据量较大;OFDM 一体化信号是现阶段研究热点,国内外研究人员主要针对信号幅度峰均比高、多普勒频偏干扰、距离旁瓣伪峰、系统性能边界等问题进行波形设计和算法研究,提出了不同解决方案,但整体上该信号设计复杂、调谐困难、处理运算量大,在雷达应用和一体化系统中难以满足 GHz 量级带宽信号实时处理要求。

## 3 线性调频信号及其一体化应用潜力

LFM 一体化波形是应用最广泛的雷达波形之一,其载波频率随时间的变化线性变化。当信号瞬时频率随时间线性增大时,称其为正啁啾 LFM 信号,反之,称其为负啁啾 LFM 信号,如图 3 所示。其中: $B$  为信号瞬时带宽; $f_0$  为信号中心频率; $T$  为信号持续时间。

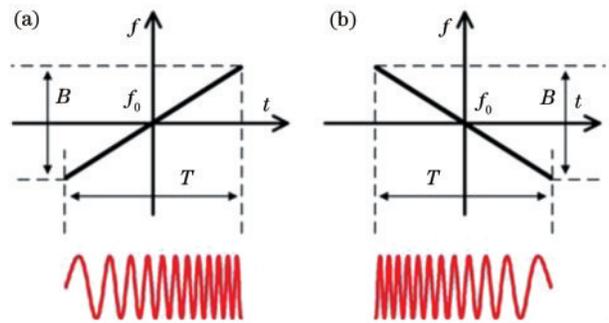


图 3 LFM 波形。(a) 正啁啾;(b) 负啁啾  
Fig. 3 LFM waveforms. (a) Up-chirped; (b) down-chirped

LFM 信号通过脉冲内频率调制突破了脉冲信号时宽和带宽之间的相互制约关系:一方面可获得大的时宽带宽积(TBWP),进而提升雷达的探测距离和速度分辨率<sup>[28]</sup>;另一方面在无线隐蔽通信中,可以利用 LFM 信号对数据进行扩频调制,在接收端通过匹配滤波实现解扩处理,从而克服多径干扰,降低截获概率<sup>[29]</sup>。此外,LFM 信号可作为本振源应用于超外差搜索接收机或压缩接收机,实现高精度、高灵敏度射频频谱感知<sup>[29]</sup>。在实际应用中,LFM 信号的优点还表现

在:具有多普勒容错能力,其匹配滤波对多普勒频移不敏感,能有效简化信号处理系统;既可以利用匹配滤波进行脉冲压缩,获得高处理增益,也可以利用混频去斜极大降低接收端采样速率和数据量,实现信号实时处理;通过灵活设计,如双啁啾、三角形扫频等波形,在目标探测中可以获得距离和速度信息。LFM 信号以独特的波形特点和固有的处理优势,在雷达、通信、频率测量等领域均有广泛的应用价值和成熟的技术基础,对各分离系统进行整合,获得基于 LFM 信号的雷达通信一体化系统甚至雷达-通信-电子战射频综合系统。

## 4 基于电子技术的 LFM 一体化波形研究进展

### 4.1 啁啾复用的 LFM 一体化波形

当 LFM 信号具有不同的啁啾率时,信号间的互相关性很低,可通过设置不同的啁啾率实现雷达和通信波形的复用。2003 年,Robertson 等<sup>[30]</sup>首次提出基于 LFM 信号的通信雷达一体化波形。在发射端,利用两个声表面波(SAW)滤波器产生两路载频带宽相同但啁啾相反的 LFM 波形,其中,雷达采用负啁啾脉冲信号,通信采用正啁啾连续波信号,如图 4 所示。接收端,利用两个对应的匹配滤波器进行脉冲压缩,获得探测距离和通信数据。2007 年,Saddik 等<sup>[31]</sup>对基于相反啁啾 LFM 信号的雷达通信方案进行了实验验证,其系统结构如图 5 所示。其中:RHCP 为右旋圆极化发射端; LHCP 为左旋圆极化发射端。采用 SAW 产生两路

载频为 750 MHz、带宽为 500 MHz、时宽为 500 ns 的负啁啾 LFM 波形,一路输出重复频率为 150 kHz 的雷达脉冲,另一路与 1500 MHz 的本振信号混频得到正啁啾 LFM 波形,并结合二进制相移键控(BPSK)调制产生通信速率为 1 Mbit/s 的信号。接收端,雷达和通信在极化域进行分离,且雷达回波与 1500 MHz 本振信号进行混频以改变其啁啾极性。利用两个相同的匹配滤波器分别对通信和雷达信号进行脉冲压缩处理。这两种设计中 LFM 信号的产生和压缩使用模拟器件,信号的载频、带宽受限,从源头上限制了系统性能。

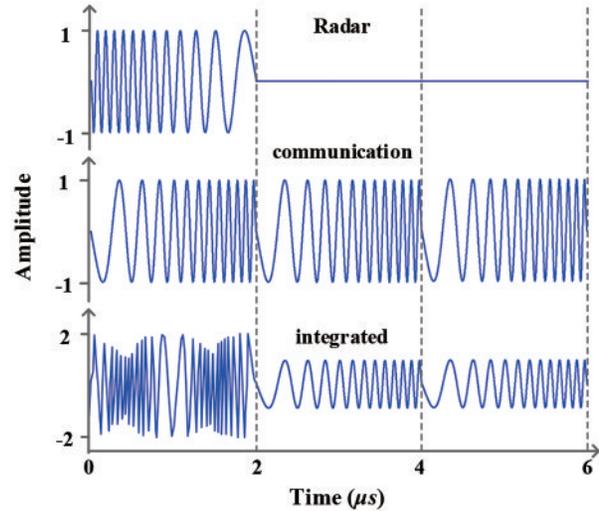


图 4 基于相反啁啾 LFM 信号的雷达通信一体化波形<sup>[30]</sup>

Fig. 4 Integrated radar-communication waveform based on oppositely chirped LFM signal<sup>[30]</sup>

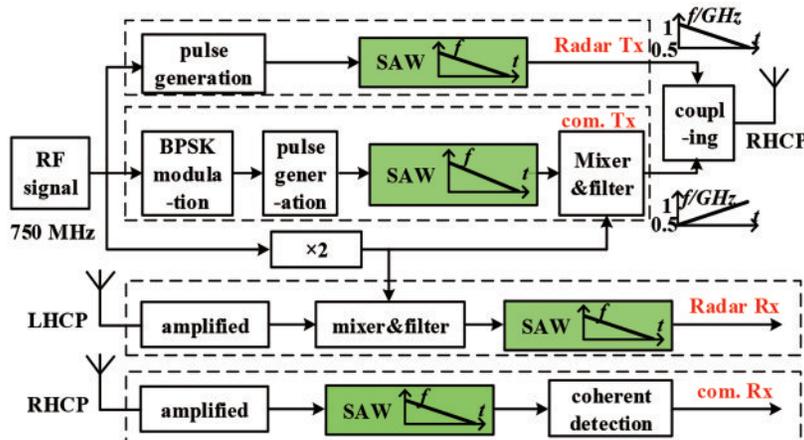


图 5 基于相反啁啾 LFM 信号的雷达通信一体化系统<sup>[31]</sup>

Fig. 5 Integrated radar-communication system based on oppositely chirped LFM signal<sup>[31]</sup>

为提高通信速率,2020 年,胡廷舟等<sup>[32]</sup>对正啁啾 LFM 信号进行高阶相移键控(MPSK)调制,然后与负啁啾信号叠加形成一体化波形,该方法除了对啁啾极性进行复用外,还可以对啁啾大小进行复用。2017 年,周宇等<sup>[33]</sup>提出基于不同啁啾的 LFM 一体化波形,其中,雷达用 LFM 脉冲啁啾率固定,通信用 LFM 脉冲啁啾率由码元控制。在接收端,利用匹配滤波获得目

标信息,利用分数阶傅里叶变换实现通信解调,通过增加啁啾数量提升数据传输速率。

啁啾复用 LFM 一体化信号可以对系统的变频、功放以及天线等硬件资源以及频谱资源进行共用,使通信信号和雷达信号分割发射功率,且叠加波形的幅度包络起伏较大,影响雷达探测范围。

