

基于微波光子学的射频制导半实物仿真方法研究

潘时龙¹, 田 义², 刘世锋¹, 李小琳²

(1. 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 211100;

2. 上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 未来射频制导性能的高效验证对射频制导半实物仿真系统提出全新的挑战, 需要该系统具备瞬时大带宽、多波段、多仿真系统协同工作、多场景适应等能力, 进而对宽带射频信号的低损传输、幅相控制、复杂回波信号产生、高性能频综信号产生等技术提出了严苛的要求。针对基于传统微波技术的半实物仿真系统受限于带宽、体积、质量、电磁干扰等的瓶颈问题, 提出基于微波光子技术的解决方案, 利用其宽带频谱资源, 突破传统射频系统的带宽限制; 利用其并行处理特性, 提升宽带信号的处理能力, 实现多波段融合、波束间交叉互连; 利用其轻质低损特性, 减小系统体积和质量, 提升宽带信号长距离传输性能。

关键词: 射频制导; 半实物仿真系统; 微波光子学; 信号产生与传输; 幅相控制

中图分类号: TJ 765. 4 文献标志码: A

DOI: 10. 19328/j. cnki. 1006-1630. 2019. 04. 015

Microwave Photonics for Radio Frequency Guidance Semi-physical Simulation System

PAN Shilong¹, TIAN Yi², LIU Shifeng¹, LI Xiaolin²

(1. Key Laboratory of Radar Imaging and Microwave Photonics, Ministry of Education, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211100, Jiangsu, China;

2. Shanghai Electro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Performance verification of future high-precision radio frequency guidance system demands for large instantaneous bandwidth, multi-band operation capability, co-operation among different simulation systems and multi-scenario adaptability, creating new challenges to the simulation systems. Technical requirements of low-loss transmission of broadband RF signals, accurate amplitude-phase control, complex echo signal generation, and high-performance frequency synthesis are in urgent need. In order to overcome the limitations of the traditional RF-based semi-physical simulation systems in bandwidth, volume, weight and electro-magnetic interference, etc., this paper proposes a novel solution based on the microwave photonic technologies by using the huge photonic spectral resource to break through the bandwidth bottleneck of the traditional RF systems, using the photonic parallel signal processing to enable the capability of processing broadband microwave signal and realize multiple functionalities like multi-band fusion and cross-beam interconnection, using the low-loss transmission and lightweight of optical devices to reduce the volume and mass, and to implement long-haul transmission of wideband signals.

Keywords: radio frequency guidance; semi-physical simulation system; microwave photonics; signal generation; amplitude-phase control

0 引言

随着隐身^[1-2]、干扰^[3-5]等技术的发展, 作战目标越来越难以被辨别, 迫使射频精确制导武器不断迭

代升级。目前, 合成孔径成像^[1,6-7]、相控阵^[8-11]等技术已应用到射频制导系统中, 使制导系统的分辨率得到了提升, 制导系统获取的目标信息也更加丰

收稿日期: 2019-05-15; 修回日期: 2019-07-02

基金项目: 国家自然科学基金(61527820); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(NC2018005); 江苏省 333 项目(BRA2018042)

作者简介: 潘时龙(1982—), 男, 博士, 主要研究方向为基于微波光子技术的新体制雷达、无线通信、测量系统和集成微波光子学等。

富^[9-16]。为了验证射频精确制导系统的设计,需进行大量复杂的射频制导半实物仿真试验^[17-18]。针对新型射频制导半实物仿真验证需求,新一代射频制导半实物仿真系统需要具备瞬时大带宽仿真、多波段仿真、多仿真系统协同工作等能力。但在传统微波技术框架下,射频制导半实物仿真系统在宽带信号的低损耗传输、高精度幅相控制、实时复杂回波产生以及高性能可调谐本振信号产生等方面受到电子瓶颈限制,难以进一步提升。微波光子技术融合了微波技术和光子技术,将宽带微波信号在光域进行产生、传输与处理。光子系统中光波频率达到数百太赫兹且波长资源丰富,可承载较大带宽的微波信号且具有强大的并行处理能力。因此,基于微波光子技术可实现射频制导半实物仿真系统对多波段、大带宽信号处理的需求。此外,微波光子技术采用质量轻、损耗小的光纤作为传输介质,可减小半实物仿真系统体积,降低其传输链路的质量和功耗,且具有良好的抗干扰性能。因此,本文将探讨基于微波光子技术的解决思路,为新一代射频制导半实物仿真系统的研制和研发提供新的思路。

1 射频制导半实物仿真系统架构

1.1 半实物仿真系统基本架构

半实物仿真系统的基本架构如图 1 所示,其整体架构应围绕参试制导控制系统的仿真验证需求进行设计。参试的制导控制系统包括 3 个子系统,分别是导引头、制导指令形成装置、舵系统。射频目标模拟系统用于物理模拟目标的电磁辐射和运动特性,为制导控制系统提供目标散射或辐射特性 E_R 和失调角 (ϵ_h, ϵ_v) 的物理模拟^[18]。飞行姿态模拟系统为射频制导系统提供弹体姿态信息 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z, \theta, \psi, \gamma)$ 的物理模拟,其中 θ, ψ, γ 和 $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ 分别是绕 x, y, z 轴的转动角及角速度。负载力矩模拟系统,为舵系统提供负载力矩 (M_y, M_z) 的物理模拟。实时仿真控制系统主要包括仿真模型解算模块,用于实时解算弹体模型、弹目相对运动模型等数学模型。对于完整的射频制导半实物仿真系统,还包括仿真控制管理、实时通信网络、控制接口、数据采集记录等模块。

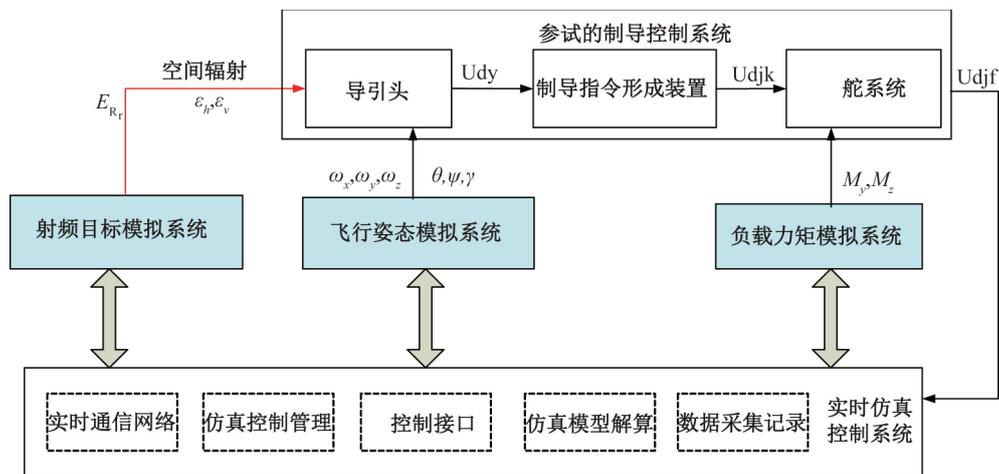


图 1 半实物仿真系统基本架构

Fig. 1 Basic structure of the semi-physical simulation system

1.2 目标模拟系统基本架构

在整个射频制导半实物仿真系统中,射频目标模拟系统是核心。对于不同体制的射频制导系统,要求目标能按照射频制导系统的工作模式精确模拟目标的回波信号。回波信号应包括目标电磁散射或反射特性,以及距离、位置信息等。图 2 给出了射频目标模拟系统的基本架构。由图可见:配置信息输入来自于实时仿真控制系统的模型解算,输出是模

