

射频信号光纤传输技术研究现状及进展

尹怡辉,朱宏韬,熊汉林,曾永福,杨万里,王景国

(中国电子科技集团公司 第三十四研究所,广西 桂林 541004)

摘要:随着现代战场中电磁环境的日趋复杂化,情报侦察、电子对抗、通信和遥感等系统中不同频率、制式的射频(RF)信号密集交叠,RF信号光纤传输技术所具有的宽带、抗干扰和信号损耗小等优势将在这些系统中发挥关键性的作用。概述了RF信号光纤传输技术的特点和优势,介绍了国内外的研究现状及进展情况,展望了RF信号光纤传输技术的发展前景。

关键词:射频信号光纤传输;波分复用;无杂散动态范围

中图分类号:TN915.02 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-5561(2020)02-0019-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2020.02.005

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research status and progress of RF signal optical fiber transmission technology

YIN Yihui, ZHU Hongtao, XIONG Hanlin, ZENG Yongfu, YANG Wanli, WANG Jingguo

(The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China)

Abstract: With the electromagnetic environment of the modern battlefield being increasingly complicated and the interleaving between different frequency and format radio frequency (RF) signals in intelligence reconnaissance, electronic countermeasures, communication and remote sensing systems, the wide bandwidth, anti-interference, and low losses superiority of the RF signal optical fiber transmission technology will play a key role in these systems. This paper reviews the characteristic and advantage of the RF signal optical fiber transmission technology, introduces the research status, development situation at home and abroad, and makes a vista of the RF signal optical fiber transmission technology.

Key words: radio frequency signal optical fiber transmission; wavelength division multiplexing; spurious-free dynamic range

0 引言

射频信号光纤传输技术是将射频信号调制到光载波上^[1],利用光纤进行射频信号的模拟传输,结合了射频无缝覆盖和光纤大带宽、长距离的优点,大大增加了无线电的传输距离,且无需将天线束缚在发射机与接收机的附近,极大地提高了系统的灵活性与安全性。因此,该技术在卫星地面站天线拉远、电子对抗、分布式天线和有线电视(CATV)系统等领域中拥有大量的应用需求。

与传统微带线、同轴电缆等传输方式相比,射频信

号光纤传输技术的优势主要体现在以下几个方面^[2,3]:

①传输损耗小。随射频频率和传输距离的增加,射频光纤链路噪声系数优势体现越明显。②体积小、质量轻,典型的军用级低损耗射频电缆的重量为113 kg/km,同样的军用级光缆的重量为31 kg/km,如美国海军航母和大型军舰上的AN/SPS-48远程警戒雷达系统^[2],采用一根重量为7 kg的8芯光缆替代了7000 kg重、225 m长的同轴电缆,其中光纤附件的重量与电缆附件的重量相当,因此射频信号光纤传输技术在机载、舰载等武器平台具有显著的优势。③抗干扰能力强、成本低。射频光纤链路中使用的光学器件和光纤大部分为介质材料,抗电磁干扰和抗电磁脉冲的能力显著提高,采用射频信号光纤传输技术将天线拉远到远端,可实现雷达站的无人值守,对战术雷达和人员的可生存性具有重大军事价值,并具有重大的经济效益。如美国西屋电气公司采用射频信号光纤传输技术^[4],仅花了12万美元就将AN/TPS-43雷达天线和控制中

收稿日期:2019-11-07。

作者简介:尹怡辉(1986-),男,硕士,高级工程师,主要从事微波光子学、光电子集成电路的研究。先后主持或参与多个省部级重大科技专项和型号项目的研制工作,获桂林市科技进步二等奖1项。



心的距离扩大到 8 km 以上,射频系统的建造成本降低了 68 万美元。近期,卫星地面站、电子对抗等领域的市场需求不断增长,极大地促进了射频传输技术的创新发展。本文对射频信号在光纤中传输的几种技术进行介绍和总结,并对射频信号光纤传输技术的应用前景进行展望。