## 4.2 幅度控制的 LFM 一体化波形

2007 年, Barrenechea 等<sup>[34]</sup>研究了幅度调制-LFM (AM-LFM)连续波一体化信号性能,其系统结构如图 6(a)所示。在 LFM 发射机后端串联 AM 器,将通信数据调制到 LFM 连续波上产生一体化信号,一体化信号频域和时域波形如图 6(b)所示。接收端雷达和通信均采用混频去斜处理,然后分别经过低通滤波器

(LPF)和带通滤波器(BPF)进行目标参数提取和 AM 解调。该设计实现了雷达和通信的波形共享,并采用混频去斜克服了相关运算复杂度高、处理时延大的问题。但波形包络起伏现象依然存在,且在通信接收端,需要与发射端同频同相的扫频本振,技术复杂度高,此外,为实现双工通信,需要上下行链路使用不同频率,频谱利用率低。

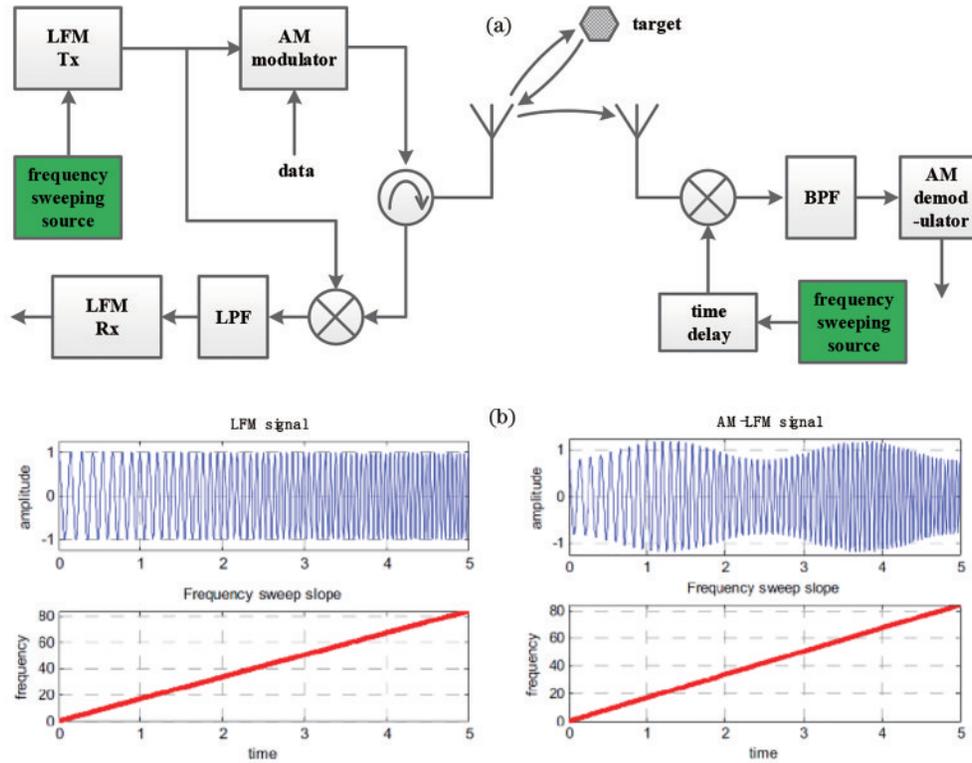


图 6 AM-LFM 连续波一体化信号的性能<sup>[34]</sup>。(a) AM-LFM 一体化雷达通信系统的结构; (b) LFM 和 AM-LFM 信号的波形  
Fig. 6 Performance of AM-LFM CW integrated signal<sup>[34]</sup>. (a) Structure of AM-LFM integrated radar-communication system; (b) waveforms of LFM and AM-LFM signals

2020 年, 曾浩等<sup>[35]</sup>基于幅度控制 LFM 一体化波形思想设计了 16 阶正交幅度调制(16QAM)信号与 LFM 脉冲相结合的高阶调制一体化波形,提高了一体化波形的频谱利用率,但没有克服信号包络起伏的问题。

## 4.3 相位控制的 LFM 一体化波形

2016 年, Nowak 等<sup>[36]</sup>提出 LFM 脉冲结合脉冲内 BPSK 调制的一体化波形及其性能优化方法。在数字域利用通信信息对 LFM 信号的相位进行移相处理,数模转换后得到一体化波形。通过减小 BPSK 调制的相移变化量减弱相位突变对雷达探测性能的影响,相移减小引起的通信误码率恶化则利用 M 序列扩频进行弥补。该方法产生的一体化波形具有平坦幅度包络,但一体化波形性能的提升是以降低通信速率为代价的,且雷达的脉冲压缩和通信的序列解扩是基于相关处理实现的,运算复杂度高,实时性差。

## 4.4 其他形式的 LFM 一体化波形

近年来,研究人员还提出了其他形式的 LFM 一体化波形。中电研究院<sup>[37-38]</sup>对 LFM 脉冲与最小频移键控(MSK)相结合的一体化波形开展了研究;空军预警学院和桂林科技大学<sup>[39-40]</sup>设计了基于初始频率控制的 LFM 一体化信号;空军预警学院、清华大学、西安电子科技大学、中国科学院等<sup>[41-43]</sup>先后提出了多种结构的 OFDM-LFM 一体化信号。上述一体化波形的特点如表 1 所示。综合来看:啁啾复用 LFM 信号雷达和通信分割发射功率,难以满足波形融合资源共享的新型一体化发展要求;初始频率控制 LFM 一体化信号中雷达频谱扩展严重,频谱利用率低;受波形非恒定包络的影响,幅度控制 LFM 信号和 OFDM-LFM 信号作用距离受限;PSK-LFM 和 MSK-LFM 波形具有恒定包络,但仍有相应的问题需要研究解决。

表 1 不同 LFM 一体化波形的特点

Table 1 Characteristics of different LFM integrated waveforms

Waveform	Advantage	Disadvantage
Chirp-multiplexing LFM	Mutual interference of communication radar is small	Energy efficiency is low, waveform envelop is fluctuated
Amplitude-manipulating LFM	Modulation and demodulation of communication are simple	Waveform envelop is fluctuated
Phase-manipulating LFM	Modulation and demodulation of communication are simple, waveform envelope is constant	Radar performance is affected by the phase shift
MSK-LFM	Waveform envelope is constant, spectrum broadening effect caused by communication modulation is small	Modulation and demodulation of communication are complex
OFDM-LFM	Has thumbtack-like ambiguity function	Waveform envelop is fluctuated, signal generation and processing are complex
Initial frequency-manipulating LFM	Communication rate is high	Spectrum efficiency is low

## 5 基于光子技术的 LFM 一体化波形研究进展

雷达的测距精度和距离分辨力主要取决于信号瞬时带宽<sup>[44]</sup>。当一体化波形瞬时带宽达到 1.5 GHz 时,从源头上才能满足厘米量级高精度测距需求。在复杂电磁环境中,高载频可以解决现有频谱拥塞问题,规避常规电磁干扰。因此,高载波频率、宽瞬时带宽是 LFM 一体化波形的发展趋势,该趋势在军事应用中的需求尤为迫切<sup>[45]</sup>。但目前产生信号的电子器件如频率合成器和模数转换器等采样时钟速率受限,很难直接输出 GHz 带宽的信号,高频信号的产生需要对多个本振进行频率上转换,技术复杂、成本高。此外,宽带信号在电缆波导等介质中的传输损耗大、幅相一致性差,通过阵列天线发射接收时存在波束倾斜现象。电学器件存在相互干扰,需要采取电磁屏蔽措施,进一步增加了系统的体积、质量和功耗。受瓶颈问题限制,传统电子技术难以充分满足高频宽带一体化波形的发展需求,因此,开展基于其他技术的信号产生和处理研究具有重要意义。