拟的回波电磁辐射。

射频系统需要在吸波暗室环境中运行,吸波暗室实质上是射频辐射系统的一部分。

射频目标模拟系统可抽象为 4 大模块:信号产生系统、信号传输系统、角位置控制系统、射频辐射系统。信号产生系统根据所要模拟的目标类型和参试制导控制系统的信号体制,按照输入实时生成或回放回波信号,主要包含回波的频域和时域信息。

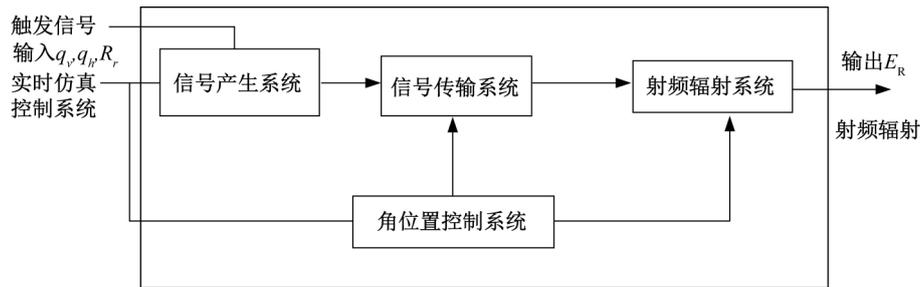


图 2 射频目标模拟系统

Fig. 2 Schematic of the RF target simulation system

信号生成后经过波导、同轴电缆等信号传输系统,以及如隔离器、放大器等有源无源器件,将信号发送给射频辐射系统。为了保证空间辐射信号低失真地传输到导引头,一般情况下射频制导半实物仿真系统中射频目标模拟系统架构根据角位置控制系统的实现方式分为“电控式”^[19-20]和“机械式”^[21]。典型的“电控式”目标模拟系统采用天线阵列来模拟目标辐射的空间角位置。“机械式”目标模拟系统的角位置

控制由机械导轨或多层机械阵带动单个天线或小规模天线阵列运动来实现。

1.3 回波信号产生系统基本架构

回波信号产生是目标模拟系统的核心功能之一。无论是主动体制还是被动体制,其信号产生系统的基本架构一致,基本原理结构如图 3 所示。

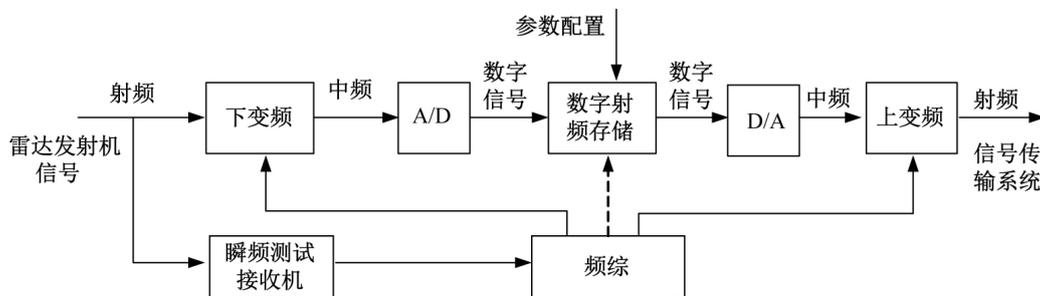


图 3 回波信号产生系统

Fig. 3 Generation system of the RF echo signal

对于主动式制导系统,输入的射频信号经过下变频至中频,即从射频信号中抽取基带信号,经过高速 A/D 采样将数字信号传至数字射频存储模块,数字射频存储模块一般由 FPGA 和 DSP 联合对数字信号进行处理,根据参数配置信息如弹目距离、当前目标姿态等,将目标的回波特性加载到数字信号中,完成对回波数字信号的脉冲调制、载频调制、脉内调制、幅度调制等。将数字信号通过 D/A 转换为中频信号,再上变频成射频信号输出到信号传输系统。其中,对于捷变频雷达或跳频雷达发射机的信号需要瞬频测试接收机实时测量的频率,再由频综提供多个本振信号作为混频的基准。

2 射频制导半实物仿真关键技术

2.1 动稳定宽带射频信号低损耗传输

当目标模拟系统采用动态架构时,从信号产生系统产生的复杂信号上传到高速运动的二维导轨或框架上,要求传输媒介具备以下特点:动态范围,传输带宽足够大,射频信号传输损耗足够小;为线性系统,降低信号非线性畸变,能保证信号的低失真;足够柔软,能跟随导轨运动而弯曲;支持高速大范围运动,能适应振动环境;对外界电磁信号的屏蔽性好。而当前的宽带射频信号传输媒介采用半柔性同轴电缆或波导,存在无法弯曲、无法适应运动环境、射频信号损耗大的特点。当多套射频制导半实物仿真系

统协同工作时,要求射频信号需要在多个分布式半实物仿真系统之间低延时、低损耗传输,传输距离可能达几千米,传统的射频传输模式也无法适用。由此可见,动稳定宽带射频信号的远距传输已成为制约当前射频目标模拟系统进一步发展的瓶颈。

2.2 瞬时大带宽射频信号幅相精确控制

当前的射频器件例如移相器和衰减器瞬时工作带宽较窄(校准后的带宽约为 300 MHz)。对于固态式目标模拟系统,当三元组工作时,需要保证三元组的幅度相位的一致性,而传统的移相器只能保证在个别频点或很窄的带宽内的相位一致性,而在宽频段范围内,则需要通过特定的手段补偿三元组之间不同频点相位的差别。此外无论是衰减控制还是延时控制,都希望保证幅频和相频特性独立可调,这样才能够精确控制辐射中心的移动,否则会出现幅度和相位控制的耦合,导致控制复杂度的提升,甚至会带来控制盲区。因此,瞬时大带宽信号的精确幅相控制是传统移相器和衰减器无法实现的,急需新技术、新途径。