1 射频信号光纤传输技术研究现状

1.1 长距离传输

随着卫星有效载荷的发展,卫星地面站设备需承载技术侦察、通信、遥感、导航和定位等各种军用和民用信息,系统需要传输处理的电磁带宽不断增大,Viasat-1、Ka-Sat 和 Spaceway-3 等通信卫星波段都已开始使用 Ka 波段,部分同时兼容 L、S、C 和 Ku 等波段,以提供更多带宽。对于 Ku 波段的射频信号,每千米电缆传输信号功率衰减高达几百 dB 甚至更高。由于射频信号光纤传输技术采用光缆作为射频信号的传输媒质,其损耗约为 0.2 dB/km,相比电缆在长距离传输上具有明显的优势。RG141 同轴电缆与射频光纤链路的噪声系数随传输距离的变化关系如图 1 所示^[9]。点划线和实线分别为含低噪声放大(LNA)和不含 LNA 射频光纤链路噪声随传输距离的变化关系;带星号和带圈号实线分别为 1 GHz 和 18 GHz 射频信号在 RG141 同轴电缆中的噪声系数随传输距离的变化关系。对于 1 GHz 的射频信号,当传输距离超过 100 m 时,不含 LNA 射频光纤链路的噪声系数开始小于同轴电缆;对于 18 GHz 的射频信号,当传输距离超过 20 m 时,射频光纤链路就开始体现明显的优势。

射频信号光纤传输链路主要采用直接调制和外

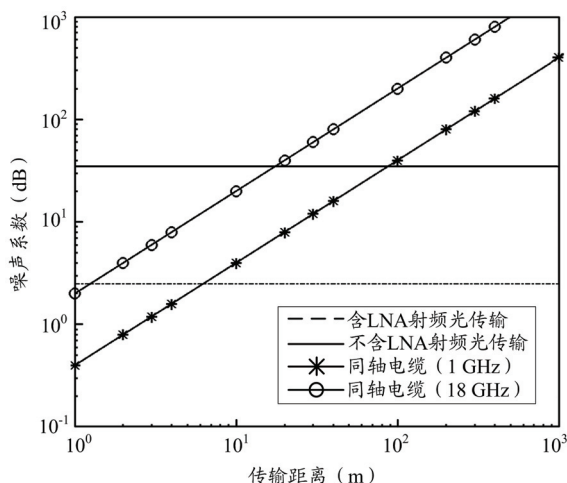


图 1 同轴电缆与射频光纤链路的噪声系数随传输距离的变化关系

调制 2 种技术体制,链路噪声系数与传输距离的关系如图 2 中左边纵坐标轴所示,虚线代表直调链路的噪声系数与传输距离的关系,带星号和带圈号实线分别为激光器相对强度噪声(RIN)为 -155 dB/Hz 和 -165 dB/Hz 时外调链路噪声系数与传输距离的关系。从图 2 可以看出,在长距离射频信号光纤传输系统中,外调制链路具有明显的优势,并且 RIN 起着非常关键的作用。在当传输距离达到数十上百千米时,光纤的色散、非线性效应(受激布里渊散射等)会随着传输距离的增加而增加,并成为影响长距离通信质量的重要因素。研究者为解决这些问题,实现长距离射频信号光纤传输提出了多种技术方案。链路色散与传输距离的关系如图 2 中右边纵坐标轴所示,对于 Ku 波段 18 GHz 的信号(如图 2 中实线所示),当传输距离在 10 km 左右时就出现了色散零点,而对于 12 GHz 的信号(如图中点划线所示),色散零点出现在传输距离 25 km 附近。美国海军实验室采用分段光放大、正、负色散光纤,以及分段隔离受激布里渊散射(SBS)的方式实现了 Ku 波段射频信号的 110 km 光纤长距离传输^[3],在公开报道中代表了该技术的最高水平。该链路包含分布式反馈半导体激光器、马赫-曾德尔调制器(MZM)、宽带光电二极管(PIN)、正色散光纤、负色散光纤、SMF-28 的 3 种光纤和 4 个常用的掺铒光纤放大器。当基波频率为 18 GHz 时,该链路输出噪声为 -148 dBm/Hz,无杂散动态范围(SFDR)达到 103 dB·Hz^{2/3}。

