

# 无线激光与射频互补通信系统的关键技术

丁良<sup>1,2,\*</sup>, 吴志勇<sup>1</sup>, 谷雨聪<sup>1,2</sup>, 高则超<sup>1,2</sup>, 胡金田<sup>1,2</sup>, 马爽<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 介绍了无线激光与射频(RF)互补通信系统的突出地位和重大成果,说明了无线激光与 RF 互补通信技术的优越性和重要性。描述了无线激光与 RF 互补通信的系统结构,说明无线激光与 RF 互补通信系统研究的可行性。结合国外近年来的互补通信系统最新研究成果,重点对遇到的一系列问题进行分析。指出了互补通信系统现阶段面临的挑战,阐述了应对这些挑战的关键技术,并指出其应用前景和发展趋势。

**关键词** 光通信; 无线激光与射频互补通信; 切换技术; 自适应光学; 光自动增益控制; 自适应均衡; 频率选择

中图分类号 TN929.12; TN925+.91

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.060004

## Key Technologies of Wireless Laser and Radio Frequency Complementary Communication System

Ding Liang<sup>1,2,\*</sup>, Wu Zhiyong<sup>1</sup>, Gu Yucong<sup>1,2</sup>, Gao Zechao<sup>1,2</sup>, Hu Jintian<sup>1,2</sup>, Ma Shuang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The important role and major achievements of a wireless laser and radio frequency (RF) complementary communication system are introduced, and the superiority and importance of the wireless laser and RF complementary communication technologies are explained. And the basic working principle of the wireless laser and RF complementary communication system is expounded, and the feasibility of the wireless laser and RF complementary communication system is illustrated. Combining with the latest research results of the complementary communication systems in foreign countries in recent years, the key problems encountered are mainly analyzed. The challenges faced by the complementary communication systems at present are presented. The key technologies to solve these challenges are put forward. The application prospect and development trend of the complementary communication are pointed out.

**Key words** optical communications; wireless laser and RF complementary communication system; switching technology; adaptive optics; optical automatic gain control; adaptive equalization; frequency selection

**OCIS codes** 060.4510; 060.2605; 350.4010

## 1 引言

无线激光通信又称自由空间光(FSO)通信,近年来成为各军事强国的关注热点<sup>[1-3]</sup>,是一项重要的战略技术。美国 LLCD (Lunar Laser Communication Demonstration)项目的月球对地通信<sup>[4-6]</sup>和 OPALS(Optical Payload for Lasercomm

Science)项目的空间站对地通信<sup>[7-9]</sup>、欧盟 EDRS (European Data Relays System)项目<sup>[10-12]</sup>、日本 SOTA (Small Optical Transponder Assembly)项目<sup>[13-15]</sup>等均引起了广泛关注,欧洲、美国、日本在这些项目上进行了成功的在轨实验及初步应用,并制定了详细的 FSO 通信计划。

FSO 与射频(RF)互补通信作为光通信的重要

收稿日期: 2018-08-27; 修回日期: 2018-09-27; 录用日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(51605465)、中国科学院科研装备研制项目

\* E-mail: dingliang100250206@163.com

发展方向,既克服了FSO通信易受天气条件影响导致可靠性低的问题,又弥补了RF通信速率受限的问题。FSO和RF互相取长补短,兼顾了平均速率和可靠性。近年来,FSO与RF互补通信正受到各国科研机构和组织的重视<sup>[16-17]</sup>。2007年之前,美国国防部高级研究计划局(DARPA)的FSO与RF通信链路实验项目(ORCLE)在网络层和物理层对互补通信系统的可行性进行了验证。在美国空军研究实验室(AFRL)2007年的IRON-T2项目<sup>[18]</sup>中,互补通信系统的RF通信部分通信速率达到了 $274 \text{ Mbit}\cdot\text{s}^{-1}$ ,FSO通信部分单通道通信速率不低于 $5 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 。2016年,欧空局(ESA)在EDRS-A项目中采用FSO和Ka波段RF互补通信方式,实现了双向 $1.8 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 速率的星间链路<sup>[19]</sup>。日本国立信息通信技术研究所(NICT)计划于2021年发射集成 $1.5 \mu\text{m}$ 的FSO通信和Ka波段RF通信设备的互补通信系统,预计能达到 $10 \text{ Gbit}\cdot\text{s}^{-1}$ 的同步卫星对地通信速率<sup>[20]</sup>。此外,美国宇航局(NASA)、美国约翰霍普金斯大学应用物理实验室(JHU-APL)等机构也对互补通信系统进行了深入研究。