### 5.1 微波光子技术

微波光子概念出现于 20 世纪 90 年代,是光子技术

和微波技术交叉产生的新兴学科,可实现微波应用和光学处理的有效结合。电子技术和光子技术的主要特性如表 2 所示。可以发现,相比电子技术,微波光子技术可以直接产生、低损传输、灵活处理具有高频宽带、大调谐范围和抗电磁干扰能力的射频波形,有望为雷达和通信系统发展以及军事斗争演化带来技术性和体制性变革<sup>[46-48]</sup>。

各国研究人员针对基于微波光子技术的雷达系统展开了大量研究,并取得了一系列突破。2014 年, Kanno 等<sup>[49]</sup>报道了光子分布式毫米波雷达系统,可用于机场跑道异物探测;同年,俄罗斯设立面向下一代雷达和电子战系统应用的射频光子相控阵项目;美国国防高级研究计划局(DARPA)展开了可面向雷达应用的超宽带多功能光子收发、光任意波形产生等一系列研究<sup>[50]</sup>。最具代表性的研究成果是 Ghelfi 等<sup>[51-52]</sup>研制的光子雷达系统,如图 7 所示。该系统综合利用微波光子技术进行多波段射频本振光学产生、雷达波形光域变频和传输、回波信号光学时钟采样等,在高频信号的产生和处理方面具有极大的技术优势。自 2014 年起,国内上海交通大学、南京航空航天大学、北京邮电大学、中科院电子所等相继开展了微波光子雷达关键技术研究<sup>[53-60]</sup>。

表 2 电子技术和光子技术的主要特性<sup>[45]</sup>Table 2 Main characteristics of electronic technology and photonic technology<sup>[45]</sup>

Feature	Electronic technology	Photonic technology
RF carrier	Up-converted to tens of single band	Directly to THz, multiple bands
Signal bandwidth	<1 GHz	Tens of GHz
Transmission loss	~0.3 dB/m @ 2 GHz	~0.0002 dB/m @ 1550 nm
Weight	~500 kg/km @ coaxial cable	~50 g/km @ optical fiber
Size	Big	Small
Electromagnetic interference	Serious	Well suppressed

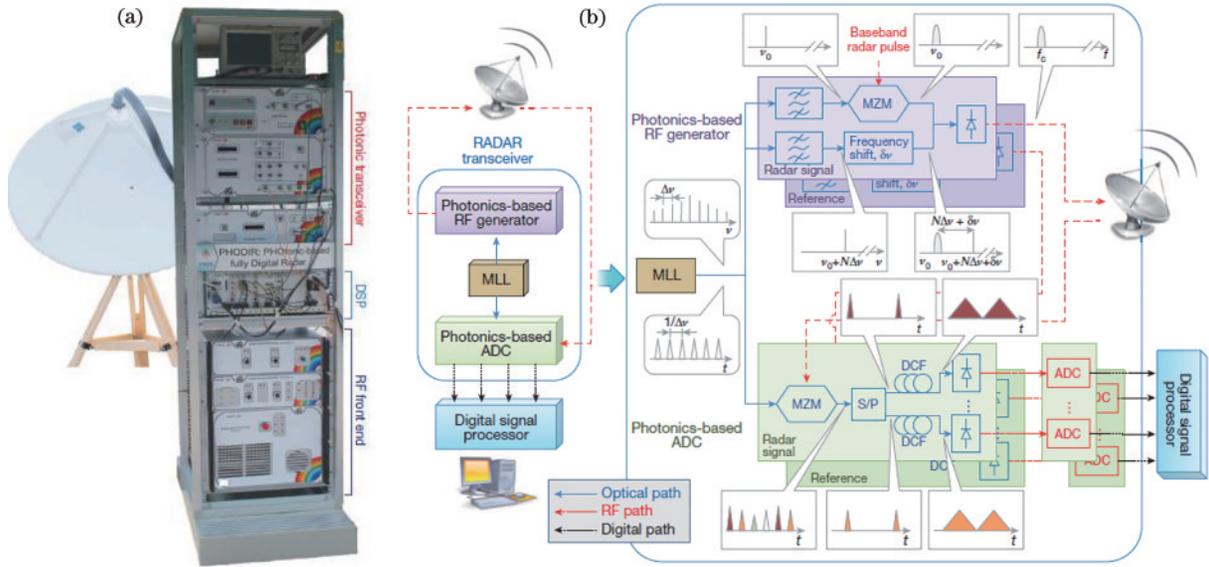


图 7 光子雷达系统的结构<sup>[51-52]</sup>。(a)收发机装置;(b)系统结构及工作原理

Fig. 7 Structure of the photonic radar system<sup>[51-52]</sup>. (a) Transceiver device; (b) system structure and working principle

### 5.2 LFM 信号的光学产生和处理

如何基于微波光子技术产生高频宽带 LFM 信号并对其进行低速灵活处理,是微波光子雷达系统研究的核心问题之一。LFM 信号的光学产生方法主要有超短光脉冲整形<sup>[54,61-63]</sup>、双波长光信号电光调制<sup>[64-66]</sup>、扫频光电振荡器(OEO)<sup>[67-70]</sup>和微波光子倍频<sup>[49,56-59]</sup>等。超短光脉冲整形指将超短光脉冲时域包络整形为线性啁啾形式,探测后得到 LFM 脉冲,该方法可以直接产生高频宽带 LFM 波形,如 Zou 等<sup>[54]</sup>利用该方法获得了瞬时频率在 5~60 GHz 范围内的超宽带 LFM 脉冲,但光脉冲整形所产生的信号时宽在 ns 量级,限制了其 TBWP。双波长光信号电光调制法的基本原理如图 8 所示。通过在光域产生分离的两个光信号,其波长分别为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,然后将电幅度或相位信息调制到一个波长上,耦合拍频后得到载频为光频间隔  $f_c$  的 LFM 波形。该方法具有很好的波形重构和参数调谐能力,但产生的信号带宽受限,虽然通过抛物线切割放大或循环调制可提升带宽,但驱动波形复杂,信号性能恶化严重<sup>[65-66]</sup>。扫频 OEO 通过在振荡器内部加入一个扫频周期和环腔延时同步的扫频滤波器,实现频域锁模,输出 LFM 波形。该方法不需要复杂的射频驱动信号,但产生的信号线性度较差。微波光子倍频法利用电光调制非线性特性,在光域对 LFM 信号进行倍频处理,提升其载频和带宽。由于倍频操作和光域杂散边带影响,信号信噪比会产生 6N dB(N 为倍频系数)以上的衰减。该方法原理简单、设计灵活、易与信号处理模块兼容,应用比较广泛,如 Kanno 等<sup>[49]</sup>提出的光子毫米波雷达、Li 等<sup>[56]</sup>提出的微波光子合成孔径雷达以及张方正等<sup>[59]</sup>提出的光基雷达阵列均采用微波光子倍频方法,其中, Kanno 等<sup>[49]</sup>提出的光子雷达的瞬时频率为 75~110 GHz。

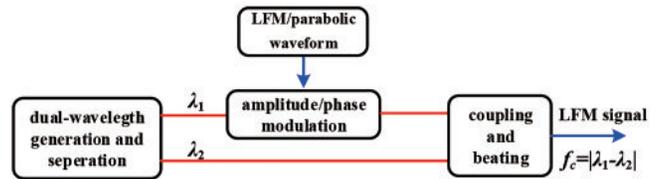


图 8 双波长光信号电光调制产生 LFM 信号的原理图<sup>[54]</sup>

Fig. 8 Schematic diagram of LFM signal generation using modulation of dual-wavelength signal<sup>[54]</sup>

单啁啾 LFM 信号具有刀刃状模糊函数,雷达探测过程中会产生距离-速度模糊。针对该问题, Zhu 等<sup>[71]</sup>提出了双啁啾 LFM 信号光学产生方法,通过光域处理,利用中频单啁啾 LFM 电信号产生高频双啁啾 LFM 雷达波形,实现非合作移动目标雷达探测时的距离-速度解耦。Li 等<sup>[72-77]</sup>进一步结合微波光子倍频技术,扩展了所产生双啁啾 LFM 信号的载频带宽,实验产生的双啁啾波形信号载频为 14 GHz、带宽为 1.6 GHz。此外, Hao 等<sup>[78]</sup>利用扫频 OEO 技术也产生了双啁啾 LFM 信号。

