

文章编号:1004-9037(2014)06-0922-08

# 面向雷达应用的微波光子信号产生技术

张方正 潘时龙

(雷达成像与微波光子技术教育部重点实验室,南京航空航天大学电子信息工程学院,南京,210016)

**摘要:**信号源是雷达发射机与接收机的关键组成部分,其性能直接影响着雷达的探测能力。基于电子技术的信号产生在信号载频、带宽以及噪声等特性方面受到限制,难以满足未来高性能雷达对高载频、大带宽、低噪声信号源的需求。新兴的微波光子技术能利用光子学手段产生高质量微波信号,在雷达信号产生领域具有广阔的应用前景。本文主要介绍利用微波光子技术产生雷达信号的研究进展,包括基于光电振荡器的高性能本振信号产生、线性调频信号产生和相位编码信号产生。通过对以上技术的分析发现,基于微波光子技术的微波信号产生具有带宽大、抗干扰等突出优点,是解决当前雷达信号产生技术瓶颈的有效手段。

**关键词:**雷达;微波光子学;光电振荡器;线性调频;相位编码

中图分类号:TN832.1

文献标志码:A

## Microwave Photonic Signal Generation for Radar Applications

Zhang Fangzheng, 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, 210016, China)

**Abstract:** Signal source is a key component in both transmitter and receiver of a radar system, and its property determines the performance of the radar system. The signal generation based on electronic technologies is limited in aspects of carrier frequency, signal bandwidth, and noise properties, which cannot meet the requirement for signals with high frequency, large bandwidth and low noise. Microwave photonics, as a newly arisen and promising technology, can generate high quality microwave signals and would find wide applications in future radar systems. The recent progress of radar signal generation by microwave photonic technologies is presented. The generation of high-quality local oscillator signal based on optoelectronic oscillators, and the generation of linear chirped or phase coded microwave signals are discussed. Through the analysis of the above techniques, it is found that microwave photonic signal generation, with the advantages of wide bandwidth and immunity from interference, is one of the efficient ways to break through the bottleneck for current radar signal generation.

**Key words:** radar; microwave photonics; optoelectronic oscillator; linear frequency modulation; phase coding

## 引 言

雷达是20世纪人类在电子工程领域的伟大发明之一<sup>[1]</sup>,它利用无线电波在传播时遇到障碍物后反射的特性确定目标方位、距离、高度等信息,如今

已经广泛应用于军用与民用的诸多领域,并发挥着重要作用。信号源是雷达发射机与接收机必须具备的模块,其性能决定着雷达的探测精度、距离等。根据不同雷达的探测目标与工作机制,其发射机要产生合适的发射波形信号。矩形脉冲信号、线性调频信号和相位编码信号都是雷达中常用的波形信

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2012CB315705)资助项目;国家自然科学基金优秀青年基金(61422108)资助项目;国家自然科学基金(61401201)资助项目;江苏省自然科学基金(BK20140822)资助项目。

收稿日期:2014-08-25;修订日期:2014-10-08

号。其中,线性调频信号和相位编码信号结合脉冲压缩技术,既能通过增大脉冲时间宽度来增大信号能量以提高探测距离,又可提升接收机信噪比并提高雷达的距离分辨率。因而,线性调频信号与相位编码信号源在高性能雷达中应用十分广泛。除以上波形信号源外,高质量本振信号源也是雷达发射机中的重要模块:在发射机中用于将信号上变频至雷达的发射频段;在接收机中用于将接收信号下变频至中频信号以方便接收机的进一步处理。雷达系统对本振信号源的要求主要有两方面:(1)为了不改变接收机中频处理硬件电路,本振信号频率要具有可调谐性。(2)为保证雷达的相参特性,本振信号要具有高度的相位稳定性。

尽管电子技术发展成熟,但随着下一代雷达对更高载波频率、更大工作带宽等的需求逐渐迫切,电子技术的瓶颈显现出来,尤其是在信号产生方面。目前实现信号产生的电子器件(频率合成器和模数转换器)在高频的工作带宽窄并且噪声特性差。这从源头上限制了雷达性能的提升。近些年新兴的微波光子学,利用光子技术实现微波信号的产生与处理,具有高精度和大带宽等优势,可以直接实现毫米波频段的高稳定本振和任意波形产生,避免倍频及上变频操作引起的信号质量下降<sup>[2-4]</sup>。微波光子学赋予了雷达更加蓬勃的生命力,并有望改变雷达体制。意大利科学家已成功构建了世界第一部光子雷达<sup>[5-6]</sup>,该系统综合应用了基于微波光子技术的高稳定本振信号产生技术、任意波形产生技术以及基于光子模数转换的接收机技术。