FSO与RF互补的通信系统是一种重要的高速、点对点的无线通信解决方案<sup>[21-22]</sup>。该方案结合了两种通信链路的优点,既拥有FSO通信的带宽宽、高增益、小体积、抗电磁干扰和不易被截获的优点,还具备RF通信的高可靠性的特点,能够为未来高速高可靠性的信息传输提供科学依据。无论是在大气内、星地间还是深空探索中,该通信系统都有着广阔的应用前景。相对于传统的单一通信方式,FSO与RF结合将会面临更多的挑战,如恶劣的工作环境、复杂的天气变化、平台的移动和振动等,还需满足不同应用场景下系统对终端尺寸、质量和功耗的要求。因此,真正完成互补通信系统的研制工作具有很大的挑战性。本文主要根据近五年国外的

研究进展,介绍了互补通信系统的发展近况和系统结构,在此基础上归纳总结了该领域的部分关键技术,并分析预测了其发展趋势。

## 2 FSO与RF互补通信系统结构

FSO与RF互补通信系统主要由三部分构成,FSO通信、RF通信和切换机构。FSO通信部分以激光为载体传递信息,而RF通信部分以电磁波为载体传递信息。为了使两者协调工作,高效可靠的切换机制在该系统中扮演着重要的角色。

图1是FSO与RF互补通信系统的典型结构。FSO通信链路采用了开关键控(OOK)信号强度调制与差分探测的方式。在发送端,OTx1和OTx2是不同波长的激光源,分别采用非归零OOK(NRZ-OOK)数据序列和其反序列对激光进行强度调制,已调激光束经过单模光纤(SMF)进入光混合器,最后由光学镜头将其发送至通信信道中<sup>[23]</sup>。在接收端(Rx),被捕获的入射激光经耦合器进入多模光纤(MMF),滤波之后进入接收探测器,最后通过差分探测器将信号重构。RF通信链路采用二进制相移键控(BPSK)信号相位调制与相干探测的方式。在发射端(Tx),BPSK调制器将输入的原始信号转换成BPSK信号,然后通过由混频器、放大器和带通滤波器(BPF)组成的上变频系统发射出去。在接收端,被捕获信号经过包含低噪声放大器(LNA)、混频器和带通滤波器的下变频系统处理,最后由BPSK解调器将原始信号恢复。FSO和RF通信链路的信号输入前端是负责链路切换的切换控制模块,二者接收功率和信噪比(SNR)数据都将通过一个链路评估器模块进行检测并记录,然后通过反馈链路传送到切换控制模块,切换控制模块再利用反馈回来的数据进行切换,以保障高速高可靠性的通信。

目前,关于FSO通信技术的研究有一定进展和

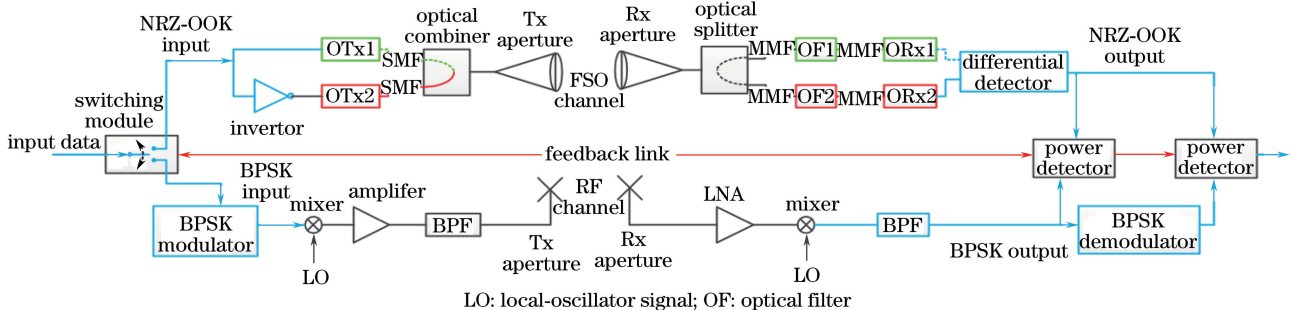


图1 FSO与RF互补通信系统的结构框图

Fig. 1 Block diagram of FSO and RF complementary communication system

成果,RF 通信技术也比较成熟。但是,想要将两者的优点结合在一起以满足未来的通信要求,实现高速、高可靠性的 FSO 与 RF 互补通信,需要充分了解切换机制和大气环境对通信链路的影响等重要内容。关于这方面的研究,国内相关资料较少。因此,有必要了解国外 FSO 与 RF 互补通信系统的研究,借鉴其宝贵经验。