LFM 信号光学处理可以利用光子模数转换技术<sup>[51,54,79-80]</sup>,如:利用高稳定光子时钟对雷达信号进行光域采样,克服电时钟时间抖动问题;利用光学非线性效应对雷达脉冲进行光域时间拉伸,实现对高频信号的降速处理。Zou 等<sup>[54]</sup>设计的光子雷达方案中,利用光子时域拉伸,将接收信号频率降低 1/5。Ghelfi 等<sup>[51]</sup>研制的光基数字雷达中,综合采用了光子辅助采样和光子时域拉伸,但光子采样没有减少模数转换后的数据量,数据处理仍然复杂,光子拉伸则受限于线性展宽条件,脉冲时宽仅为 ns 量级。为克服光子时域拉伸方法采样时间窗口有限的问题,钱阿权等<sup>[81]</sup>利用多通道化设计提出了产生连续光载波实现连续模式采样的模

数转换系统,该方案可用于 LFM 信号的接收处理,但系统复杂,实时性较差。LFM 信号还可以通过光域去斜进行处理<sup>[56-59]</sup>,基本原理如图 9 所示。其中: $f_1$ 为 LFM 信号初始频率; $t_1$ 为信号发射时间; $\Delta t$ 为接收信号相对发射信号的时延; $\Delta f$ 为接收信号与发射信号的频率差。发射和接收 LFM 信号在时间重叠区域内存在频差和延时的线性对应关系,可在光域对二者进行混频,根据所得频率获取距离信息。Li 等<sup>[56]</sup>和 Zhang 等<sup>[57]</sup>分别研制的光子雷达中均采用该方法,实现了对接收信号(瞬时频率分别为 14.3~14.9 GHz 和 18~26 GHz)的低速采样处理(采样率分别为 100 MSa/s 和 500 MSa/s)。

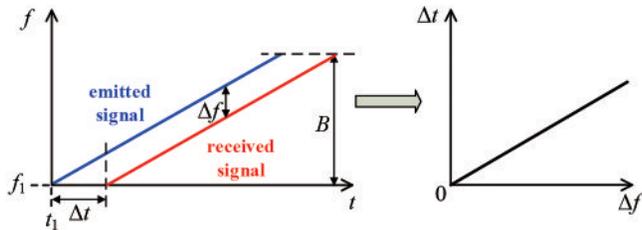


图 9 LFM 信号去斜处理的原理图<sup>[56-59]</sup>

Fig. 9 Schematic diagram of the de-chirp operation for LFM signal<sup>[56-59]</sup>

综上所述,现有 LFM 信号光学产生和处理研究主要面向雷达应用,主要针对的问题是扩展 LFM 信号的载频、带宽和 TBWP,提升雷达的探测精度,同时提升雷达接收机对高频宽带信号的处理能力,促进微波光

子雷达的工程化应用,并没有考虑通信功能的实现和雷达通信的综合设计。

### 5.3 LFM 一体化波形的光学产生和处理

基于微波光子技术产生和处理 LFM 一体化波形,构建一体化系统,可以在集成雷达通信功能、减小系统体积和质量的基础上,进一步优化提升系统的工作性能。2014 年起, Li 等<sup>[82-83]</sup>先后提出了多种基于超短光脉冲整形的幅度、相位可调 LFM 波形产生方法。2017 年, Deng 等<sup>[84]</sup>基于双波长光信号调制产生了 PSK-LFM 信号。这些复合波形具备了 LFM 一体化信号的形式,但前者产生的子 LFM 信号时宽很小,后者所产生的子 LFM 信号带宽受限,导致子 LFM 信号 TBWP 很小,不能满足雷达探测需求。

#### 5.3.1 光子雷达双功能演示实验

2016 年, Melo 等<sup>[85]</sup>基于光子雷达进行了雷达通信双功能演示实验,对雷达 LFM 信号(载频为 2.3 GHz、带宽为 20 MHz)和通信 OFDM 信号(载频为 4.9 GHz、速率为 54 Mbit/s)进行光域变频处理,如图 10 所示。其中: MLL 为锁模激光器; DDS 为直接数字合成器; MZM 为马赫-曾德尔调制器; BPF 为带通滤波器; LPF 为低通滤波器;  $IF_i$  表示光边带之间频率间隔;  $CF_i$  表示第  $i$  个载波信号;  $F_{MLL}$  表示 MLL 输出脉冲的重复频率。该演示初步探索了光子技术在雷达通信一体化中的应用,但是通信和雷达分割频谱资源,系统频谱利用率低,且产生的 LFM 信号带宽很小,未充分发挥微波光子技术的优势。

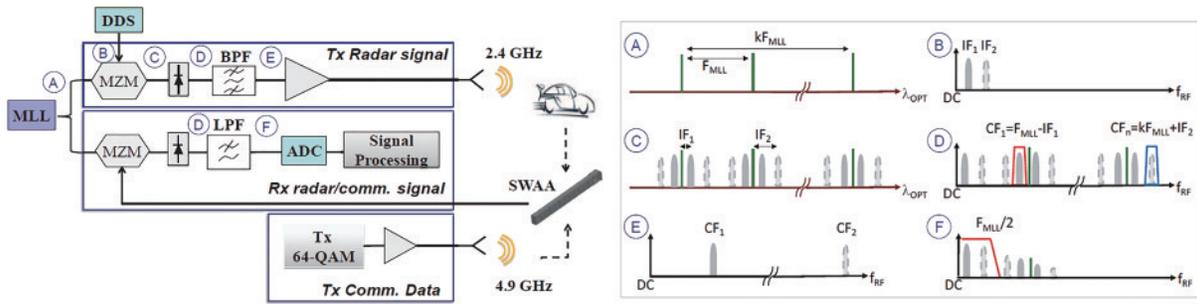


图 10 光子雷达通信双功能系统结构<sup>[85]</sup>

Fig. 10 Structure of the photonics radar-communication dual-function system<sup>[85]</sup>

#### 5.3.2 ASK-LFM 一体化信号的光学产生和处理

2020 年, 聂海江等<sup>[86]</sup>提出并通过实验验证了 ASK-LFM 一体化信号的光学产生和处理方案,其系统结构如图 11 所示。其中: LD 为激光器; PC 为偏振控制器; AWG 为任意波形发生器; PD 为探测器; EA 为电放大器。在发射端,通过使用两个级联的 MZM 分别进行 LFM 信号的光域倍频处理和通信数据的 ASK 调制,得到载频带宽为输入 LFM 信号 4 倍的 ASK-LFM 一体化波形。通信接收端,对接收信号进行包络检波,实现信息解调。雷达接收端,将回波信号调制到 LFM 信号的 2 阶光边带上,此时 +2 阶光边

带调制的回波信号与 -2 阶光边带拍频即可实现 LFM 信号的光域去斜处理,从而提取出目标距离信息。实验产生了带宽为 18~26 GHz 的 ASK-LFM 连续波形,其中, LFM 信号的重复时间为 50  $\mu$ s,通信速率为 100 Mbit/s,雷达接收端采样示波器采样率为 100 MSa/s。该方案验证了基于微波光子技术的 LFM 一体化信号同步进行雷达通信的可行性,但 ASK 调制影响信号包络平坦度,如图 12 所示。可以发现,相比纯 LFM 信号波形, ASK-LFM 信号的自相关输出主瓣降低了约 3 dB,意味着一体化信号的探测距离减小了 1/2。