在民用领域,长距离射频光纤传输的研究集中在 CATV 系统,主要采用分段式掺铒光纤放大器放大结构。美国 CATV 的光纤传输起步较早,从美国加利福

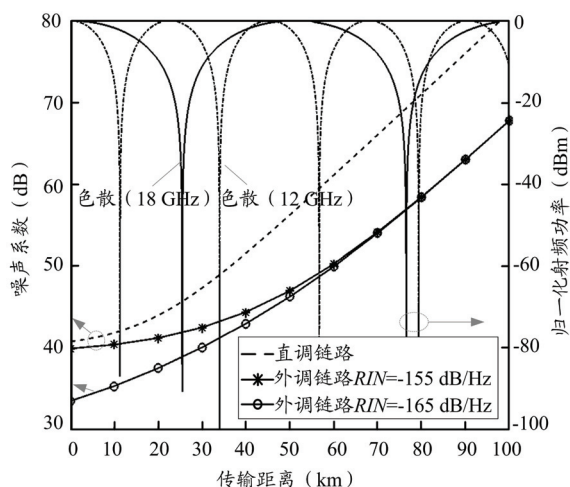


图 2 噪声系数及色散与传输距离的关系图

尹怡辉,朱宏韬,熊汉林,等:射频信号光纤传输技术研究现状及进展

尼亚阿拉梅达的 CATV 系统首次采用射频光纤传输,到美国联邦通信委员会开始允许电信部门进入 CATV 领域,射频光传输技术在 CATV 系统应用中快速发展。日本松下电气公司开发了一种经济适用型 CATV 光缆系统,该光纤传输系统采用了相位差调幅技术,能够实现较好的传输性能和较低的衰减损耗;八木天线公司开发的 CATV 射频光传输系统中,采用 AM-IM 链路,实现了 CATV 信号 1012 km 的传输。国内在长距离 CATV 光纤传输中,主要采用残留边带调幅混合光纤同轴(HFC)传输方式。为解决长距离光纤传输中的色散、二阶失真以及布里渊散射问题,研究者提出通过外加相位调制器实现对 SBS 以及二阶失真的抑制,其次另一些研究通过增加光纤的有效面积(如新型的大有效面积光纤)来减少长距离光纤传输的非线性效应。

1.2 大动态射频光传输

从频域来看, SFDR 是有用信号功率与最大可探测到的失真信号功率之间的差值,为简化所选接收机带宽的实际动态范围, SFDR 通常归一化为 1 Hz 带宽。下一代军用多功能接收机技术对一些重要的性能参数要求更高,其中包括更大的 SFDR($120 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$)和更高的接收机灵敏度(大于 -90 dBm)。此外,还要求降低系统的尺寸、重量、功耗和成本等。射频光传输不仅在长距离传输中体现了其卓越的优势,同时这种低损耗、低噪声的特性使得射频光链路实现大 SFDR 传输成为可能。

近年来,美国国防先进研究计划局(DARPA)为提高装备的作战性能,在射频光子领域投入了超宽带多功能光子收发组件(ULTRATR)、光子同步发射与接收(P-STAR)、发射和接收优化光子学(TROPHY)、线性光子射频前端技术和可重构光子模拟信号处理(PhASER)等项目,显著地提高了 SFDR 指标。研究技术途径主要是通过降低激光器 RIN 和电光调制器的半波电压,同时增加光探测器的线性度和光功率处理能力来提升链路的 SFDR。该方法已经逼近理论极限,对光电器件技术指标要求极高。SFDR 与直流光电流的关系如图 3 所示。实线为小信号模型激光器没有 RIN 的 SFDR 理论值,带星号实线和带方框实线分别表征了 RIN 为 -155 dB/Hz 和 -165 dB/Hz 时 SFDR 与直流光电流的关系, RIN 值越小, SFDR 越大;虚线和点划线分别为半波电压 V_π 为 2 V 和 1 V 时 SFDR 与直流光电流的关系,对于小信号模型, V_π 值对链路的影响并不大。大多数关于线性化或进一步增加 SFDR