### 3 关键技术

#### 3.1 信道选择问题与切换技术

FSO 与 RF 互补通信在特定场景下选择合适的

信道传输信息至关重要,而信道选择需要一种高效可靠的切换机制<sup>[24-25]</sup>。目前主要的切换技术包括两种:硬切换<sup>[26-29]</sup>和软切换<sup>[30]</sup>。

##### 3.1.1 硬切换

硬切换指在同一时刻发射端和接收端共同选择 FSO 通信链路和 RF 链路中的一种进行数据通信的方式。基本原理如图 2 所示,切换机构按照一定的机制选择链路进行数据传输。硬切换技术有多种,主要包括基于信噪比阈值的切换、基于时间滞后和功率滞后的切换、基于趋势预测的切换和基于方均根(RMS)功率检测器的切换等。

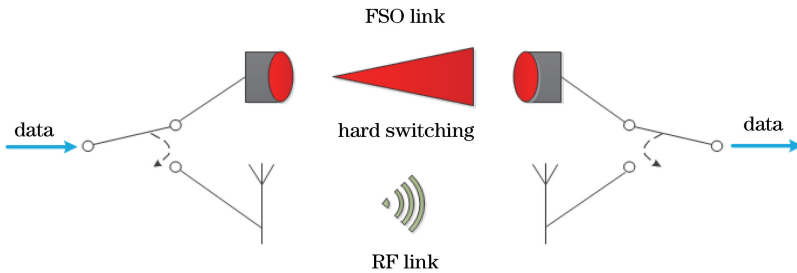


图 2 硬切换示意图

Fig. 2 Schematic of hard switching

##### 3.1.1.1 基于信噪比阈值的切换

###### 1) 采用单一 FSO 信噪比阈值的切换

通过设定一个 FSO 信噪比阈值来控制切换,如果 FSO 链路接收到的即时信噪比高于阈值  $\gamma_{th}^{FSO}$ , FSO 链路将会被启用,若低于阈值  $\gamma_{th}^{FSO}$ ,则系统将会检测 RF 链路;若 RF 链路的信噪比高于阈值  $\gamma_{th}^{RF}$ ,数据将会通过 RF 链路传输;如果信噪比同时低于  $\gamma_{th}^{RF}$  和  $\gamma_{th}^{FSO}$ ,则系统中断。通过分析系统的中断概率、平均误码率与各态历经容量,可以评估单一阈值和双阈值对基于硬切换的通信系统性能的影响<sup>[26]</sup>。分析结果表明,在互补通信系统中采用高质量的 RF 链路时,系统的中断概率性能有明显改善。即使采用质量欠佳的 RF 链路,系统性能也能得到一定的改善,平均误码率也得到一定程度的改善。此外,互补通信系统的容量得到了有效提高,尤其在 FSO 链路信噪比较低的情况下改善效果更明显。事实上,当 RF 链路质量较高时,互补通信系统在低  $\bar{\gamma}_{RF}$  时的各态历经容量比在中等  $\bar{\gamma}_{FSO}$  时的改善程度更大。这得益于高质量 RF 链路在低  $\bar{\gamma}_{FSO}$  时被频繁启用。

###### 2) 采用双 FSO 信噪比阈值的切换

与单一 FSO 链路信噪比阈值切换相比,双阈值切换<sup>[31]</sup>能够避免频繁开关 FSO 链路。这有效拓展了 FSO 通信链路的生命周期。在该体制下,FSO

链路将会一直工作,直到信噪比低于下限阈值  $\gamma_{th,l}^{FSO}$ , FSO 链路才会关闭。只有当信噪比高于上限阈值  $\gamma_{th,u}^{FSO}$  时,FSO 链路才会被再次开启。双阈值切换工作情况如图 3 所示,图中  $\gamma_{efficient}$  为 FSO 链路系统有效信噪比,也就是系统实际信噪比。当 FSO 链路的信噪比在  $\gamma_{th,l}^{FSO}$  和  $\gamma_{th,u}^{FSO}$  之间时,RF 链路和 FSO 链路都有可能被启用,具体是否启用取决于之前 FSO 链路的状态。上下限阈值之间的间隙大小决定链路传输切换的频率,间隙越大,切换频率越低。