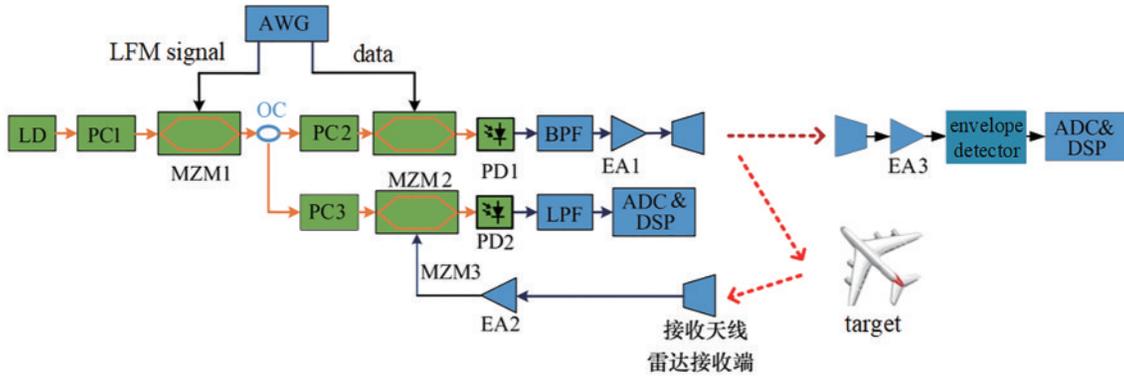


图 11 ASK-LFM 一体化波形光学产生和处理方案<sup>[86]</sup>

Fig. 11 Optical generation and processing of ASK-LFM integrated waveform<sup>[86]</sup>

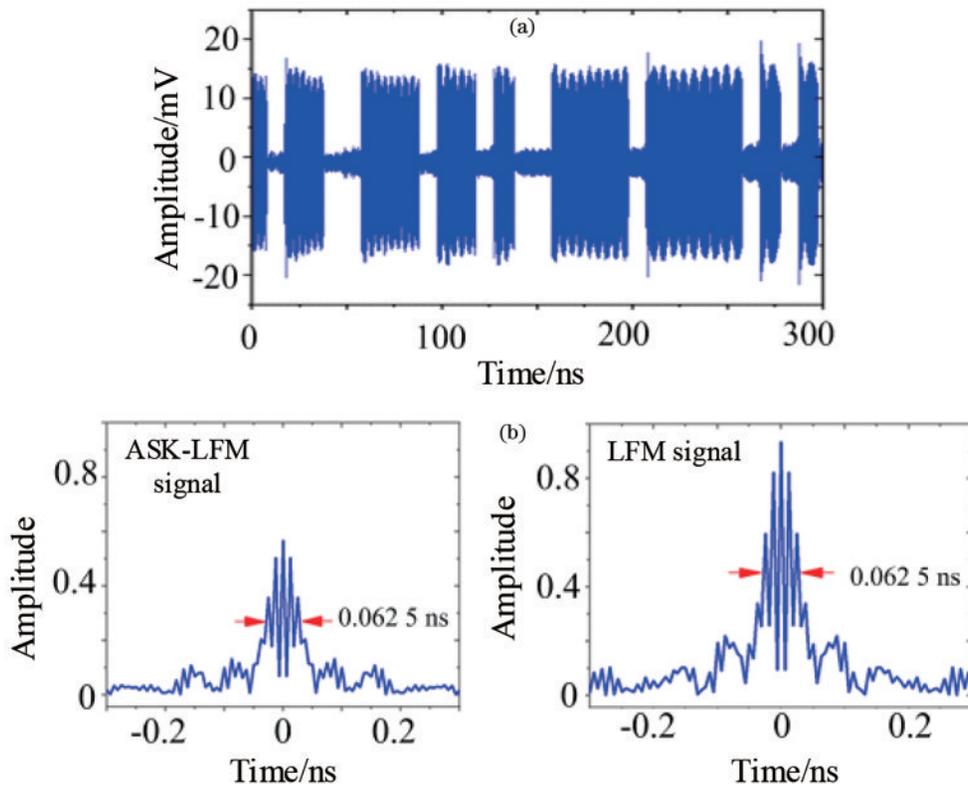


图 12 不同信号的波形<sup>[86]</sup>。(a) ASK-LFM 一体化波形；(b) ASK-LFM 信号和 LFM 信号的自相关输出  
Fig. 12 Waveforms of different signals<sup>[86]</sup>. (a) ASK-LFM integrated waveform; (b) autocorrelation output of ASK-LFM signal and LFM signal

### 5.3.3 PSK-LFM 一体化信号光学产生和处理

2020 年起, Li 等<sup>[87-90]</sup>先后提出了多种不同结构的 LFM 一体化波形光学产生方案, 并仿真分析了其在雷达和通信中的应用性能<sup>[87-90]</sup>。为克服一体化信号的包络起伏问题, 设计方案选用 PSK-LFM 波形, 如图 13 所示。其中: OF 为光滤波器; EDFA 为掺铒光纤放大器; Pol 为线偏振器; EF 为电滤波器; TD 为延时线。结合微波光子倍频技术, 实现高频宽带一体化波形的光域产生, 结合光偏振复用技术, 实现对端通信数据的光域相干解调处理, 雷达信号的处理则采用匹配滤波方法。PSK-LFM 波形的优点在于不会减小雷达探测作用距离, 相反, 通过设置调相数

据, 可以增大探测范围, 如图 14 所示。

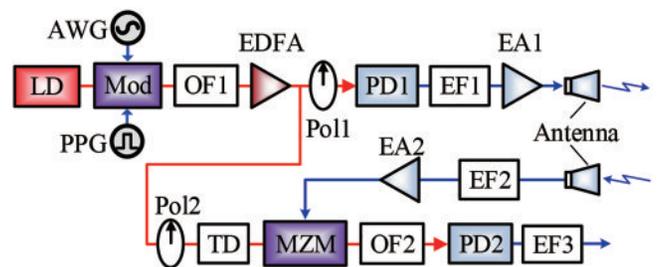


图 13 PSK-LFM 一体化波形光学产生和处理结构<sup>[89]</sup>

Fig. 13 Structure of optical generation and processing of PSK-LFM waveform<sup>[89]</sup>

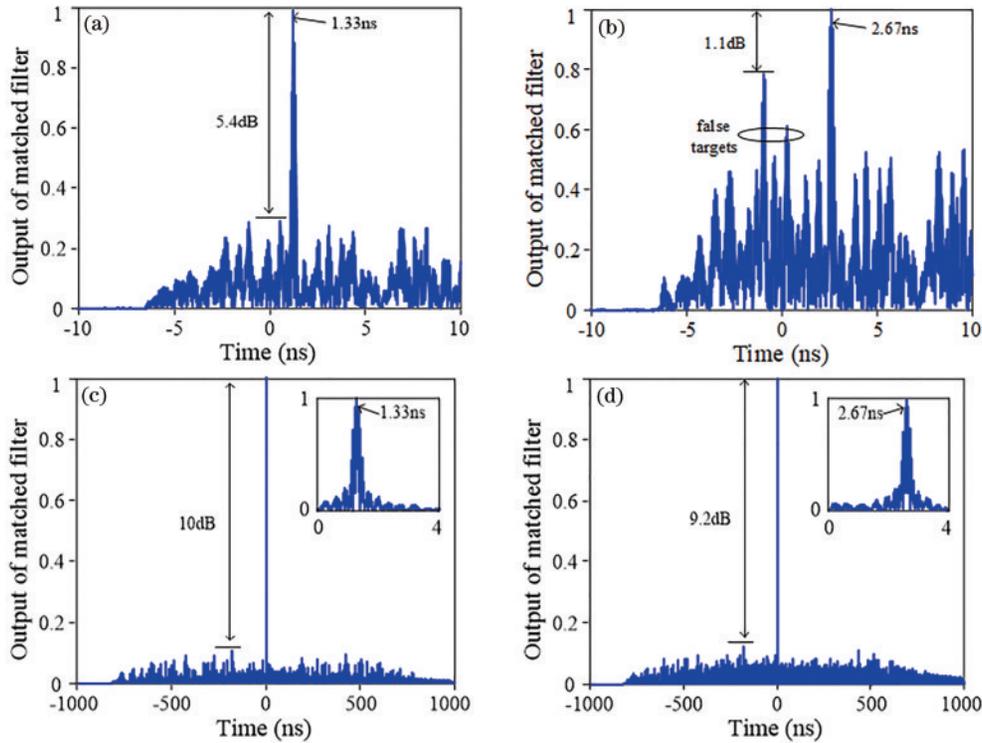


图 14 不同条件下匹配滤波器的归一化输出<sup>[89]</sup>。(a) 单个子 LFM 脉冲(距离为 0.2 m);(b) 单个子 LFM 脉冲(距离为 0.5 m);