2.3 复杂宽带毫米波/亚毫米波回波信号高速实时生成

回波信号生成的前提是低失真地提取雷达发射机信号,在提取过程中一般需要将射频信号下变频,使之与当前 AD 转换和数字射频存储模块的处理速度匹配。考虑到这种信号提取,复杂宽带毫米波/亚毫米波回波信号高速实时生成具有以下难点:1)由于传统 AD 转换的采样率瓶颈,很难对毫米波或亚毫米波信号直接进行高速 AD 转换,而这必然会丢失部分发射机的信息;2)当前国内外数字射频存储的瞬时带宽一般不超过 2 GHz,即使将发射机的信号进行下变频,宽带的中频信号也难以得到处理;3)在半实物仿真系统中,需要实时将复杂的目标特性加载到发射信号上,这对任意波形生成能力提出了极高要求。因此,需要新的技术途径来实现雷达发射机信号的高保真提取,完成对其高速高精度处理,从而逼真模拟出目标的回波信息。

2.4 高速连续可调高 Q 值射频本振生成

对于半实物仿真系统作为测试和验证手段,理论上其精度应当远高于被测设备(各种体制雷达)的信号品质,尤其是本振的信号品质主要决定了系统

的信号品质。当前信号产生系统的本振一般采用石英晶振,虽然能获得高 Q 值的稳定振荡,但是无法直接获得高频本振(例如亚毫米波、太赫兹波段),必须通过分频、倍频、混频、功率放大等手段,由于在多个环节引入噪声,导致信号品质急剧下降。

3 基于微波光子学的解决思路

基于传统微波技术的射频制导半实物仿真系统面临着 4 个重要限制因素:1)在传输方面,同轴电缆对高频宽带射频信号的传输损耗大、传输距离短、质量体积大,难以满足半实物仿真系统中运动环境以及不同仿真系统间长距离传输的需求;2)在幅相控制方面,传统微波器件处理带宽小且幅相耦合严重;3)在回波信号产生方面,电 ADC 采样速率低,射频存储瞬时带宽小,任意波形生成难度大;4)在本振信号产生方面,高频本振相位噪声恶化,品质下降严重。针对这些技术问题,微波光子学有望从低损耗线性化宽带微波光子链路、基于圆偏振光波长对的微波光子幅相控制技术、微波光子信道化接收与频带映射任意波形信号产生技术、低相位噪声光电振荡器及其频率综合技术等方面提供新的解决思路,接下来对这些技术进行详细阐述。

3.1 微波光子传输链路及稳相传输技术

在射频制导半实物仿真系统中,宽带、线性、大动态、抗弯曲,以及抗震的链路传输系统成为迫切需求。光缆与电缆性能对比见表 1。由表可见,微波光子链路的优势体现在光纤的低损耗和大带宽。但是由于电光/光电转换会引入噪声和非线性失真,所以要想获得高保真传输,模拟光链路还需进行线性化,并采取措施降低噪声的影响。

表 1 光缆与电缆对比

Tab. 1 Comparison of the optical cable and the electrical cable

类型	光缆	电缆
带宽	30 THz	<10 GHz
插损/(dB·km ⁻¹)	0.2	1.860
每千米质量/kg	0.073	300
电磁干扰	抗电磁干扰	易受电磁干扰
寿命/a	>40	20
使用环境	不易被化学腐蚀	易被化学腐蚀

光子链路的非线性主要由电光调制器引起,主

要包括二阶谐波、三阶交调与五阶交调引起的非线性。为了消除微波光子链路的非线性,并提高系统的动态范围,多种线性化方法被提出。这些方法主要分为两类:一类是电域线性化;另一类是光域线性化。光域线性化技术由于没有电子器件带宽瓶颈,相比电域线性化技术得到了更广泛的研究。光域线性化技术主要是通过设计、组合系统各种复杂的调制结构,使调制过程产生的非线性失真互相抵消,或在光谱中分析系统非线性失真的产生根源,并采取

相应的处理手段消除失真分量的产生,在光域中实现模拟光链路系统的线性化。该技术主要包括基于光边带抑制的线性化技术^[22-24]、低偏置技术^[25]、基于非线性失真抵消的线性化技术^[26-35],表 2 对这几种典型的线性化技术进行了综合比较。由表可见,针对射频制导半实物仿真系统的宽带、高线性度与大动态范围的性能需求,基于非线性失真抵消的线性化链路技术更加适用于射频制导半实物仿真系统。

表 2 典型线性化技术的性能比较

Tab. 2 Comparison of the linearity technologies for analog photonic links

典型线性化技术	优势	劣势
预失真电路线性化技术	系统结构简单、自适应性较强、成本低	工作带宽受限、线性化手段仍不够完善
数字信号后处理线性化技术	系统灵活性较大、硬件复杂度较低	工作带宽受限、主要针对窄带信号
基于光边带抑制的线性化技术	结构简单	不适用于多倍频程的宽带模拟光链路
基于非线性失真抵消的线性化技术	原理较简单、结构灵活、系统线性化程度较高、SFDR 较大	需精确控制链路系统的光功率比、射频功率比及调制器的偏置点等
低偏置技术	结构简单	引入二次谐波和二阶交调失真

此外,在多套射频制导半实物仿真系统协同工作时,需要对高频微波信号进行分布式传输,且保持各通道中传输信号的相位稳定性,即实现射频信号的稳相传输。目前,常见的光纤射频信号稳相传输方法分为两类:一类是基于锁相环的主动式稳相技术^[36],基本原理是构建一个锁相环使得传输后信号的相位一直保持稳定;另一类是基于混频的被动稳

相技术^[37],基本原理是将两路带有相同传输相位延时的信号混频以消除相位抖动。

表 3 是 2017—2018 年部分单位所实现的微波光子链路性能对比。由表可见,射频制导半实物仿真系统中宽带、高线性、大动态、高稳定等问题有望用微波光子技术来解决。

表 3 光子链路性能对比

Tab. 3 Performance comparison of different optical links

单位	发表年份	动态范围	增益/衰减	工作带宽	噪声系数
弗吉尼亚大学 Beling 课题组 ^[30]	2017	—	15 dB	0~10 GHz	16 dB
马萨诸塞大学 ^[31]	2018	104.8 dB·Hz ^{2/3}	—	1~10 GHz	—
上海交通大学 ^[32]	2017	126.4 dB·Hz ^{2/3}	—	0~32 MHz	—
华中科技大学 ^[33]	2017	SFDR ₂ :95.4 dB·Hz ^{1/2} ; SFDR ₃ :103.8 dB·Hz ^{2/3}	—	0.5~6.0 GHz	—
中国空间技术研究院/西北工业大学 ^[34]	2018	SFDR ₂ :91 dB·Hz ^{1/2} ; SFDR ₃ :116 dB·Hz ^{2/3}	—	6~40 GHz	—
西北工业大学、西安电子科技大学 ^[35]	2017	SFDR ₂ :98.2 dB·Hz ^{1/2} ; SFDR ₃ :109 dB·Hz ^{2/3}	-15 dB	2~30 GHz	33 dB
南京航空航天大学 ^[24]	2017	SFDR ₃ :102 dB·Hz ^{2/3}	—	6~40 GHz	—