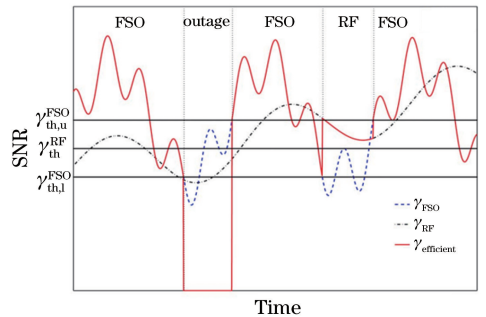


图 3 双 FSO 阈值下的工作情况

Fig. 3 Operation under dual FSO threshold

为了更好地理解以下分析,现利用图 4 所示的系统工作区域图来说明。信噪比阈值  $\gamma_{th,u}^{FSO}$ ,  $\gamma_{th,l}^{FSO}$  和  $\gamma_{th}^{RF}$  将可能的信噪比值划分为 5 个区域。区域 1 中, FSO 链路的信噪比高于上限阈值  $\gamma_{th,u}^{FSO}$  时,系统采用 FSO 链路传输。区域 2 中,链路选择取决于 FSO

前一时刻的信噪比状态,如果系统前一时刻的 FSO 信噪比高于上限阈值  $\gamma_{th,u}^{FSO}$ ,则由 FSO 链路传输信息,反之则由 RF 链路传输信息。这意味着两种链路在该区域都有可能被启用。区域 3 中,FSO 链路开关的概率和区域 2 相同,但该区域 RF 链路一直被关闭。所以在该区域要么 FSO 链路开启,要么系统中断。区域 4 中,FSO 链路关闭,RF 链路开启,系统利用 RF 链路传输信息。区域 5 中,两种链路均无法工作,系统中断。

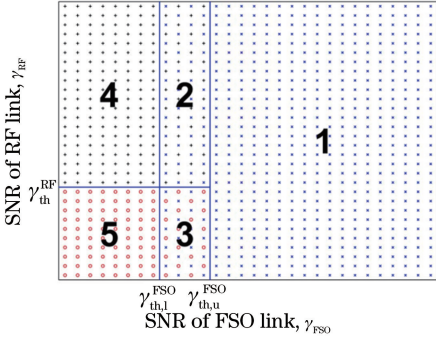


图 4 双 FSO 信噪比阈值下的工作区域

Fig. 4 Operation regions under dual FSO threshold

与单一 FSO 信噪比阈值系统相比,FSO 与 RF 互补通信系统采用双 FSO 信噪比阈值时,未明显提高系统的中断概率、平均误码率和各态历经容量,但有效降低了 FSO 链路和 RF 链路的切换频率,极大地延长了 FSO 链路的生命周期,进而使平均通信速率提高。

### 3.1.1.2 基于时间滞后与功率滞后的切换

在无线通信系统中,无论是 RF 通信还是 FSO 通信,因为天气状况和地形等都有很大的随机性,所以信道条件都是随机变化的。对基于硬切换的互补通信系统而言,信道状态变化频率越高,系统切换次数越多,频繁切换将会导致互补通信系统的工作效率降低。鉴于此,在保证可靠高效的通信方面,基于时间滞后和功率滞后的硬切换算法有很大的优势<sup>[28]</sup>。

时间滞后算法的执行流程如图 5 所示,将 FSO 设置为激活链路,测量接收到的 FSO 的功率大小,将测量值与 FSO 阈值比较,若小于 FSO 阈值,则延迟 5 s 再次测量比较,若还低于 FSO 阈值,再延迟 5 s,若仍低于 FSO 阈值,则切换到 RF 链路,并检测 FSO 的接收功率;若大于 FSO 阈值,则重新启动 FSO 链路。