(c)  $M=127$  的序列调制 PSK-LFM 脉冲(距离为 0.2 m);(d)  $M=127$  的序列调制 PSK-LFM 脉冲(距离为 0.5 m)

Fig. 14 Normalized output of matched filter under different conditions<sup>[89]</sup>. (a) Single sub-LFM pulse (distance of 0.2 m); (b) single sub-LFM pulse (distance of 0.5 m); (c) sequence-modulated PSK-LFM pulse with  $M=127$  (distance of 0.2 m); (d) sequence-modulated PSK-LFM pulse with  $M=127$  (distance of 0.5 m)

上述研究对 LFM 一体化信号的光学产生和处理方法进行了初步探索,验证了基于微波光子技术构建一体化系统的可行性,但仍然存在一系列问题需要深入研究。如现有 LFM 一体化波形尚未完成信号的全光域的产生和处理;利用 PSK-LFM 信号进行雷达探测时,匹配滤波需要较长处理时间;此外,现有 LFM 一体化系统仅考虑单向信息传递,完成双向全双工通信时需进行频率复用(频谱利用率低)或对天线和电磁波的极化态进行设置(电磁波交叉极化会恶化接收性能)。微波光子本质上作为一种模拟处理手段,电光调制和光域放大产生的非线性效应、噪声等会对信号造成不可逆影响,因此进行微波光子一体化设计时,需要综合考虑其技术优势和带来的不利影响,结合数字处理的优势确保系统性能。

## 6 结 论

近年来,人们致力于雷达和通信的一体化研究,以优化系统结构,提升系统性能。随着 5G 技术的迅猛发展和军事斗争的不断演化,设计一种硬件共用、频谱共享、功能融合的通信雷达一体化系统具有极为重要的民用和军用价值。雷达通信一体化设计的首要关键问题是一体化波形的设计。与扩频序列和 OFDM 信号相比,LFM 信号以独特的波形特点和固有的处理优

势,在雷达、通信、电子战等各领域有广泛的应用价值和成熟的技术基础。在已有 LFM 一体化波形中,啁啾复用 LFM 信号不能满足波形融合的新型一体化发展要求,初始频率控制 LFM 一体化信号频谱利用率低,幅度控制 LFM 和 OFDM-LFM 信号存在包络起伏现象,PSK-LFM 和 MSK-LFM 波形是相对比较合适的一体化信号。

雷达通信一体化设计的又一关键问题是一体化波形的产生和处理。受电子瓶颈限制,现有电学技术难以充分满足 GHz 量级一体化波形的发展需求。与电子技术相比,微波光子技术可以直接产生、低损传输、灵活处理具有高频宽带、大调谐范围和抗电磁干扰能力的射频波形,有望为雷达和通信系统发展以及军事斗争演化带来技术性和体制性变革。微波光子雷达及其 LFM 信号的产生和处理已经取得一些研究成果,其中,光域倍频和光域去斜处理具有较为突出的技术优势和成熟的研究基础,在现有微波光子雷达中应用比较广泛。基于此,研究人员对 LFM 一体化信号的光学产生和处理进行了初步探索,验证了基于微波光子构建一体化系统的可行性,但仍有一系列问题需要深入研究。综合考虑,未来的雷达通信一体化系统不仅是光学和电学技术相融合的系统,也是模拟和数字技术相结合的系统。

## 参 考 文 献

- [1] 石荣, 张礼, 包金晨. 雷达系统与通信系统基本概念、模型的关联与交融[J]. 空军预警学院学报, 2020, 34(1): 5-10.  
Shi R, Zhang L, Bao J C. Correlation and integration of basic concepts and models for radar system and communication system[J]. Journal of Air Force Early Warning Academy, 2020, 34(1): 5-10.
- [2] Mishra K V, Bhavani Shankar M R, Koivunen V, et al. Toward millimeter-wave joint radar communications: a signal processing perspective[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5): 100-114.
- [3] Hassanien A, Amin M G, Aboutanos E, et al. Dual-function radar communication systems: a solution to the spectrum congestion problem[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2019, 36(5): 115-126.
- [4] Feng Z Y, Fang Z X, Wei Z Q, et al. Joint radar and communication: a survey[J]. China Communications, 2020, 17(1): 1-27.
- [5] Liu F, Masouros C, Petropulu A P, et al. Joint radar and communication design: applications, state-of-the-art, and the road ahead[J]. IEEE Transactions on Communications, 2020, 68(6): 3834-3862.
- [6] 张明友. 雷达-电子战-通信一体化概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.  
Zhang M Y. Introduction of radar-electronic warfare-communication integration[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010.
- [7] 马定坤, 匡银, 杨新权. 侦干探通一体化现状与关键技术研究[J]. 中国电子科学研究院学报, 2016, 11(5): 457-462.  
Ma D K, Kuang Y, Yang X Q. Key issues and status research of integrated reconnaissance, interference, detection and communications[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2016, 11(5): 457-462.
- [8] Moo P W, DiFilippo D J. Multifunction RF systems for naval platforms[J]. Sensors, 2018, 18(7): 2076.
- [9] 肖博, 霍凯, 刘永祥. 雷达通信一体化研究现状与发展趋势[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(3): 739-750.  
Xiao B, Huo K, Liu Y X. Development and prospect of radar and communication integration[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(3): 739-750.
- [10] 梁兴东, 李强, 王杰, 等. 雷达通信一体化技术研究综述[J]. 信号处理, 2020, 36(10): 1615-1627.  
Liang X D, Li Q, Wang J, et al. Joint wireless communication and radar sensing: review and future prospects[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(10): 1615-1627.
- [11] Chiriyath A R, Paul B, Bliss D W. Radar-communications convergence: coexistence, cooperation, and co-design[J]. IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking, 2017, 3(1): 1-12.
- [12] 刘凡, 袁伟杰, 原进宏, 等. 雷达通信频谱共享及一体化: 综述与展望[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 467-484.  
Liu F, Yuan W J, Yuan J H, et al. Radar-communication spectrum sharing and integration: overview and prospect[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 467-484.
- [13] Tavakoli G C, Hilterbrick C L, Evins J B, et al. The advanced multifunction RF concept[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2005, 53(3): 1009-1020.
- [14] van Rossum W L, de Wit J J M, Otten M P G, et al. SMRF architecture concepts[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2011, 26(5): 12-17.
- [15] 李璐, 李广军, 李超强. 基于有源相控阵雷达的通信系统[J]. 中国电子科学研究院学报, 2008, 3(2): 131-135, 144.  
Li L, Li G J, Li C Q. A communication system based on active phased-array radar[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2008, 3(2): 131-135, 144.
- [16] Sturm C, Wiesbeck W. Waveform design and signal processing aspects for fusion of wireless communications and radar sensing[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(7): 1236-1259.
- [17] Takeda M, Hanada Y, Kohno R. Spread spectrum communication and ranging system between a roadside and a vehicle using interference canceler[J]. Electronics and Communications in Japan, 2000, 83(5): 83-92.
- [18] Jamil M, Zepernick H J, Pettersson M I. On integrated radar and communication systems using Oppermann sequences[C]//MILCOM 2008-2008 IEEE Military Communications Conference, November 16-19, 2008, San Diego, CA, USA. New York: IEEE Press, 2008.
- [19] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 多相伪随机序列在雷达通信一体化中的应用[J]. 信号处理, 2012, 28(11): 1543-1550.  
Li X B, Yang R J, Cheng W. The application of poly-phase pseudorandom sequence in integrated radar and communication[J]. Signal Processing, 2012, 28(11): 1543-1550.
- [20] 刘少华, 黄志星. 基于扩频的雷达-通信一体化信号的设计[J]. 雷达科学与技术, 2014, 12(1): 69-75.  
Liu S H, Huang Z X. Design of integrated radar-communication signal based on spread spectrum[J]. Radar Science and Technology, 2014, 12(1): 69-75.
- [21] Sturm C, Zwick T, Wiesbeck W. An OFDM system concept for joint radar and communications operations [C]//IEEE 69th Vehicular Technology Conference, April 26-29, 2009, Barcelona, Spain. New York: IEEE Press, 2009.
- [22] Garmatyuk D, Schuergger J, Kauffman K. Multifunctional software-defined radar sensor and data communication system[J]. IEEE Sensors Journal, 2011, 11(1): 99-106.
- [23] 刘永军, 廖桂生, 杨志伟. 基于 OFDM 的雷达通信一体化波形模糊函数分析[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2008-2018.  
Liu Y J, Liao G S, Yang Z W. Ambiguity function analysis of integrated radar and communication waveform based on OFDM[J]. Systems Engineering and Electronics, 2016, 38(9): 2008-2018.
- [24] Dokhanchi S H, Shankar M R B, Stifter T, et al.