微波光子技术在雷达中的作用日渐凸显,在此背景下,本文主要回顾面向雷达应用的微波光子信号产生技术的研究进展,具体介绍基于微波光子技术的高性能本振信号产生、线性调频信号产生和相位编码信号产生。

## 1 基于光电振荡器的本振信号源

本振信号源的性能直接影响着雷达的探测性能。传统的本振信号产生有很多局限性,例如为得到高频信号需要的多次倍频操作将恶化相位噪声、高 Q 介质谐振腔体积庞大并且对环境敏感等,因而难以满足未来雷达对高频率稳定度与高频谱纯度本振信号的需求。加州理工喷气动力实验室的 Yao X 和 Maleki L 于 1996 年利用微波光子技术开发了一种名为光电振荡器(Optoelectronic oscillator, OEO)的基于光子学储能单元的微波振荡器<sup>[7]</sup>。与传统微波振荡器相比,光电振荡器可产生

数兆赫兹到数百吉赫兹范围内的高纯度微波或毫米波信号,其相位噪声在 10 GHz 振荡频率下可低至  $-163 \text{ dBc/Hz}@6 \text{ kHz}$ 。将其作为本振信号具有十分优良的性能。此外,光电振荡器能同时提供光信号与电信号两种输出形式。

### 1.1 光电振荡器简介

光电振荡器通常由激光源、电光调制器、光电探测器(Photo-detector)、微波放大器和带通滤波器等组成,其基本结构如图 1 所示。激光源发射的连续光通过电光调制器实现强度调制,经过光纤延时后在光电探测器完成光信号到电信号的转换,得到的电信号经过电放大器、带通滤波器后加载于电光调制器,形成完整的闭合回路。其中带通滤波器实现选频以抑制杂波,微波放大器提供信号增益。信号在回路中多次循环,经过不断的光电/电光转换、放大及反馈过程,建立起稳定的自激振荡。

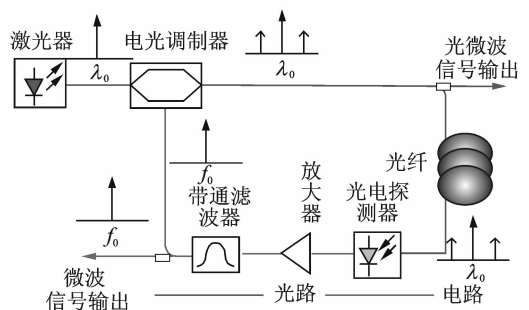


图 1 光电振荡器的基本结构

Fig. 1 Basic structure of OEO

近些年,研究人员针对光电振荡器开展了深入的研究以优化其性能,主要涉及降低相位噪声,提高边模抑制比,提高输出频率、提升频率调谐性等。

### 1.2 相位噪声

光电振荡器输出信号的相位噪声主要来源于激光器、光电探测器以及放大器等有源器件的热噪声、散射噪声及相对强度噪声。Eliyahu D 等利用低相对强度噪声的高功率 Nd:YAG 激光器和低相位噪声的阵列放大器实现光电振荡器,产生了极低相位噪声 ( $-163 \text{ dBc/Hz}@6 \text{ kHz}$ ) 的 10 GHz 微波信号<sup>[8]</sup>。Devgan P S 等利用低偏置的马赫曾德调制器(Mach-Zender modulator, MZM)和光放大器实现了全光增益的 OEO,与采用电放大器的 OEO 相比,该方案能使信号的相位噪声降低 10 dB<sup>[9]</sup>。采用高功率的 PD 能够有效降低白噪声,而采用多个 PD 或 PD 阵列能够降低闪烁噪声的影响<sup>[10]</sup>。文献[10]还通过实验验证了使光电振荡器

中有源器件工作于饱和状态能抑制信号的相位噪声。通过增加环路中光纤长度以提高系统 Q, 也能降低输出信号的相位噪声。

### 1.3 边模抑制比

在光电振荡器环路中使用长光纤有利于降低相位噪声, 而光电振荡器的振荡模式间隔与腔长成反比, 即光纤长度越大, 振荡模式的频率间隔越小。当光电振荡器的振荡频率间隔小到数吉赫兹时, 由于电滤波器的带宽限制一般很难滤除所有边模。