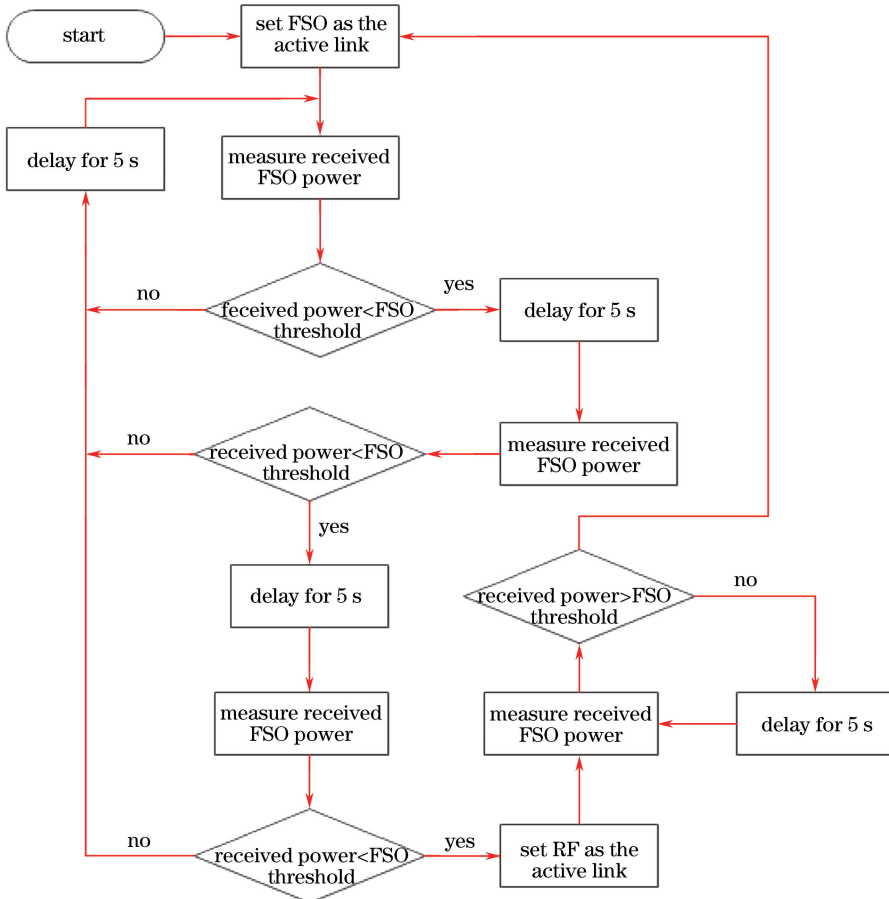


图 5 时间滞后算法流程图

Fig. 5 Flow chart of time hysteresis algorithm

图 6 是功率滞后算法的执行流程图,将 FSO 链路设置为激活链路,测量 FSO 接收功率。如果接收功率小于 FSO 阈值,将 RF 链路激活,延迟 5 s 再检测一次,若小于 FSO 阈值加上 3 dB 裕量,则再次启

动 FSO 链路。以上两种算法都是基于反馈的信道状态信息来执行切换,实验证明,时间滞后和功率滞后能够有效提高互补通信系统在通信速率、通信距离和链路可用性方面的性能。

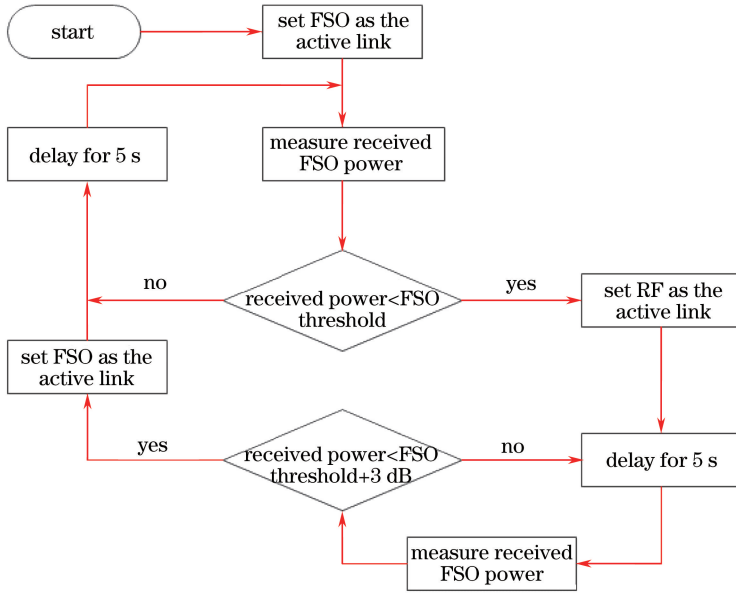


图 6 功率滞后算法流程图

Fig. 6 Flow chart of power hysteresis algorithm

3.1.1.3 基于趋势预测的切换

根据趋势预测下一步发展方向来指导切换操作是一种新颖而且高效的自适应硬切换算法。该类算法是一种基于监控物理链路层状态的切换体制,主要有被动趋势感知和主动趋势感知两种<sup>[27]</sup>。