- OFDM-based automotive joint radar-communication system[C]//2018 IEEE Radar Conference, April 23-27, 2018, Oklahoma City, OK, USA. New York: IEEE Press, 2018: 902-907.
- [25] 张秋月, 张林让, 谷亚彬, 等. 恒包络 OFDM 雷达通信一体化信号设计[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 77-84.  
Zhang Q Y, Zhang L R, Gu Y B, et al. Signal design of communication integration for radars with constant envelope OFDM[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 77-84.
- [26] 张飞飞. 基于 OFDM 的 5 GHz 雷达通信一体化实现技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.  
Zhang F F. Research on implementation technologies of 5 GHz radar and communication integrated system based on OFDM[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.
- [27] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟, 等. 新的互补序列在雷达通信一体化中的应用[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(3): 693-699.  
Li X B, Yang R J, Cheng W, et al. Application of a novel complementary signal to integrated radar and communication[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(3): 693-699.
- [28] 陈伯孝. 现代雷达系统分析与设计[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2012.  
Chen B X. Modern radar system analysis and design[M]. Xi'an: Xidian University Press, 2012.
- [29] Poisel R A. 电子战接收机与接收系统[M]. 楼才义, 译. 北京: 电子工业出版社, 2016.  
Poisel R A. Electronic warfare receivers and receiving systems[M]. Lou C Y, Transl. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2016.
- [30] Roberton M, Brown E R. Integrated radar and communications based on chirped spread-spectrum techniques[C]//IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, June 8-13, 2003, Philadelphia, PA, USA. New York: IEEE Press, 2003: 611-614.
- [31] Saddik G N, Singh R S, Brown E R. Ultra-wideband multifunctional communications/radar system[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2007, 55(7): 1431-1437.
- [32] 胡廷舟, 谢锐, 刘俊, 等. LFM-MPSK 雷达通信一体化系统时频联合同步技术研究[J]. 信号处理, 2020, 36(10): 1687-1697.  
Hu T Z, Xie R, Liu J, et al. Joint timing and frequency synchronization in LFM-MPSK based radar and communication integrated system[J]. Journal of Signal Processing, 2020, 36(10): 1687-1697.
- [33] 周宇, 杨慧婷, 谷亚彬, 等. 基于调频调制的雷达通信共享信号研究[J]. 电子科技大学学报, 2017, 46(6): 830-835.  
Zhou Y, Yang H T, Gu Y B, et al. Study on integrated radar and communication signal based on chirp-rate modulation[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2017, 46(6): 830-835.
- [34] Barrenechea P, Elferink F, Janssen J. FMCW radar with broadband communication capability[C]//2007 European Radar Conference, October 10-12, 2007, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2007: 130-133.
- [35] 曾浩, 吉利霞, 李凤, 等. 16QAM-LFM 雷达通信一体化信号设计[J]. 通信学报, 2020, 41(3): 182-189.  
Zeng H, Ji L X, Li F, et al. 16QAM-LFM waveform design for integrated radar and communication[J]. Journal on Communications, 2020, 41(3): 182-189.
- [36] Nowak M, Wicks M, Zhang Z P, et al. Co-designed radar-communication using linear frequency modulation waveform[J]. IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 2016, 31(10): 28-35.
- [37] 孙延坤, 陈兴波, 曹晨, 等. 基于 MSK-LFM 的 PD 雷达信号处理仿真[J]. 中国电子科学研究院学报, 2012, 7(4): 370-373.  
Sun Y K, Chen X B, Cao C, et al. Simulation of PD radar signal processing based on MSK-LFM[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2012, 7(4): 370-373.
- [38] 陈兴波, 王小漠, 曹晨, 等. 雷达通信综合化波形设计技术分析[J]. 现代雷达, 2013, 35(12): 56-59, 63.  
Chen X B, Wang X M, Cao C, et al. Techniques analysis of radar-communication integrating waveform[J]. Modern Radar, 2013, 35(12): 56-59, 63.
- [39] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 基于 Chirp 信号的雷达通信一体化研究[J]. 雷达科学与技术, 2012, 10(2): 180-186.  
Li X B, Yang R J, Cheng W. Integrated radar and communication based on Chirp[J]. Radar Science and Technology, 2012, 10(2): 180-186.
- [40] Yang C, Wang M, Zheng L, et al. Dual function system with shared spectrum using FMCW[J]. IEEE Access, 2018, 6: 79026-79038.
- [41] 李晓柏, 杨瑞娟, 程伟. 基于频率调制的多载波 Chirp 信号雷达通信一体化研究[J]. 电子与信息学报, 2013, 35(2): 406-412.  
Li X B, Yang R J, Cheng W. Integrated radar and communication based on multicarrier frequency modulation Chirp signal[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2013, 35(2): 406-412.
- [42] 刘冰凡, 陈伯孝. 基于 OFDM-LFM 信号的 MIMO 雷达通信一体化信号共享设计研究[J]. 电子与信息学报, 2019, 41(4): 801-808.  
Liu B F, Chen B X. Integration of MIMO radar and communication with OFDM-LFM signals[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019, 41(4): 801-808.
- [43] 赵玉振, 陈龙永, 张福博, 等. 一种基于 OFDM-chirp 的雷达通信一体化波形设计与处理方法[J]. 雷达学报, 2021, 10(3): 453-466.  
Zhao Y Z, Chen L Y, Zhang F B, et al. A new method of joint radar and communication waveform design and signal processing based on OFDM-chirp[J]. Journal of Radars, 2021, 10(3): 453-466.
- [44] 费元春, 苏广川, 米红, 等. 宽带雷达信号产生技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.  
Fei Y C, Su G C, Mi H, et al. The generating technology of wideband radar signals[M]. Beijing: National Defense