提高边模抑制比的一种方法是在单环路光电振荡器中引入另一不同长度的光纤环路从而构成双光纤振荡环路, 只有同时满足两个环路振荡条件的模式才有可能起振<sup>[11-14]</sup>。依据这个原理, 还可以构建更多环路的光电振荡器。双(多)环路光电振荡器可以分为电耦合的光电混合双环路结构<sup>[11]</sup>、光耦合的偏振复用双环路结构<sup>[12-13]</sup>以及波分复用的多环路结构<sup>[14]</sup>等。双(多)环路光电振荡器的边模抑制比得到提升, 但相位噪声却是两(多)个单独环路振荡时相位噪声的折中。为了克服这个缺点, Zhou W 提出主从结构的注入锁定双环光电振荡器<sup>[15]</sup>, 结构如图 2 所示。此系统用长光纤的主光电振荡器注入锁定短光纤的从属光电振荡器, 输出信号同时具有长光纤环路的优良相位噪声以及短光纤环路的大模式间隔。实验产生的 10 GHz 信号的相位噪声低至  $-150$  dBc/Hz @ 10 kHz, 边模抑制比也得到显著提升。但是该结构需要两个参数一致的光电振荡器实现注入锁定, 系统较复杂、成本较高。

另一种提高边模抑制比的方法是用高精细度的光滤波器代替电滤波器实现模式选择, 如使用法布里波罗(F-P)腔、回音壁模式(Whispering gallery mode, WGM)谐振器等, 因为 F-P 腔和 WGM

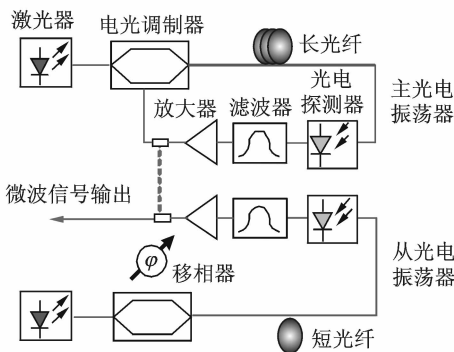


图 2 主从结构的注入锁定双环光电振荡器

Fig. 2 Injection-locked dual-loop OEO with master-slave structure

谐振器具有较窄的通带宽度<sup>[16-17]</sup>。耦合式光电振荡器(Coupled optoelectronic oscillator, COEO)也是一种非常有潜力的提高边模抑制比的方法<sup>[18]</sup>。在耦合式光电振荡器中, 主动锁模光纤激光器环路能够有效提高振荡器的 Q 值, 因此采用较短的光纤长度即可获得较低的相位噪声, 同时边模也能得到较好的抑制。

### 1.4 振荡频率

理论上, OEO 可以产生频率高达数百吉赫兹的信号, 并且相位噪声与频率无关, 但是由于高频微波器件性能不佳, 如电滤波器的带宽不够窄、电放大器噪声系数较大等, 很难实现高性能的高频光电振荡器。此外, 随着振荡频率的提高, 普通单模光纤的色散效应导致的功率衰落更加严重, 也使光电振荡难以稳定振荡。

目前报道的高频光电振荡器, 通常采用大带宽的光电器件。Chang D H 等采用聚合物调制器实现了 39 GHz 的光电振荡器<sup>[19]</sup>。Shin M 等基于电吸收调制器实现了 40 GHz 的光电振荡器, 其相位噪声达到  $-100$  dBc/Hz @ 10 kHz<sup>[20]</sup>。Bagnell M 等采用带宽 70 GHz 的调制器和 PD 以及高精细度的 F-P 标准具(FSR: 1.5 GHz; 精细度: 100 000)实现了最高频率达 60 GHz 的光电振荡器<sup>[21]</sup>。

提高光电振荡器输出信号频率的一种常用方法是在光电振荡中对信号进行倍频。Shin M 等利用 LiNbO<sub>3</sub> MZM 半波电压与波长的正比关系同时产生了 10 GHz 基频和 20 GHz 倍频信号<sup>[22]</sup>。Pan S 等提出一种基于偏振调制器(Polarization modulator, PolM)的倍频光电振荡器<sup>[23]</sup>。在该系统中, PolM 结合检偏器的结构等效为一个双输出的强度调制器。通过分别调节两个检偏器前的偏振控制器, 使其中一路的等效偏置在线性点并反馈到 PolM 中实现基频振荡, 而另一路等效偏置在最小传输点, 实现倍频信号输出。

### 1.5 频率调谐性

实现振荡频率可调谐的关键是光电振荡中具有可调谐的滤波机制, 可以通过电滤波器、光滤波器或者微波光子滤波器<sup>[24-25]</sup>实现。Eliyahu D 等利用 YIG 可调电滤波器实现了 6~12 GHz 可调信号的产生, 调节步长为 3 MHz<sup>[24]</sup>。由于 YIG 滤波器的带宽约为 36 MHz, 不能较好抑制边模, 所以该方案采用了三环路的结构来抑制边模, 系统较复杂。Li W 等利用基于相位调制和相移光纤光栅的微波光子滤波器实现了振荡频率的大范围可调