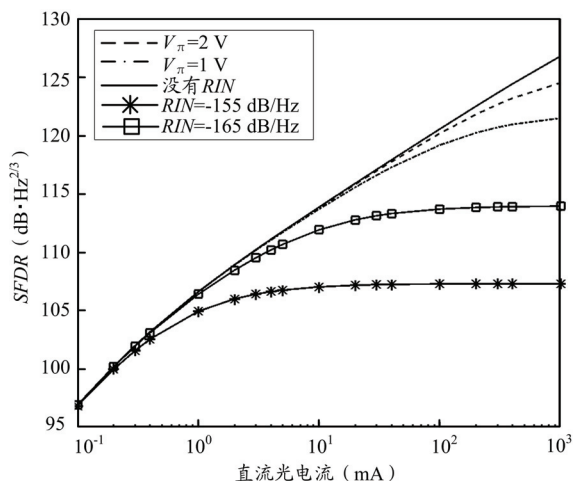


图3 SFDR与直流光电流的关系

的研究集中在 2 方面:一是采用光锁相环的光相位调制产生较高的 SFDR;二是基于光子预失真补偿来有效地增加 SFDR。目前, DARPA 投入的项目中, 1 Hz 噪声带宽 SFDR 的测试情况如下:射频频率为 16 GHz 时采用宽带外调制链路测得的 SFDR 超过 $115 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$;对于 10 GHz 射频光链路采用单倍频电光调制器测得的 SFDR 超过 $120 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$;使用光锁相环作为线性相位解调器在 100 MHz 处测得的 SFDR 接近 $135 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$;利用光滤波器、下变频和预失真补偿在 5 GHz 处测得 SFDR 超过 $125 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$ 。国内大动态射频光传输技术研究情况如表 1 所示。

表1 国内大动态射频光传输技术研究情况

研究机构	时间	技术途径	射频频率	SFDR
中国电科 34 所	2017 年	平行极化调制	1.35 GHz	$121 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$
北京邮电大学 ^[6,7]	2014 年	线性化相位调制直接检测	18 GHz	$112.37 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$
	2014 年	后置数字补偿	6 GHz	$128.3 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$
空军工程大学 ^[8,9]	2016 年	双并联极化调制	1 GHz	$124 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$
南京航空航天大学 ^[10]	2012 年	双并联极化调制	5 GHz	$110 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{2/3}$
东南大学 ^[11]	2015 年	双波长双并联调制线性化	—	$122.5 \text{ dB} \cdot \text{Hz}^{4/5}$

1.3 射频信号光纤稳相传输

射频信号在光纤媒介的传输过程中,信号的幅度畸变可以通过放大、衰减等方法改善。但光纤在受到应力和温度等外界环境因素影响后,传输射频信号的相位会同时出现漂移,影响相位稳定性,这对于分布式天线系统精确馈相,空间系统应用中的稳相传输以及分布式系统中的时钟同步都有较大影响。近年来,从欧洲、美国和日本,再到国内,有多个实验室开展了这方面的研究。国内开展光纤稳相技术的主要单位有航天二院、北京邮电大学、电子科技大学、中国电科 34 所、北京大学和上海交通大学等,各个实验室使用的方法不尽相同,但是总体上基于光纤的稳相传输取得了很大的进展,传输的距离不断增加,系统的稳定度也不断提高,并且在许多实际的工程中开始了应用,如深空探测网、阿塔卡玛大型毫米波天线阵列(ALMA)等分布式天线阵列。

国内外射频信号光纤稳相传输技术原理主要基于光载波矢量和、电域矢量和、色散理论以及射频光子移相等,其中基于光载波矢量和的光纤稳相技术原理简单、精度高,但是对器件一致性要求高,且系统稳定性欠佳,射频信号频率为 1 GHz、传输距离为 400 m 时,相位稳定度达到 0.15° ;基于电域矢量和的稳相技术系统简单、成本低,但是对检波器、移相器要求高,近端远端直接鉴相,无法在实际工程中应用,射频信号频率为 10 GHz、传输距离为 25 km 时,相位稳定度达到 2° ;基于色散理论的稳相技术中业务与稳相传输互不干扰,但是偏振控制复杂、对可调激光器要求高,射频信号频率为 2.5 GHz、传输距离为 45 km 时,相位稳定度为 3° ;基于射频光子移相的光纤稳相技术优点是易于集成、精度高,但成本高,无法满足宽带射频信号的稳相传输,射频信号频率为 500 MHz、传输距离为 20 km 时,相位稳定度达到 1.8° 。