被动趋势预测算法采用机器学习中局部散点图加权平滑线性回归算法(LOESS),减少接收信号光功率变化的消极影响,采用加权线性最小二乘法和二次多项式模型揭示 FSO 接收光功率的变化趋势。该方法假设 FSO 瞬时接收信号光功率能够连续被收集并且 5 s 划分为一个窗口。利用收集到的分组数据拟合函数,保证重要数据满足拟合函数关系。通过拟合函数计算预测样本点的函数值。如果预测

样本点用拟合函数计算出来的对应函数值大部分都低于设定的 FSO 接收光信号功率值  $\theta_{FSO}$ ,启用 RF 链路,否则启用 FSO 链路。

主动趋势预测算法中 FSO 接收信号是与时间序列相关的标量,用于预测和评估基于线性二次估计的卡尔曼(Kalman)滤波的实时递归和升级。卡尔曼滤波广泛适用于信号处理领域,可以用来产生数学统计最优的评估值。主要过程有两步:首先根据当前状态产生一个评估值,再观察误差,根据误差修正评估。卡尔曼滤波器的状态评估、预测和修正对趋势预测的准确度有重要影响。

上述两种 FSO 接收光功率的预测算法响应如图 7 所示,图 7(a)被动趋势预测算法和图 7(b)主动

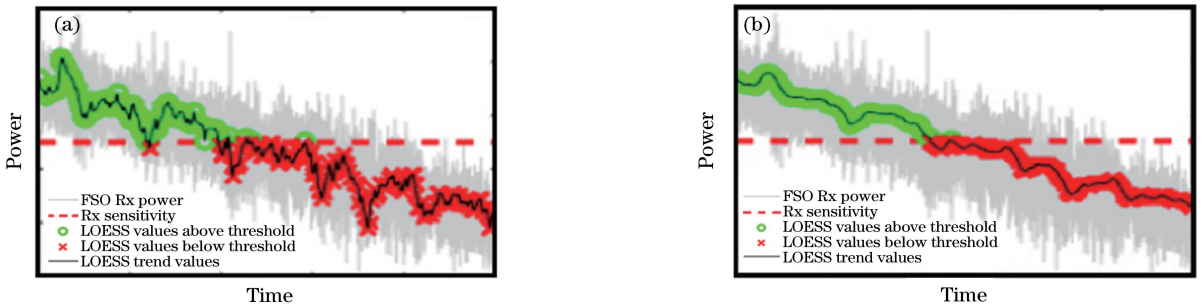


图 7 趋势预测算法性能。(a)被动趋势;(b)主动趋势

Fig. 7 Performance of trend prediction algorithm. (a) Reactive trend; (b) proactive trend

趋势预测算法的整体趋势和实验的整体趋势完全吻合,图中右侧的黑色实线为预测趋势,实际实验数据是围绕趋势预测上下波动的斜向下的灰色条带。

### 3.1.1.4 基于方均根功率检测器的切换

在不同大气条件下, Lee 等<sup>[29]</sup>利用方均根功率检测器监控 FSO 链路接收信号的功率,据此切换 FSO 和 RF 通信链路。其中,决定切换的关键依据并不是信号功率本身,而是方均根功率检测器输出的直流电压,该电压是方均根电压  $V_{rms}$ ,与 FSO 链路接收功率呈对数线性关系。

如图 8 所示,整个互补通信系统主要由三部分组成:FSO 链路、RF 链路和由电路比较器和高频电子开关组成的控制模块。此外,在实验室利用可控大气环境模拟腔模拟雾霾天气。在两条 FSO 链路中,550 nm 链路用于评估激光链路的衰减情况,780 nm 链路采用强度调制与直接探测(IM/DD)的通信方式和 NRZ-OOK 的调制方式。FSO 链路和 RF 链路的切换由控制模块根据 780 nm 链路的方均根功率探测输出进行控制。链路系统的主要参数如表 1 所示。