谐。该方案利用相移光纤光栅将相位调制转化为强度调制,再通过改变激光器波长实现振荡频率的调谐,其频率调谐范围达到  $3\sim 28\text{ GHz}^{[23]}$ 。

## 1.6 本文的工作

为了产生应用于雷达系统的高质量微波信号,作者在光电振荡器方面做了以下工作:

(1) 基于微波光子滤波器的可调谐光电振荡器。通过光注入 F-P 激光器实现宽带频率可调的光电振荡器,其调谐范围为  $6.41\sim 10.85\text{ GHz}$ ,相位噪声为  $-92.8\text{ dBc/Hz}@10\text{ kHz}$ 。该方案利用外部光注入的 F-P 激光器实现了高 Q 值的微波光子滤波器,频率调谐可以通过改变注入光波波长或改变温度实现<sup>[26]</sup>。

基于偏振调制器和啁啾光纤光栅的可调谐光电振荡器方案,实现了  $5.8\sim 11.8\text{ GHz}$  的频率调谐范围,在  $10\text{ kHz}$  处相位噪声为  $-104.56\text{ dBc/Hz}^{[27]}$ 。该系统利用偏振调制结合光纤色散构成微波光子滤波器,通过改变偏振调制光信号的偏振态可以调节微波光子滤波器的频率响应,从而实现光电振荡器的频率可调谐。

(2) 基于单个偏振调制器的可调谐四倍频光电振荡器。作者提出并实现了基于单个偏振调制器的四倍频光电振荡器,实现了频率在  $32\sim 42.7\text{ GHz}$  可调谐的毫米波信号输出<sup>[28]</sup>。

(3) 基于非泵浦掺铒光纤(Erbium-doped fiber, EDF)的高稳定耦合光电振荡器。作者提出并实现了基于非泵浦掺铒光纤的高稳定耦合光电振荡器,实验中同时产生高稳定  $10\text{ GHz}$  微波信号和光脉冲信号,相位噪声低于  $-120\text{ dBc/Hz}@10\text{ kHz}^{[29]}$ 。

(4) 基于电吸收调制激光器(Eroabsorption modulated loser, EML)的小型化光电振荡器。基于 EML 的小型化光电振荡器,采用一个 EML 即可代替传统光电振荡器中激光器、强度调制器及光电探测器 3 个器件,得到紧凑结构。实验实现了频率为  $10\text{ GHz}$ ,相噪为  $-101.31\text{ dBc/Hz}@10\text{ kHz}$  的高质量本振信号产生<sup>[30]</sup>。

## 2 线性调频信号

线性调频信号在雷达中应用广泛。由于电子技术在频率与带宽方面受到的限制,传统的直接数字频率合成技术或波形存储直读法产生线性调频信号的中心频率和带宽均仅限于数吉赫兹<sup>[31]</sup>,难

以满足高精度雷达的需求。基于微波光子技术的线性调频信号产生能突破以上限制,是雷达波形产生的重要发展趋势。近几年已有许多利用微波光子学的方法产生线性调频信号的报道,主要包括利用啁啾光脉冲拍频、频时映射方法、基于抛物线波形电光相位调制方法等。

### 2.1 啁啾光脉冲拍频方法

清华大学 Gao H 等人将光脉冲通过色散介质得到线性啁啾光脉冲信号,再将其与另一连续光波拍频得到线性调频微波信号。Gao H 等在实验中成功产生了半高全宽、带宽、时间带宽积、压缩比分别为  $3.2\text{ ns}, 33\text{ GHz}, 106, 160$  的线性调频脉冲信号<sup>[32]</sup>。以色列的 Zeitouny A 等将同一光脉冲经过啁啾率不同的两段啁啾光纤布拉格光纤得到啁啾斜率不同的两列光脉冲,经过光电探测器拍频也可以产生线性调频微波信号<sup>[33]</sup>。

### 2.2 频时映射方法

依据光谱整形结合频域-时域映射原理,也可以产生线性调频信号。加拿大渥太华大学的 Wang C 等通过在同一段光纤上制作两个交错重叠的啁啾布拉格光栅,实现了自由光谱范围(Full spectral range, FSR)随频率渐变的光滤波器。当锁模激光器产生的光脉冲经过此滤波器实现光谱整形后,利用色散光纤将光谱形状映射到时域并通过光电转换即得到线性调频微波信号。Wang C 等通过实验得到了中心频率为  $15\text{ GHz}$ ,调频斜率达到  $0.0217\text{ GHz/ps}$ ,时间带宽积为  $37.5$  的线性调频信号,实现脉冲压缩比为  $62.5^{[34]}$ 。