此外,国内外特种光纤研制单位也在同步开展稳相光纤光缆的研究,特种光纤媒介中的光子传播时延对温度不敏感,研究方向上国内外稳相光纤主要有 2 种:一是通过对纤芯层的群折射率和纤维结构进行特殊设计,提高光纤时延温度稳定性,该方案主要为实验室研究,还没有形成商业化产品;二是对涂覆层材料进行特殊处理,降低光纤对温度的敏感性,该方法在国内外已经取得一定的实质性进展,并且部分产品已开始应用,如国内的光纤稳相光缆的相位温度稳定性已经从 $35\sim 45\text{ ps}/(\text{km}\cdot^\circ\text{C})$ 提高到了 $12\text{ ps}/(\text{km}\cdot^\circ\text{C})$ 。

1.4 波分复用(WDM)射频光传输

WDM 技术可以让射频光传输容量得到大幅度提升,目前 WDM 可以使光纤同时传送 16 个波长的光载射频信号。影响 WDM 射频信号光纤传输的主要因素是光纤的非线性效应,其中交叉相位调制(XPM)、四波混频(FWM)以及色散等效应是制约 WDM 传输容量的主要因素。国内外现有研究中解决 WDM 非线性的方法有:啁啾光线布喇格光栅(CFBG)、特殊的调制方式(如极移键控等)以及算法优化信道分配等。

Z. TAN 等人提出使用 CFBG 抑制 XPM,提出了一种基于 CFBG 色散补偿的光载无线通信(RoF)系统^[12],当光信号通过光栅时,不同的波长分别在光栅的头部和尾部反射,长波长比短波长传播的距离短,两波长之间产生延时,这样就实现了色散补偿。Y.M Song 等人证明可以通过极移键控(PoISK)调制结构抑制非线性引起的串扰^[13],通过将 2 个互补的数据流加载在 2 个正交的极化状态上,从而确保整个数据流具有恒定的光功率。另一种抑制 WDM 中非线性的方法是非等距信道分配^[14]。在传统的 WDM 系统中,信道间距一般是相等的,这样会产生 FWM 信号进而引起串扰。R Randhawa 等人提出了一种非等距信道分配方法抑制了 FWM 效应,这种分配方法基于 Golomb 规则,其在保持带宽效率的同时降低了 FWM 效应^[14]。

2 射频信号光纤传输技术应用前景

在卫星地面站信道传输技术领域,根据卫星工业协会发布的 2019 年卫星行业状况报告,2018 年全球卫星地面设备收入约 1252 亿美元,预计国内卫星地面站的建设将会不断增加。因此,射频信号光纤传输技术在国内卫星地面站领域中具有广泛的应用前景。

下一代雷达向着高频率、超宽带和多功能一体化方向发展,以期在提高距离分辨率、改善目标识别成像等诸多性能的同时,又能提高雷达的隐蔽性和抗干扰性能^[15]。在雷达系统应用领域,欧盟开展了射频光传输技术在雷达领域的应用研究。其中,作为世界十大防务集团之一的意大利芬梅卡尼卡集团最早提出了发展微波光子雷达的构想,将微波光子雷达的研究分为 4 个阶段。其中,第一阶段就是完成光载射频的远距离大动态范围传输,即通过射频光传输技术实现雷达天线之间模拟射频信号的大动态范围光传输,为微波光子雷达的进一步发展奠定基础。俄罗斯的无线电设备制造商 KRET 在 2013 年公布了其“射频光子相控

阵”项目的研究成果,该项目研制的相控阵天线采用分布式天线系统,天线之间采用射频光传输连接,用于雷达系统能够实现高分辨率探测,能对上百千米外的目标实现三维立体成像,同时由于射频光传输技术的应用,相较于传统电缆传输方式,其雷达系统质量也降低了50%。因此,射频信号光子传输、处理技术将凭借其优势在雷达系统中逐步取代部分传统电子技术并发挥重要作用。

为了满足未来电子战高性能信号检测与分析、射频辐射源测向与定位以及综合电子干扰与电子攻击的应用需求,电子战装备和技术首先必须要解决射频信号的超宽带、高灵敏度、大动态范围与实时的感知、传输和处理问题^[6]。由于电子现有宽带处理技术水平存在很大的瓶颈,对于瞬时带宽较大的应用领域,现有最高瞬时信号生成与处理带宽小于等于2 GHz,因此无法完成高精度数字化采样,尤其是电子对抗领域,射频带宽通常覆盖10 MHz~18 GHz,如此高的瞬时带宽,传统数字信号处理技术是难以做到的。而将射频信号调制到光域上进行传输、处理,可以利用光子技术的超宽带、抗干扰、低插入损耗以及大时间-带宽积等优势,因此该技术在电子战领域必将成为最有效的技术之一,并应用于信号识别和拦截、电子战诱饵、干扰发射机和接收机、信号获取和作战识别以及点到多点测向等系统中。