3.2 微波光子幅相控制技术

射频制导半实物仿真系统中需要对宽带微波信

号进行无耦合、高精度幅相控制。微波光子幅相操控技术是用光的方法控制微波信号的幅度和相位,

由于幅度可以通过简单放大或衰减控制,且当前商用的光衰减器可达到 0.1 dB 调控精度,光学带宽 $> 100 \text{ nm}$ (对应射频带宽 12.5 THz)的性能,可以满足当前应用需求,因此对微波信号相位的无幅相耦合与高速操控是当前急需解决的关键问题。

微波光子移相技术一般将微波信号经过电光转换调制到光信号上,通过光控移相方法控制信号的相位后经光电探测器转换成微波信号,实现微波信号相位的控制。根据微波光子移相的实现方法,现有的微波光子移相机理可大致分为以下 4 类:1) 基于慢光效应的微波光子移相技术^[38-42];2) 基于光矢量和的微波光子移相技术^[43-44];3) 基于外差混频的微波光子移相技术^[45-46];4) 基于正交圆偏振光波对的光子移相技术。南京航空航天大学提出了一种基于正交圆偏振光波长对的微波光子移相技术,如图 4 所示。

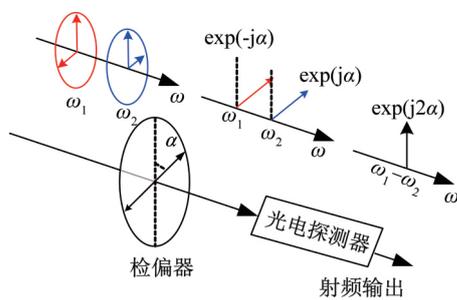


图 4 基于圆偏振光波长对的微波光子移相原理

Fig. 4 Principle of the microwave photonic shifter based on a pair of circularly-polarized wavelengths

由图可见,基于正交圆偏振光波长对的微波光子移相技术的基本原理是:通过将一对旋转方向相反的圆偏振光信号通过检偏器检偏后经光电探测器转换到微波域,所产生微波信号的幅度恒定、相位与检偏角成正比^[47-49]。该方法具有以下优点:

1) 幅相无耦合

由于圆偏振光经过检偏器后,随着检偏器检偏角度的变化,光信号强度不变,相移发生线性改变,从而突破了 Kramers-Kronig 关系的限制。

2) 工作带宽大

上述系统的工作带宽主要受限于光电器件的工作带宽,实验中得到了 10~40 GHz 范围内,0~360°可连续调谐的相移。通过操控光谱可以实现微波光子 2 倍频、4 倍频、8 倍频信号的相移,理论带宽可达 1.7~184 GHz。

3) 响应平坦

在系统的工作频段内具有平坦的相频响应和幅频响应。

4) 多路拓展性好

由于该方案中信号的相移通过调节检偏器的检偏角度控制,若是将圆偏振光波长对分成多路,每一路使用一个检偏器控制信号的相位,则可以实现多路独立可控的微波光子移相。

5) 调相速度快

系统中所用的检偏器可由电控检偏器取代,例如可通过高速偏振调制取代,调相速度高达 40 Gbit/s。

综上所述,基于偏振调制的微波光子移相技术可有效克服 Kramers-Kronig 关系引入的幅相耦合问题,具有带宽大、0~360°连续可调谐、响应平坦、多路拓展性良好、调谐速度快等优势,有望成为应用于射频制导半实物仿真系统最有效的微波光子移相技术。

3.3 微波光子宽带射频信号产生技术

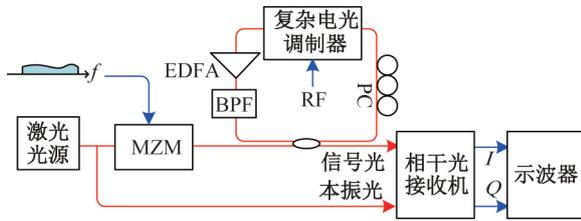
射频制导半实物仿真系统中的复杂宽带回波高速实时生成包含两部分:一是宽带雷达发射机信号的提取和处理;二是携带复杂目标散射特性的微波信号产生。针对复杂宽带雷达发射机信号的提取和处理,解决方法主要是基于微波光子技术的信道化接收。该方法的特点在于利用光的宽带承载特点,将复杂宽带雷达发射机信号直接转换到光域。利用微波光子下变频技术,将宽带的接收信号信道化成窄带信号,满足后端 AD 采样的需求,从而提高信息提取和处理速度。

目前常见的信道化方法主要分为 2 类:

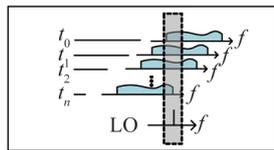
1) 基于“参数扫描+宽带混频”扫描式信道化接收机方案^[50-52]

图 5 给出了基于“光载射频信号扫描”的宽带接收机及其工作模式。从图 5(a)可以看出,激光器输出的连续波光信号分成两路。其中一路通过电光调制加载天线接收的宽带信号并送入循环移频模块。移频模块包含载波抑制单边带调制器、掺铒光纤放大器和带通滤波器等。移频后的信号与另一路纯净的光载波信号(光本振)通过相干接收机实现下变频接收。从图 5(b)可以看出,调制的光微波信号经过移频模块后每循环一次信号在频谱上将移动一定频率。由于光本振在每个循环时刻将对准不同的频率

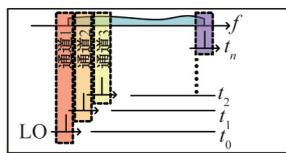
分量,所以每次通过与光本振混频至基带的是接收信号中不同频率处的频谱分量,如图 5(c)所示,从而实现扫描接收。



(a) 扫描式宽带接收机原理图



(b) Burst模式



(c) 连续模式

图 5 基于循环移频的扫描式宽带接收机原理图及其工作模式

Fig. 5 Wideband scanning RF receiver based on FRS Loop

2) “多频本振+宽带混频”的并行式信道化接收方式^[53-55]