### 2.3 基于抛物线波形电光相位调制方法

加拿大渥太华大学的 Li W 等人报道了通过光载波移频并利用抛物线波形电信号驱动相位调制器产生线性调频信号的方案<sup>[35]</sup>,其原理如图 3 所示。激光源发出的光载波一部分经过光电振荡器,其输出为光载波的一个一阶调制边带,因而实现了光载波移频。另一路光载波首先经强度调制器调制后产生光脉冲,然后采用循环相位调制环路(Recirculating phase modulation loop, RPML)对光脉冲进行相位调制。其中相位调制器由抛物线波形驱动,因而光脉冲可实现二次相位调制,而循环相位调制环路可以增大相位调制深度。经过相位调制后的光脉冲与光电振荡器输出的光调制边带进行拍频,可以产生线性调频信号。此方案采用

光电振荡器提供微波信号,避免了使用专门的微波发生器。产生信号的中心载波决定于光电振荡器的振荡频率,可以通过调节激光器波长实现调谐。通过控制循环相位调制次数控制相位调制深度,还可以改变线性调频信号的带宽,因此这种方案具有较好的可重构性。

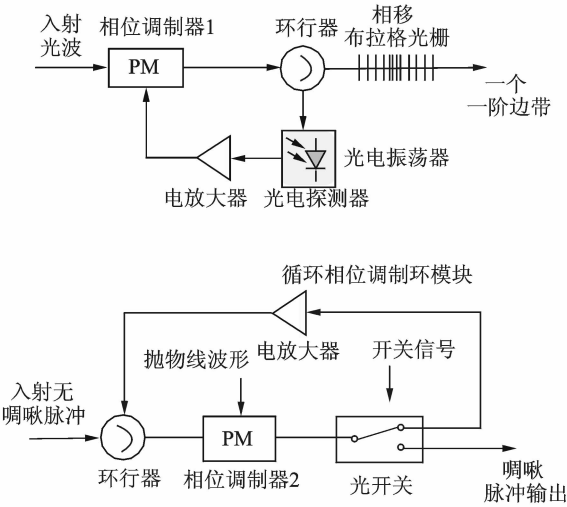
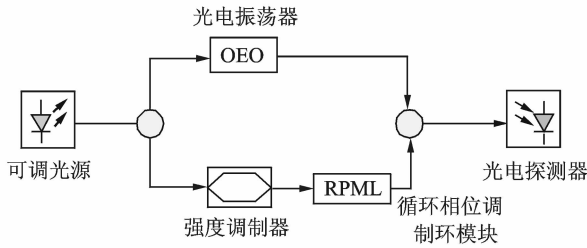


图 3 基于抛物线波形电光相位调制方法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of method based on electro-optical phase modulation driven by parabolic waveform

### 3 相位编码信号

相位编码信号也是雷达常用的发射信号。采用微波光子信号产生技术获得相位编码的微波信号<sup>[36-43]</sup>,同样能克服目前电子技术在高频与大带宽等方面受到的限制,具有非常好的应用前景。目前报道的利用微波光子技术产生相位编码信号主要包括频时映射方法、边带分离调制法、多波长调制拍频法等。

#### 3.1 频时映射方法

此方法的原理与基于频时映射产生线性调频信号类似,需要首先对光脉冲的光谱进行整形,然后通过色散介质实现频时映射,经过光电转换得到相位编码的微波信号。基于此原理,加拿大渥太华

大学 Wang C 等设计了实现系统<sup>[36]</sup>,其中的关键器件是一个空间离散的啁啾布拉格光栅(Spatially discrete chirped fiber Bragg grating, SD-CFBG)。光脉冲首先经过一个具有固定自由光谱范围的梳状光滤波器,然后通过上述空间离散的啁啾布拉格光栅,既能实现频域到时域的映射,又能实现对时域波形的相位编码。实验中得到了载波频率为 28.5 GHz 和 47.2 GHz 的相位编码信号,并实现了 7 bit 和 11 bit 的巴克码编码。这种方法避免了使用较长的色散光纤,因此系统紧凑,结构简单,但由于光栅制作成功后滤波特性固定,产生的信号不具有调谐性。

#### 3.2 边带分离调制法

边带分离法是将两个光调制边带通过特定的方式分开后对其中一个边带进行相位调制,或对两个边带进行不同的相位调制后再拍频产生相位编码的微波信号。用于分离边带的装置有偏振保持的光纤布拉格光栅(Polarization-maintaining fiber bragg grating, PM-FBG)<sup>[38]</sup>、萨格纳克(Sagnac)环状光滤波器<sup>[39]</sup>、差分群延时(Differential group delay, DGD)器件<sup>[40]</sup>、普通的光纤布拉格光栅(Fiber bragg grating, FBG)<sup>[41]</sup>等。