- Industry Press, 2002.
- [45] 张亚梅. 基于偏振调制微波光子移相的模拟信号处理[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.  
Zhang Y M. Analog signal processing based on polarization-modulated photonic microwave phase shifting [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [46] Capmany J, Mora J, Gasulla I, et al. Microwave photonic signal processing[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2013, 31(4): 571-586.
- [47] Matthews P J. The role of photonics in next generation military systems[C]//2016 IEEE Avionics and Vehicle Fiber-Optics and Photonics Conference, October 31-November 3, 2016, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE Press, 2016: 15-16.
- [48] 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.  
Pan S L, Zhang Y M. Microwave photonic radar and key technologies[J]. *Science & Technology Review*, 2017, 35(20): 36-52.
- [49] Kanno A, Kawanishi T. Broadband frequency-modulated continuous-wave signal generation by optical modulation technique[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3566-3572.
- [50] Ridgway R W, Dohrman C L, Conway J A. Microwave photonics programs at DARPA[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3428-3439.
- [51] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system[J]. *Nature*, 2014, 507(7492): 341-345.
- [52] 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.
- [53] 张方正, 潘时龙. 面向雷达应用的微波光子信号产生技术[J]. *数据采集与处理*, 2014, 29(6): 922-929.  
Zhang F Z, Pan S L. Microwave photonic signal generation for radar applications[J]. *Journal of Data Acquisition and Processing*, 2014, 29(6): 922-929.
- [54] Zou W W, Zhang H, Long X, et al. All-optical central-frequency-programmable and bandwidth-tailorable radar[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 19786.
- [55] 崔元军, 邹卫文, 张斯滕, 等. 基于互逆光纤色散的微波光子雷达系统设计和实现[J]. *光子学报*, 2017, 46(12): 1206005.  
Cui Y J, Zou W W, Zhang S T, et al. Scheme of the microwave photonic radar architecture based on mutual optical fiber dispersion[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, 46(12): 1206005.
- [56] 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.
- [57] 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.
- [58] 李昊, 魏永峰, 季玉双, 等. 雷达线性调频信号产生与去啾啾方法研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(3): 0306003.  
Li H, Wei Y F, Ji Y S, et al. Generation and dechirping of linear frequency modulation signals[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(3): 0306003.
- [59] 张方正, 高彬栋, 潘时龙. 基于微波光子倍频与去斜接收的宽带阵列雷达(特邀)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(7): 20211051.  
Zhang F Z, Gao B D, Pan S L. Broadband array radar based on microwave photonic frequency multiplication and de-chirp receiving(Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20211051.
- [60] 潘时龙, 朱丹. 微波光子认知雷达技术[J]. *雷达科学与技术*, 2021, 19(2): 117-129.  
Pan S L, Zhu D. A microwave photonic cognitive radar [J]. *Radar Science and Technology*, 2021, 19(2): 117-129.
- [61] McKinney J D, Leaird D E, Weiner A M. Millimeter-wave arbitrary waveform generation with a direct space-to-time pulse shaper[J]. *Optics Letters*, 2002, 27(15): 1345-1347.
- [62] Khan M H, Shen H, Xuan Y, et al. Ultrabroadband arbitrary radiofrequency waveform generation with a silicon photonic chip-based spectral shaper[J]. *Nature Photonics*, 2010, 4(2): 117-122.
- [63] Zhang J J, Coutinho O L, Yao J P. A photonic approach to linearly chirped microwave waveform generation with an extended temporal duration[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2016, 64(6): 1947-1953.
- [64] Kawanishi T, Sakamoto T, Kanno A. Ultra wideband frequency chirp millimetre-wave signal generation using electro-optic modulation[C]//2011 13th International Conference on Transparent Optical Networks, June 26-30, 2011, Stockholm, Sweden. New York: IEEE Press, 2011.
- [65] Li W Z, Yao J P. Generation of linearly chirped microwave waveform with an increased time-bandwidth product based on a tunable optoelectronic oscillator and a recirculating phase modulation loop[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3573-3579.
- [66] Zhang Y M, Ye X W, Guo Q S, et al. Photonic generation of linear-frequency-modulated waveforms with improved time-bandwidth product based on polarization modulation[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, 35(10): 1821-1829.
- [67] Hao T F, Cen Q Z, Dai Y T, et al. Breaking the limitation of mode building time in an optoelectronic oscillator[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 1839.
- [68] Zhou P, Zhang F Z, Pan S L. Generation of linear frequency-modulated waveforms by a frequency-sweeping optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(18): 3927-3934.
- [69] 刘冉冉, 杜鹏飞, 罗雄, 等. 基于扫频光电振荡的大时宽带宽积 LCMW 产生方法[J]. *空军预警学院学报*, 2019, 33(4): 253-256.  
Liu R R, Du P F, Luo X, et al. Method of generating

- LCMW with large TBWP based on frequency-sweeping optoelectronic oscillation[J]. *Journal of Air Force Early Warning Academy*, 2019, 33(4): 253-256.
- [70] 郝腾飞, 石暖暖, 李伟, 等. 多波段线性调频傅里叶域锁模光电振荡器[J]. *应用科学学报*, 2020, 38(4): 640-646.  
Hao T F, Shi N N, Li W, et al. Multi-band linearly frequency modulated Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2020, 38(4): 640-646.
- [71] Zhu D, Yao J P. Dual-chirp microwave waveform generation using a dual-parallel Mach-Zehnder modulator [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2015, 27(13): 1410-1413.
- [72] Li X, Zhao S H, Zhu Z H, et al. Photonic generation of frequency and bandwidth multiplying dual-chirp microwave waveform[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2017, 9(3): 7104014.
- [73] Zhang K, Zhao S H, Wen A J, et al. Anti-chromatic dispersion transmission of frequency and bandwidth-doubling dual-chirp microwave waveform[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(16): 4004-4007.
- [74] Zhang K, Zhao S H, Lin T, et al. Photonic generation of multi-frequency dual-chirp microwave waveform with multiplying bandwidth[J]. *Results in Physics*, 2019, 13: 102226.
- [75] Zhang K, Zhao S H, Li X, et al. Photonic approach to dual-band dual-chirp microwave waveform generation with multiplying central frequency and bandwidth[J]. *Optics Communications*, 2019, 437: 17-26.
- [76] Li X, Zhao S H, Zhang K, et al. Dual-chirp waveform generation and its TBWP improvement based on polarization modulation and phase coding[J]. *Optics Communications*, 2020, 463: 125413.
- [77] 张昆, 赵尚弘, 林涛, 等. 基于双驱动 DP-MZM 的倍频双啁啾信号产生方法[J]. *空间电子技术*, 2020, 17(4): 109-116.  
Zhang K, Zhao S H, Lin T, et al. Frequency-multiplying dual-chirp microwave waveform generation based on a dual-drive DP-MZM[J]. *Space Electronic Technology*, 2020, 17(4): 109-116.
- [78] Hao T F, Tang J, Shi N N, et al. Dual-chirp Fourier domain mode-locked optoelectronic oscillator[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(8): 1912-1915.
- [79] 张天航, 邱琪, 苏君, 等. 光模数转换技术及其研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(12): 120003.  
Zhang T H, Qiu Q, Su J, et al. Optical analog-to-digital conversion technology and its recent progress[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(12): 120003.
- [80] Mahjoubfar A, Churkin D V, Barland S, et al. Time stretch and its applications[J]. *Nature Photonics*, 2017, 11(6): 341-351.
- [81] 钱阿权, 邹卫文, 吴龟灵, 等. 光子时间拉伸模数转换系统的多通道化设计与实现[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505001.  
Qian A Q, Zou W W, Wu G L, et al. Design and implementation of multi-channel photonic time-stretch analog-to-digital converter[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0505001.
- [82] Li Y H, Dezfouliyan A, Weiner A M. Photonic synthesis of spread spectrum radio frequency waveforms with arbitrarily long time apertures[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(20): 3580-3587.
- [83] Rashidinejad A, Leaird D E, Weiner A M. Ultrabroadband radio-frequency arbitrary waveform generation with high-speed phase and amplitude modulation capability[J]. *Optics Express*, 2015, 23(9): 12265-12273.
- [84] Deng H, Zhang J J, Chen X, et al. Photonic generation of a phase-coded chirp microwave waveform with increased TBWP[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2017, 29(17): 1420-1423.
- [85] Melo S, Pinna S, Bogoni A, et al. Dual-use system combining simultaneous active radar & communication, based on a single photonics-assisted transceiver[C]//2016 17th International Radar Symposium (IRS), May 10-12, 2016, Krakow, Poland. New York: IEEE Press, 2016.
- [86] 聂海江, 侯文栋, 张方正, 等. 基于微波光子的雷达通信一体化技术研究[J]. *航天电子对抗*, 2020, 36(5): 34-39.  
Nie H J, Hou W D, Zhang F Z, et al. Research on technology of photonics-based integrated communication and radar system[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2020, 36(5): 34-39.
- [87] Li X, Zhao S H, Wang G D, et al. Generation and detection of a phase modulated linearly chirped waveform using an orthogonally polarized optical signal[C]//Asia Communications and Photonics Conference 2020, October 24-27, 2020, Beijing, China. Washington, D. C.: OSA, 2020: M4A.349.
- [88] Li X, Zhao S H, Wang G D. Photonics generation of microwave linearly chirped signal with amplitude and phase modulation capability[J]. *Journal of Modern Optics*, 2021, 68(6): 339-349.
- [89] Li X, Zhao S H, Wang G D, et al. Photonic generation and application of a bandwidth multiplied linearly chirped signal with phase modulation capability[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 82618-82629.
- [90] 周逸潇, 赵尚弘, 李轩, 等. 面向通雷一体化的啁啾调制倍频 LFM 产生研究[J]. *中国激光*, 2022, 49(7): 0706001.  
Zhou Y X, Zhao S H, Li X, et al. Chirp modulated and frequency multiplied LFM for communication radar integration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(7): 0706001.