利用同时产生的上百个光微波载频形成“本振池”,对输入的多频微波信号同时变频至多个通道,然后采用可编程光滤波器选择想要的变频分量(1个或多个),最后进行光子辅助的信道化接收。该方法真正发挥了光子技术宽带承载能力和并行工作能力,可在 1 套系统里实现多个频率和超大带宽信号的同时信道化接收,具有可重构性好和通用性强的优势,图 6 为典型的基于相干双光频梳的信道化接收机原理图^[54]。值得说明的是,该方案由于光电探测得到的电流正比于输入光场的平方,处于光本振两侧的频谱分量在光电探测后将会混叠在一起,产生镜频干扰。这些干扰无法通过滤波去除,因此无法直接得到接收信号中的有用信息。该问题在多频信号与多频本振同时进行混频时尤为突出和严重。因此,研究人员提出了基于数字 I/Q 解调技术^[55]和模拟镜频抑制混频^[56]的光子信道化接收,通过数字/模拟信号处理技术,将原本交织在一起的信号重新分离开,从而提取出有用信息。

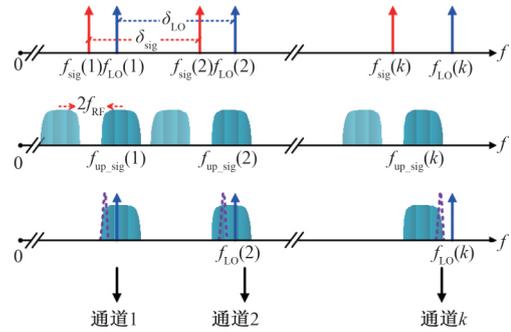


图 6 基于相干双光频梳的信道化接收机原理

Fig. 6 Channelized receiver based on coherent optical combs

针对复杂宽带毫米波/亚毫米波回波信号生成,微波光子学的实现方法主要是通过采用一系列整形方法,对光脉冲在幅度、相位、延时、频谱等维度上进行精确操纵,然后通过不同的映射机制,将整形后的信号映射至时域,得到目标的时域波形信号。目前利用微波光子技术实现复杂宽带波形信号产生的方法主要有以下几种:1)直接空时脉冲映射技术^[57-58];2)时间域脉冲整形技术^[59];3)频率时间映射技术。前 2 种技术仍存在器件设计加工难度大、系统框架复杂、信号精准度很难保证等问题,难以实用化。第 3 种技术的频时映射也被称为实时傅里叶变换,可以类比于空间光的近场衍射原理或者时间域的超短脉冲色散机制,相比于前 2 种技术结构简单,具有更高的可靠性。

图 7(a)给出了基于频时映射实现任意波形产生的结构框图。该系统包含 1 个脉冲源、1 个光频谱滤波器(也称频谱整形器)、1 个色散器件和 1 个光电探测器。光脉冲源产生 1 个超短的脉冲信号,其在频谱上表现为一个宽谱的光信号。通过对光频谱滤波器的编程控制,实现对光脉冲频谱形状的编辑。经过频谱整形的光脉冲信号经过色散介质和光电探测后,光信号频谱的形状将映射至时域,即最终产生信号的时域波形与脉冲整形后的光谱形状完全相同。因此,通过对光脉冲形状的灵活操作和整形(即对光频谱滤波器的灵活编程控制)即可实现任意时域波形的微波信号。图 7(b)给出了频时映射的原理示意图。通常情况下,光脉冲整形器可以通过商用的可编程光滤波器^[60]、基于空间器件(如液晶)的空间光调制器^[61]、光纤布拉格光栅^[62]、硅基集成的波导光纤布拉格光栅^[63]、硅基集成的微环阵列^[64]等来实现。

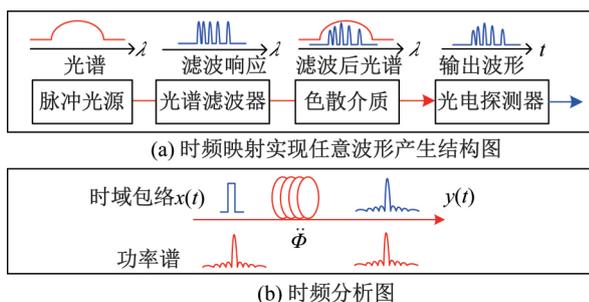


图 7 基于频时映射实现任意波形信号产生结构图与时频分析图

Fig. 7 Schematic of the arbitrary signal generation based on frequency-to-time mapping

结合以上 2 种技术,采用基于微波光子混频的信道化接收技术对宽带的雷达信号进行接收及处理,随后将回波信号作为频谱整形单元的控制信号,利用微波光子宽带任意波形产生技术,实现复杂宽带毫米波/亚毫米波回波信号的实时生成。

3.4 基于微波光子的射频本振产生技术

本振信号是半实物仿真系统中的核心部件,其射频性能直接决定着系统的信号品质。由于射频半实物仿真系统需要具备多种体制雷达的测试与验证适应性,其射频性能需要远高于被测设备,因而对本振信号的频谱纯度、可调谐性能提出了极高的要求。目前,半实物仿真系统中本振信号主要基于频率综合技术产生。现有的频率综合技术主要包括直接模拟频率合成、直接数字频率合成和锁相式频率合成^[65],它们具有不同的优缺点,但其具有共同特征,

即都需要标准频率源作为参考且标准频率源直接决定着输出信号的性能。因此要获得高性能的频率综合器,必须首先具有高频率稳定性和低相位噪声的标准参考频率源。

目前常用作标准频率源的微波振荡器,如 TCXO,OCXO 等自身的振荡频率较低,通常为 100 MHz 左右,再通过利用倍频的方式产生高频信号时,相位噪声会按照 $20 \lg N$ 的规律恶化,其中 N 为倍频因子。相对于传统微波技术的局限性,光子技术具有低噪声、低损耗和大带宽的关键优势,因此通过光子技术实现高性能标准参考源已获得人们的广泛重视^[66]。光电振荡器^[67-68]作为其中一种具有实用化前景的关键技术,能够输出高频、超低相位噪声、稳定的参考信号,主要由光源、电光调制器、高 Q 光储能单元(或一定长度的光纤)、光电探测器、带通滤波器、微波放大器、移相器、微波耦合器等组成,并正反馈回路,其基本结构如图 8(a)所示。光电振荡器利用马赫曾德尔调制器(MZM)以及光纤低损耗的特性将连续光变为稳定的、频谱纯净的微波信号。振荡的能量来自于 MZM 前的光载波,光载波经过电光调制后生成调制光信号,该光信号在光电探测器中转化成电信号,再经过放大与窄带滤波后,一部分用于输出,另一部分反馈入 MZM 的射频输入端口,完成一次循环过程。这样不断循环,最终形成稳定的振荡。光电振荡器可在其原理本质上产生数兆赫兹到数百吉赫兹的高性能射频信号,其相位噪声在理论上甚至可以接近量子极限(-163 dBc/Hz),是一种理想的微波振荡器^[69],其结果如图 8(b)所示。