#### 3.3 多波长调制拍频法

对多波长光载波同时进行电光调制并拍频后,通过电滤波器滤出需要的载频成分,同样可以产生相位编码的微波信号。2013 年意大利国家光子网络实验室利用锁模激光器作为多波长光源实现了以上系统<sup>[42-43]</sup>,具体方案如图 4 所示<sup>[43]</sup>。锁模激光器产生的光信号经过光带通滤波器选出其中一部分谱线用作多波长光载波。由直接数字频率合成器(Direct digital synthesizer, DDS)产生的中频相位编码信号经电光调制器调制于多波长光载波,使每个载波都产生了调制边带。得到的信号再经过光电探测器拍频,可产生一系列具有不同载频的

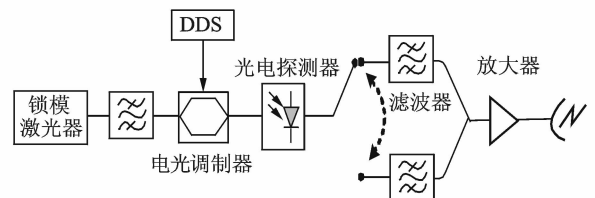


图 4 基于多波长调制拍频的相位编码信号产生原理图  
Fig. 4 Schematic diagram of phase-coded microwave signal generation based on multi-carrier modulation and beating

相位编码微波信号,通过选取不同中心频率的电滤波器进行滤波,可以得到不同载波频率的相位编码信号。意大利光子网络实验室的研究人员采用这种方法成功产生了 10 GHz 和 40 GHz 附近的相位编码信号。这种方法的优点是能产生多路不同载波的相位编码信号,对实现多功能一体化雷达具有重要意义。

### 3.4 本文的研究成果

为了产生应用于雷达系统的相位编码信号,作者所在实验室开展了以下工作:

(1)基于双驱动马赫增德尔调制器产生精确的  $0, \pi$  相位编码信号。作者提出并实现了使用一个双驱动马赫增德尔调制器(Dual-driver Mach-Zehnder modulator, DMZM)产生相位编码信号的方案<sup>[44]</sup>。DMZM 的上臂由射频信号驱动产生多个边带,下臂由编码信号驱动产生相位调制的光载波。上下两臂光信号在 DMZM 输出端合并干涉,通过控制驱动信号的幅度和调制器的直流偏置,可产生精确地  $0, \pi$  相位编码信号。实验中得到了载波频率为 10 GHz 和 20 GHz,编码速率 2 Gb/s 或 2.5 Gb/s 的微波信号,实现脉冲压缩比为 16。此系统具有结构简单,相位编码信息精确等优点。

(2)基于级联偏振调制器产生相位编码信号。作者提出利用级联偏振调制器产生相位编码信号的方案<sup>[45]</sup>,如图 5 所示。图中光源,偏振调制器 1,光带通滤波器,检偏器和光电探测器实现了微波光子移相器功能。偏振调制器 2 由编码信号驱动,用于控制进入检偏器的光信号偏振态,经光电探测器完成光电转换后可得到相位编码信号。这种方法既能实现  $0, \pi$  的二相编码,也能实现多进制相位编码。实验中成功产生了载频为 12.5 GHz 和 40 GHz 的相位编码信号,实现脉冲压缩比为 13.3。由于采用了单边带调制,此方案能抵抗光纤色散引起的功率衰减,光信号经过 8 km 光纤传输后再经光电探测器转换为微波信号,与未经光纤传

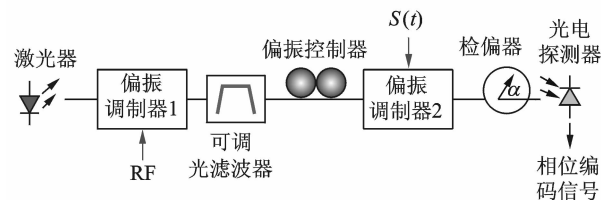


图 5 基于级联偏振调制器产生相位编码信号原理图

Fig. 5 Schematic diagram of phase-coded microwave signal generation based on cascaded polarization modulators

输情况相比功率无明显变化。

(3)基于双平行偏振调制器的相位编码产生。为了利用低频器件得到高载频相位编码信号,提出一种基于双平行偏振调制器(Dual-parallel polarization modulator, DP-PolM)的相位编码系统<sup>[46]</sup>,可实现二倍频相位编码信号的产生。双平行偏振调制器用于产生偏振态垂直的  $+1$  和  $-1$  阶边带信号。通过级联另一个偏振调制器对上述两个边带进行互补的相位调制,经过检偏器后拍频可得到相位编码微波信号。实验中使用 10 GHz 射频信号和 5 Gb/s 编码信号得到了载频为 20 GHz 的 5 Gb/s 相位编码信号,并使用 20 GHz 的和 10 Gb/s 的电编码信号得到了载频为 40 GHz 的 10 Gb/s 相位编码信号,实现脉冲压缩比为 20。