3 结束语

射频信号光纤传输技术将模拟射频信号和光纤完美结合,兼具射频无线覆盖和光纤传输宽带、抗干扰以及低损耗的优势,被广泛应用于民用和军事领域。近年来,射频光纤传输技术在长距离、大动态范围、光纤稳相以及WDM等研究方向有着丰富的研究成果及应用。并且根据最近国内外研究进展来看,在面向卫星地面站多通道传输、多功能处理和超宽带接收,面向相控阵雷达射频信号的光分配和复用,面向电子对抗系统中宽带瞬时信号的处理、信道化接收,以及在面向微波光子雷达高分辨率成像等领域,长距离、大动态范围和光纤稳相的射频信号光纤传输技术仍是这些系统的关键。长距离传输的发展趋势是进一步增加总传输距离,延长分段放大的距离,并由点对点变为点到网络;大动态范围传输逐步向着可靠性稳定性发展,并且结合光电集成技术,以满足未来小型化通信系统的要求;关于宽带射频信号光纤稳相传

输,目前的研究大都停留在预研阶段,需要进一步提高技术成熟度,实现逐步推向工程应用。

参考文献:

- [1] CHRLIS H Cox. Analog Optical Links: Theory and Practice [M]. New York: Cambridge University Press, 2004.
- [2] 尹纯静. 面向一体化电子系统应用的宽带通用射频光前端技术[D]. 北京:北京邮电大学,2019.
- [3] 申芳芳,苏鑫鑫,付双林,等. 光子集成射频自干扰消除系统性能仿真分析[J]. 光子学报,2019,48(11):1148017-1-1148017-2.
- [4] CHANG SW. RF Photonic Technology in Optical Fiber Link [M]. New York: Cambridge University Press, 2002.
- [5] SINGLEY M J, URICK V J. Increased Performance of Single Channel Analog Photonic Links Enabled by Optical Wavelength Division Multiplexing[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2019, 67(3): 1-9.
- [6] LI J, ZHANG Y C, YU S, et al. Optical Sideband Processing Approach for Highly Linear Phase-Modulation/Direct-Detection Microwave Photonics Link[J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 5501110-2-5501110-10.
- [7] DAI Yitang, CUI Yan, LIANG Xi, et al. Performance Improvement in Analog Photonics Link Incorporating Digital Post-Compensation and Low-Noise Electrical Amplifier [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(4): 5500807-1-5500807-8.
- [8] LI X, ZHAO S H, ZHU Z H, et al. Dynamic range improvement of broadband microwave photonic links using a linearized single-sideband modulator[J]. Optics Communications, 2015, 350: 170-177.
- [9] LI Xuan, ZHAO Shanghong, ZHU Zihang, et al. Dynamic range improvement for an analog photonic link using an integrated electro-optic dual-polarization modulator[J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8(2): 2547844-1-2547844-9.
- [10] HUANG M H, FU J B, PAN S L. Linearized analog photonic links based on a dual-parallel polarization modulator[J]. Optics Letters, 2012, 37(11): 1823-1825.
- [11] 李向华,杨春,崇毓华. 基于双波长双并联调制的大动态范围微波光子链路[J]. 中国激光,2015,1(1):192-198.
- [12] TAN Z, LI B, WANG Y, et al. A novel method to suppress the crosstalk of the system with dispersion compensated by fiber gratings[J]. Optics Communications, 2007, 269: 194-198.
- [13] SONG Y W, PAN Z, ARIELI Y, et al. Immunization of WDM systems to nonlinearity-induced crosstalk using optical polarization-shift-keying[J]. Optics Communications, 2005, 252: 162-166.
- [14] RANDHAWA R, SOHAL J S, KALER R S. Optimum algorithm for WDM channel allocation for reducing four-wave mixing effects [J]. Optik, 2009, 120: 898-904.
- [15] 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.
- [16] 蒋盘林,徐浚洋. 射频光子技术在电子战中的应用 [J]. 通信对抗, 2014,33(3):6-14.