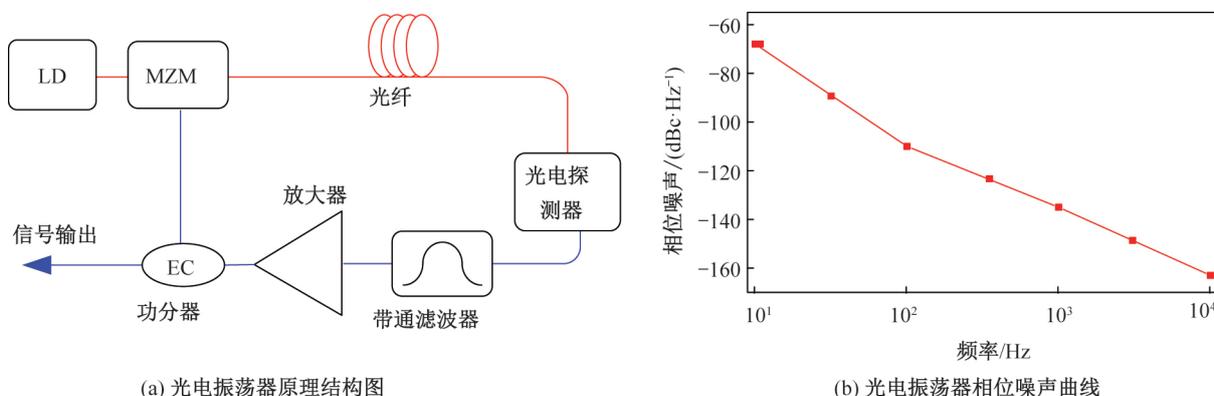


图 8 光电振荡器原理结构图及其相位噪声

Fig. 8 Schematic of optoelectronic oscillator and its phase noise

光电振荡器能输出高质量单频信号,但无法满足仿真系统对宽带可调谐本振的需求。为产生大带宽、高速可调谐的本振信号,人们提出了以 OEO 输出的高频率、低相噪的微波信号源为标准频率源,利用特殊设计的微波链路实现微波频率综合,其频率稳定度、相位噪声等性能明显优于传统基于晶体振荡器的频率综合器^[70],对应的原理结构如图 9 所示。

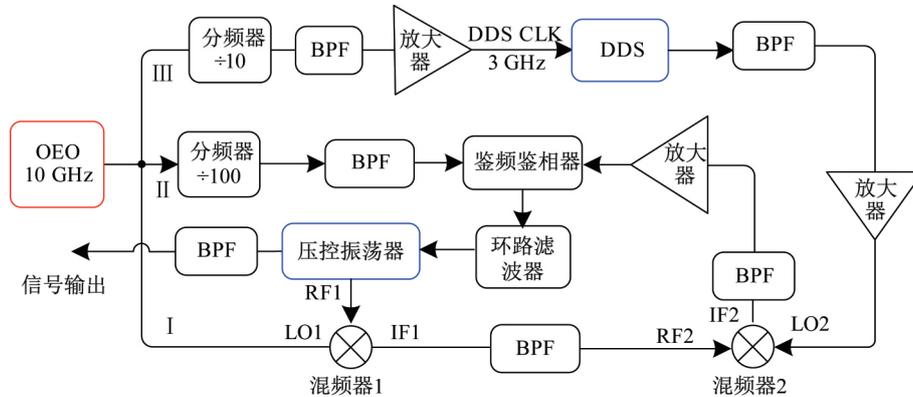


图 9 基于光电振荡技术的频率综合器原理结构

Fig. 9 Frequency synthesizer based on optoelectronic oscillator

该系统工作的大致流程如下:光电振荡器输出低相位噪声本振信号,通过功分器分成 I、II、III 三路信号。其中,I 路信号经过一个下变频混频器 1,直接与来自压控振荡器的信号混频得到中频信号 IF1;III 路信号经过 10 分频器后,由带通滤波器滤出分频后的次谐波分量,作为直接数字频率合成器(DDS)的时钟信号。DDS 输出信号经过混频器 2 与中频信号 IF1 混频后,再由带通滤波器滤出频率为 100 MHz 的中频信号 IF2;II 路信号通过 100 分频器,由带通滤波器滤出 100 MHz 的鉴频鉴相器的参考信号,并与反馈信号 IF2 鉴频鉴相,相位误差信号经环路滤波器转化成电压误差信号,反馈控制压控振荡器。当锁相环路达到稳定时,就可以得到与光电振荡器相位锁定的输出信号。此时通过调节直接数字频率合成器的输出频率,就可以获得一个宽带的压控振荡器信号输出,而直接频率综合器的频率步进就是压控振荡器的频率步进,其相位噪声结果如图 10 所示。该方案采用了混频器内插锁相环技术,降低了分频系数,不但能很好改善环路带宽内的相位噪声,而且能很好抑制环路带宽内直接频率合成器输出的杂散信号和混频后的交调分量。

为进一步拓展频率综合器的输出频率范围,将 DDS 输出信号与 III 路的输出的高阶次谐波分量进行混频,提升进入混频器 2 的 LO 端输入频率,经过变频锁相后可将频率综合器的输出范围成倍提升,从而满足半实物仿真系统对高频、宽带、高性能本振信号的需求。此外,由于 DDS 具有极快的调频时间,因此该系统频率调谐速度可到微秒级。

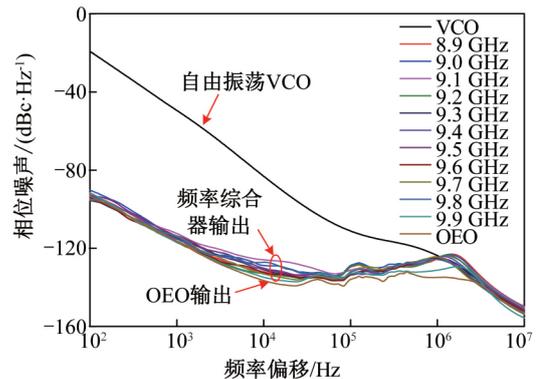


图 10 基于光电振荡技术的频率综合器相位噪声图

Fig. 10 Phase noise of the frequency synthesizer based on optoelectronic oscillator

4 结论

针对射频制导半实物仿真系统中在多波段、大带宽、多仿真系统协同工作情况下遇到的关键问题进行了分析。基于传统微波技术的半实物仿真系统面临从信号产生、控制、处理到传输等多项瓶颈问题。为此,结合微波光子技术在宽带、低损耗、低噪声等优势,分析了基于微波光子的高性能链路传输技术、稳相传输技术、无耦合幅相控制技术、微波光