## 4 结束语

本文回顾了面向雷达应用的微波光子信号产生技术,包括基于光电振荡器的高性能本振信号产生、线性调频信号产生、相位编码信号产生。由于微波光子信号产生技术具有高载频、大宽带、低损耗、抗电磁干扰等优异性能有望在未来雷达系统得到广泛应用。

参考文献:

- [1] Skolnik M I. Introduction to radar [M]. New York: McGraw Hill Professional, 1962: 1-29.
- [2] Capmany J, Novak D. Microwave photonics combines two worlds [J]. Nature Photonics, 2007, 1(6): 319-330.
- [3] Yao J. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(3): 314-335.
- [4] Seeds A J, Williams K J. Microwave photonics [J]. Journal of Lightwave Technology, 2006, 24(12): 4628-4641.
- [5] Ghelfi P, Laghezza F, Scotti F, et al. A fully photonics-based coherent radar system [J]. Nature, 2014, 507(7492): 341-345.
- [6] McKinney J D. Technology: Photonics illuminates the future of radar [J]. Nature, 2014, 507(7492): 310-312.
- [7] Yao X S, Maleki L. Optoelectronic microwave oscillator [J]. JOSA B, 1996, 13(8): 1725-1735.
- [8] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. Phase noise of a high performance OEO and an ultra low noise floor cross-correlation microwave photonic homodyne system [C]//Frequency Control Symposium, 2008 IEEE International. [S. l.]:IEEE, 2008: 811-814.

- [9] Devgan P S, Urick V J, Diehl J F, et al. Improvement in the phase noise of a 10 GHz optoelectronic oscillator using all-photon gain [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(15): 3189-3193.
- [10] Eliyahu D, Seidel D, Maleki L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Transactions on, Microwave Theory and Techniques*, 2008, 56(2): 449-456.
- [11] Yao X S, Maleki L. Multiloop optoelectronic oscillator [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, 36(1): 79-84.
- [12] Jiang Y, Jin L Y, Wang Y T, et al. An optical domain combined dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2007, 19(11): 807-809.
- [13] Cai S, Pan S, Zhu D, et al. Coupled frequency-doubling optoelectronic oscillator based on polarization modulation and polarization multiplexing [J]. *Optics Communications*, 2012, 285(6): 1140-1143.
- [14] Shumakher E, Eisenstein G. A novel multiloop optoelectronic oscillator [J]. *Photonics Technology Letters IEEE*, 2008, 20(22): 1881-1883.
- [15] Zhou W, Blasche G. Injection-locked dual optoelectronic oscillator with ultra-low phase noise and ultra-low spurious level [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2005, 53(3): 929-933.
- [16] Ozdur I, Mandridis D, Hoghooghi N, et al. Low noise optically tunable optoelectronic oscillator with Fabry-Perot etalon [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(21): 3100-3106.
- [17] Fedderwitz S, Stohr A, Babel S, et al. Optoelectronic-band oscillator with gigahertz tuning range and low phase noise [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2010, 22(20): 1497-1499.
- [18] Yao X S, Davis L, Maleki L. Coupled optoelectronic oscillators for generating both RF signal and optical pulses [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2000, 18(1): 73.
- [19] Chang D H, Fetterman H R, Erlig H, et al. 39-GHz optoelectronic oscillator using broad-band polymer electrooptic modulator [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2002, 14(2): 191-193.
- [20] Shin M, Devgan P S, Grigoryan V S, et al. Low phase-noise 40 GHz optical pulses from a self-starting electroabsorption-modulator-based optoelectronic oscillator [C]//*Optical Fiber Communication Conference*. US: Optical Society of America, 2006: OFB1.
- [21] Bagnell M, Davila-Rodriguez J, Delfyett P. Millimeter-wave generation in an optoelectronic oscillator using an ultrahigh finesse etalon as a photonic filter [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(6): 1063-1067.
- [22] Shin M, Grigoryan V S, Kumar P. Frequency-doubling optoelectronic oscillator for generating high-frequency microwave signals with low phase noise [J]. *Electronics Letters*, 2007, 43(4): 242-244.
- [23] Pan S, Yao J. A frequency-doubling optoelectronic oscillator using a polarization modulator [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2009, 21(13): 929-931.
- [24] Eliyahu D, Maleki L. Tunable, ultra-low phase noise YIG based optoelectronic oscillator [C]//*Microwave Symposium Digest, 2003 IEEE MTT-S International*. [S.l.]: IEEE, 2003: 2185-2187.
- [25] Li W, Yao J. A wideband frequency tunable optoelectronic oscillator incorporating a tunable microwave photonic filter based on phase-modulation to intensity-modulation conversion using a phase-shifted fiber Bragg grating [J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(6): 1735-1742.
- [26] Pan S, Yao J. Wideband and frequency-tunable microwave generation using an optoelectronic oscillator incorporating a Fabry-Perot laser diode with external optical injection [J]. *Optics Letters*, 2010, 35(11): 1911-1913.
- [27] Tang Z, Pan S, Zhu D, et al. Tunable optoelectronic oscillator based on a polarization modulator and a chirped FBG [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2012, 24(17): 1487-1489.
- [28] Zhu D, Pan S, Ben D. Tunable frequency-quadrupling dual-loop optoelectronic oscillator [J]. *Photonics Technology Letters, IEEE*, 2012, 24(3): 194-196.
- [29] Cai S, Pan S, Zhu D, et al. Stabilize the coupled optoelectronic oscillator by an unpumped erbium-doped fiber [C]//*Communications and Photonics Conference (ACP)*. [S.l.]: IEEE, 2012: 1-3.
- [30] Zhou P, Pan S, Zhu D, et al. A compact optoelectronic oscillator based on an electroabsorption modulated laser [J]. *Photonics Technology Letters*, 2014, 26(1): 86-88.
- [31] Kwon H, Kang B. Linear frequency modulation of voltage-controlled oscillator using delay-line feedback [J]. *Microwave and Wireless Components Letters, IEEE*, 2005, 15(6): 431-433.
- [32] Gao H, Lei C, Chen M, et al. A simple photonic generation of linearly chirped microwave pulse with