子回波产生技术及其处理、高性能本振产生技术等,为射频制导半实物仿真系统的破局提供了新的思路 and 解决途径。

值得注意的是,为了实现基于微波光子技术的先进射频制导半实物仿真系统,需要将多项微波光子关键技术进行融合,并解决其中各关键组件的设计、集成、封装与测试问题。

随着微波光子集成技术的进一步发展,所提出的微波光子技术正快速朝小型化、集成化、低功耗方向发展,必将为新一代射频半实物仿真系统提供有力的支撑。

参考文献

- [1] 韩昊鹏,张晨新,刘铭,等. 典型隐身目标 SAR 仿真与检测[J]. 火力与指挥控制, 2018, 43(9): 83-85, 88.
- [2] 孙中浩. 飞秒等离子体丝阵列电磁波隐身效应研究[D]. 南京:南京理工大学, 2018.
- [3] 齐长兴,毕义明,李勇. 弹道导弹突防面临的电磁威胁及对策[J]. 飞航导弹, 2017, 1(12): 15-17.
- [4] 斗计华,吴硕. 复杂电磁环境对防空导弹警戒雷达探测影响模型研究[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(8): 187-189, 197.
- [5] 张振伍,康一丁,陈飞. 关于电磁干扰环境构建问题的思考[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(1): 26-31.
- [6] 徐建城,吴华兴,黄伟. 弹载 SAR 末制导段轨迹控制算法[J]. 系统工程与电子技术, 2016, 38(9): 2115-2121.
- [7] 高峰,卜奎晨,廖洪昌,等. 基于前斜 SAR 成像导引头的末制导律研究[J]. 战术导弹技术, 2017, 15(5): 78-83.
- [8] 王虎军. 弹载相控阵雷达导引头热控设计研究[J]. 机械与电子, 2018, 36(6): 37-40.
- [9] 徐记伟. 毫米波导引头抗干扰技术研究[J]. 飞航导弹, 2016, 31(6): 80-83.
- [10] 刘博. 毫米波相控阵天线雷达导引头技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2018.
- [11] 杨爱平,刘军,陈勇. 有源相控阵末制导导引头干扰技术[J]. 舰船电子对抗, 2018, 41(4): 15-17, 21.
- [12] 曹瀚元,董受全,隋先辉. 雨天毫米波制导导弹打击岛礁区水面目标研究[J]. 指挥控制与仿真, 2016, 38(4): 39-43.
- [13] 邵长兴,孙玄,张迪,等. 主辅拦截器协同制导方法研究[J]. 上海航天, 2018, 35(3): 95-100.
- [14] 徐胜利,张迪,赵宏宇. 基于体系对抗的多弹协同制导技术研究[J]. 战术导弹技术, 2019, 8(1): 79-86.
- [15] 张曦,水涌涛,刘涛,等. 具有高可靠性弹间通讯的多弹协同打击制导策略[J]. 战术导弹技术, 2019(1): 94-99.
- [16] 徐国训,梁晓龙,张佳强,等. 双机空空导弹协同攻击区仿真研究[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(1): 34-39.
- [17] 袁丹,原树兴,黄柱明,等. 射频制导仿真系统关键技术[J]. 火力与指挥控制, 2015, 40(1): 108-111, 117.
- [18] 张励. 先进防空导弹武器系统综合仿真技术研究[J]. 空天防御, 2018, 1(1): 36-43.
- [19] 刘宇,李亭,顾振杰. 阵列式射频仿真系统中目标全极化回波模拟方法研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 11(1): 33-38.
- [20] 刘宇,顾振杰. 阵列式射频仿真系统中目标特性仿真与实现[J]. 火控雷达技术, 2013, 42(3): 52-56, 65.
- [21] 张翔,崔潇潇,王洋,等. 基于机电混合式目标模拟的雷达制导半实物仿真关键技术[J]. 弹箭与制导学报, 2015, 35(4): 39-42, 89.
- [22] CUI Y, DAI Y, YIN F, et al. Intermodulation distortion suppression for intensity-modulated analog fiber-optic link incorporating optical carrier band processing[J]. Optics Express, 2013, 21(20): 23433-23440.
- [23] LI J, ZHANG Y C, YU S, et al. Optical sideband processing approach for highly linear phase-modulation/direct-detection microwave photonic link[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1-10.
- [24] ZHU D, CHEN J, PAN S. Linearized phase-modulated analog photonic link with the dispersion-induced power fading effect suppressed based on optical carrier band processing[J]. Optics Express, 2017, 25(9): 10397-10404.
- [25] MENG X J, KARIM A. Microwave photonic link with carrier suppression for increased dynamic range[J]. Fiber and Integrated Optics, 2006, 25(3): 161-174.
- [26] KOROTKY S K, DE RIDDER R M. Dual parallel modulation schemes for low-distortion analog optical transmission[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 1990, 8(7): 1377-1381.
- [27] HUANG M, FU J, PAN S. Linearized analog photonic links based on a dual-parallel polarization modulator[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1823-1825.
- [28] ZHU R, ZHANG X. Linearization of radio-over-fiber systems by using two lasers with different wavelengths[C]//2014 IEEE MTT-S International Micro-