- large time-bandwidth product and high compression ratio [J]. *Optics Express*, 2013, 21(20): 23107-23115.
- [33] Zeitouny A, Stepanov S, Levinson O, et al. Optical generation of linearly chirped microwave pulses using fiber Bragg gratings[J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2005, 17(3): 660-662.
- [34] Wang C, Yao J. Photonic generation of chirped microwave pulses using superimposed chirped fiber Bragg gratings [J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2008, 20(11): 882-884.
- [35] Li W, Yao J. 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*, IEEE, 2014, 32(20): 3573-3579.
- [36] Wang C, Yao J. Phase-coded millimeter-wave waveform generation using a spatially discrete chirped fiber Bragg grating [J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2012, 24(17): 1493-1495.
- [37] Ye J, Yan L, Chen Z, et al. Photonic generation of microwave phase-coded signals based on frequency-to-time conversion[J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2012, 24(17): 1527-1529.
- [38] Li Z, Li M, Chi H, et al. Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal with large frequency tunability using a polarization-maintaining fiber Bragg grating[J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 2011, 21(12): 694-696.
- [39] Li Z, Li W, Chi H, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signal with large frequency tunability[J]. *Photonics Technology Letters*, IEEE, 2011, 23(11): 712-714.
- [40] Chi H, Yao J. Photonic generation of phase-coded millimeter-wave signal using a polarization modulator [J]. *Microwave and Wireless Components Letters*, IEEE, 2008, 18(5): 371-373.
- [41] Jiang H Y, Yan L S, Ye J, et al. Photonic generation of phase-coded microwave signals with tunable carrier frequency [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(8): 1361-1363.
- [42] Ghelfi P, Scotti F, Laghezza F, et al. Photonic generation of phase-modulated RF signals for pulse compression techniques in coherent radars [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2012, 30(11): 1638-1644.
- [43] Ghelfi P, Scotti F, Laghezza F, et al. Phase coding of RF pulses in photonics-aided frequency-agile coherent radar systems [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2012, 48(9): 1151-1157.
- [44] Tang Z, Zhang F, Pan S. Photonic microwave down-converter based on an optoelectronic oscillator using a single dual-drive Mach-Zehnder modulator [J]. *Optics Express*, 2014, 22(1): 305-310.
- [45] Zhang Y, Pan S. Generation of phase-coded microwave signals using a polarization-modulator-based photonic microwave phase shifter [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(5): 766-768.
- [46] Liu S, Zhu D, Wei Z, et al. Photonic generation of widely tunable phase-coded microwave signal based on a dual-parallel polarization modulator[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(13): 3958-3961.

作者简介:张方正(1984-),男,讲师,研究方向:微波光子学,E-mail:zhangfangzheng@nuaa.edu.cn;潘时龙(1982-),男,教授,博士生导师,研究方向:微波光子学。