- wave Symposium (IMS2014). Florida: IEEE, 2014; 1-3.
- [29] ZHU D, CHEN J, PAN S. Multi-octave linearized analog photonic link based on a polarization-multiplexing dual-parallel Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Express, 2016, 24(10): 11009-11016.
- [30] YANG Z, YU Q, XIE X, et al. High-gain phase modulated analog photonic link using high-power balanced photodiodes[C]//Optical Fiber Communication Conference. Los Angeles: Optical Society of America, 2017; Th1A. 5.
- [31] DING D, RODRIGUEZ J, LI Y. Pulsed sagnac loop phase-modulated microwave photonic link[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2018, 30(5): 419-422.
- [32] TIAN X, XIE W, WANG X, et al. Highly linear analog photonic link based on composite optical phase-locked loop[C]//2017 Optical Fiber Communications Conference and Exhibition (OFC2017). Los Angeles: IEEE, 2017; 1-3.
- [33] YE Y, DENG L, CHEN S, et al. Simultaneous suppression of even-order and third-order distortions in directly modulated analog photonic links[J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(3): 1-12.
- [34] TAN Q, GAO Y, FAN Y, et al. Multi-octave analog photonic link with improved second-and third-order SFDRs[J]. Optics Communications, 2018, 410(1): 685-689.
- [35] GAO Y, WEN A, PENG Z, et al. Analog photonic link with tunable optical carrier to sideband ratio and balanced detection [J]. IEEE Photonics Journal, 2017, 9(2): 1-10.
- [36] 童国川. 基于光子学的高质量微波信号发生及远距离稳相传输技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [37] ZHANG A, DAI Y, YIN F, et al. Phase stabilized downlink transmission for wideband radio frequency signal via optical fiber link [J]. Optics Express, 2014, 22(18): 21560-21566.
- [38] XUE W, SALES S, CAPMANY J, et al. Wideband 360° microwave photonic phase shifter based on slow light in semiconductor optical amplifiers[J]. Optics Express, 2010, 18(6): 6156-6163.
- [39] SANCHO J, LLORET J, GASULLA I, et al. Fully tunable 360° microwave photonic phase shifter based on a single semiconductor optical amplifier[J]. Optics Express, 2011, 19(18): 17421-17426.
- [40] PAGANI M, MARPAUNG D, CHOI D Y, et al. Tunable wideband microwave photonic phase shifter using on-chip stimulated Brillouin scattering[J]. Optics Express, 2014, 22(23): 28810-28818.
- [41] DONG Y, HE H, HU W, et al. Photonic microwave phase shifter/modulator based on a nonlinear optical loop mirror incorporating a Mach-Zehnder interferometer[J]. Optics Letters, 2007, 32(7): 745-747.
- [42] PU M, LIU L, XUE W, et al. Tunable microwave phase shifter based on silicon-on-insulator microring resonator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2010, 22(12): 869-871.
- [43] SUN X, FU S, XU K, et al. Photonic RF phase shifter based on a vector-sum technique using stimulated Brillouin scattering in dispersion shifted fiber [J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2010, 58(11): 3206-3212.
- [44] WANG X, CHAN E H W, MINASIAN R A. All-optical photonic microwave phase shifter based on an optical filter with a nonlinear phase response [J]. Journal of Lightwave Technology, 2013, 31(20): 3323-3330.
- [45] SHEN J, WU G, ZOU W, et al. A photonic RF phase shifter based on a dual-parallel Mach-Zehnder modulator and an optical filter[J]. Applied Physics Express, 2012, 5(7): 072502.
- [46] LI W, SUN W H, WANG W T, et al. Photonic-assisted microwave phase shifter using a DMZM and an optical bandpass filter[J]. Optics Express, 2014, 22(5): 5522-5527.
- [47] ZHANG Y, PAN S. Broadband microwave signal processing enabled by polarization-based photonic microwave phase shifters[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2018, 54(4): 1-12.
- [48] PAN S, ZHANG Y. Tunable and wideband microwave photonic phase shifter based on a single-sideband polarization modulator and a polarizer[J]. Optics Letters, 2012, 37(21): 4483-4485.
- [49] ZHANG Y, PAN S. Photonics-based multi-function analog signal processor based on a polarization division multiplexing Mach-Zehnder modulator[J]. Optics Letters, 2017, 42(23): 5034-5037.
- [50] ONORI D, LAGHEZZA F, GHELFI P, et al. A photonics-based ultra wideband scanning RF receiver with high sensitivity and dynamic range[C]//2015 International Topical Meeting on Microwave Photonics (MWP2015). Cyprus: IEEE, 2015; 1-4.
- [51] MALEKI L, BYRD J, SAVCHENKOV A A, et al.

- On the development of photonic RF oscillators and resonant electro-optic modulators for advanced RF front-end applications[C]//2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium. Baltimore: IEEE, 2011: 1-4.
- [52] LEI C, CHEN H, LI R, et al. Broadband high-resolution programmable radio frequency signal analysis [M]. Newsroom: SPIE, 2014:1-3.
- [53] HUNTER D B, EDVELL L G, ENGLUND M A. Wideband microwave photonic channelised receiver [C]//2005 International Topical Meeting on Microwave Photonics. Seoul:IEEE, 2005: 249-252.
- [54] XIE X, DAI Y, JI Y, et al. Broadband photonic radio-frequency channelization based on a 39 GHz optical frequency comb[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2012, 24(8): 661-663.
- [55] XIE X, DAI Y, XU K, et al. Broadband photonic RF channelization based on coherent optical frequency combs and I/Q demodulators [J]. IEEE Photonics Journal, 2012, 4(4): 1196-1202.
- [56] TANG Z, ZHU D, PAN S. Coherent optical rf channelizer with large instantaneous bandwidth and large in-band interference suppression [J]. Journal of Lightwave Technology, 2018, 36(19): 4219-4226.
- [57] 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.
- [58] VEGA A, LEAIRD D E, WEINER A M. High-speed direct space-to-time pulse shaping with 1 ns reconfiguration[J]. Optics Letters, 2010, 35(10): 1554-1556.
- [59] AZAÑA J, BERGER N K, LEVIT B, et al. Reconfigurable generation of high-repetition-rate optical pulse sequences based on time-domain phase-only filtering[J]. Optics Letters, 2005, 30(23): 3228-3230.
- [60] JIANG Z, HUANG C B, LEAIRD D E, et al. Optical arbitrary waveform processing of more than 100 spectral comb lines[J]. Nature Photonics, 2007, 1(8): 463.
- [61] CHOU J, HAN Y, JALALI B. Adaptive RF-photonic arbitrary waveform generator[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2003, 15(4): 581-583.
- [62] WANG C, YAO J. Photonic generation of chirped millimeter-wave pulses based on nonlinear frequency-to-time mapping in a nonlinearly chirped fiber Bragg grating[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 542-553.
- [63] ZHANG W, YAO J. Photonic generation of linearly chirped microwave waveforms using a silicon-based on-chip spectral shaper incorporating two linearly chirped waveguide Bragg gratings [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(24): 5047-5054.
- [64] KHAN M H, SHEN H, XUAN Y, et al. Ultra-broad-bandwidth arbitrary radiofrequency waveform generation with a silicon photonic chip-based spectral shaper[J]. Nature Photonics, 2010, 4(2): 117-122.
- [65] 李兵,李剑平,吴中伟. X波段捷变频频率综合器[J]. 微波学报, 2012, 28(S2): 278-280.
- [66] LI J, YI X, LEE H, et al. Electro-optical frequency division and stable microwave synthesis[J]. Science, 2014, 345(6194): 309-313.
- [67] NEYER A, VOGES E. Nonlinear electrooptic oscillator using an integrated interferometer[J]. Optics Communications, 1981, 37(3): 169-174.
- [68] YAO X S, MALEKI L. High frequency optical sub-carrier generator[J]. Electronics Letters, 1994, 30(18): 1525-1526.
- [69] ELIYAHU D, SEIDEL D, MALEKI L. RF amplitude and phase-noise reduction of an optical link and an opto-electronic oscillator[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2008, 56(2): 449-456.
- [70] 徐晓瑞. 基于光电振荡器的频率综合器[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.

(本文编辑:应振华)