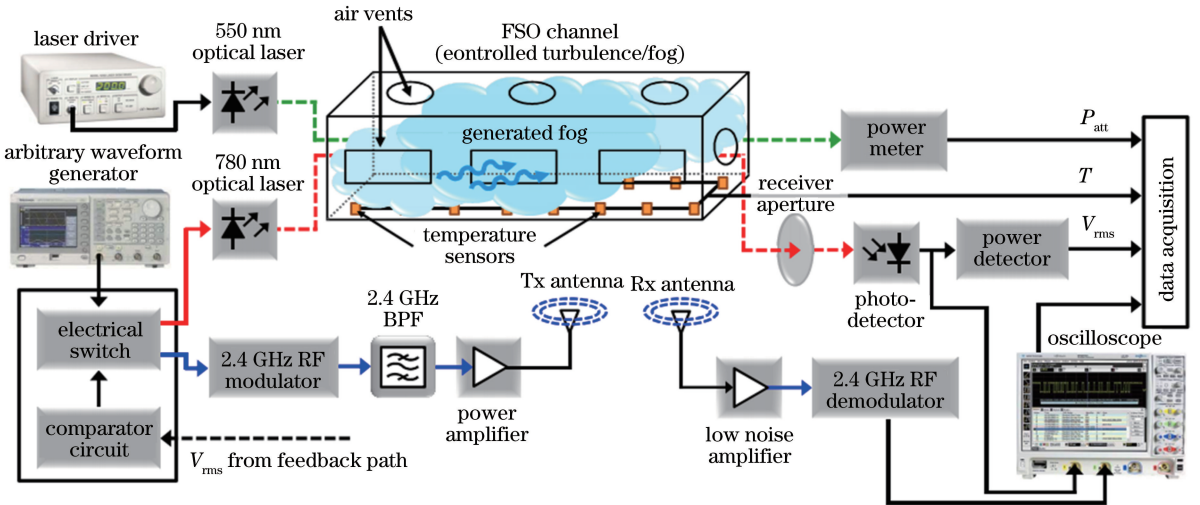


图 8 基于方均根功率检测器切换的系统框图

Fig. 8 Block diagram of switching system based on RMS detector

表 1 基于均方根功率检测器切换系统的关键参数

Table 1 Key parameters of switching system based on RMS power detector

Link type	Instrument	Parameter	Item
Data source		Modulation format	NRZ-OOK
		Data rate / (Mbit·s <sup>-1</sup> )	10100
Laser diode		Peak wavelength /nm	785
		Output power /mW	3
		Beam divergence /mrad	2
FSO link	Optical lens	Diameter /mm	40
		Focal length /mm	100
	Photodetector	Module	Thorlabs PDA10A-EC
RF link		Spectral range of sensitivity /nm	200-1100
		Active area /mm <sup>2</sup>	0.8
		Typical spectral sensitivity / (A·W <sup>-1</sup> )	0.45 at 750 nm
		Modulation format	QPSK
		Carrier frequency /GHz	2.4
RF link		Bandwidth /MHz	10
		Transmitted RF power /dB	-3
		Link span /m	5.5

改变大气模拟腔的参数可以得到不同的实验数据,通过大量实验数据寻找最佳电压阈值以优

化切换。切换控制模块的切换电压阈值会影响传输速率和最小可实现的误码率,所以正确选择表

征接收信号功率的均方根电压作为切换依据至关重要。

### 3.1.2 软切换

硬切换在同一时刻只能利用一种信道进行数据

传输,即在一条信道被选中时,另一条信道将处于闲置状态,这样就造成了信道资源浪费<sup>[32]</sup>。为了克服该缺点,可以使用信道编码技术来协调两种链路的数据传输,基本原理框图如图 9 所示。

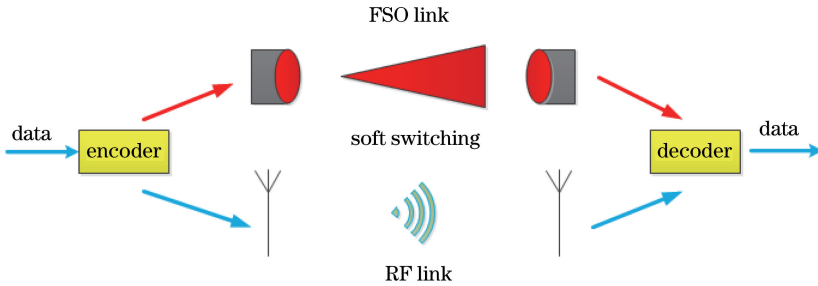


图 9 软切换示意图

Fig. 9 Schematic of soft switching

如果通过低密度奇偶校验码(LDPC)编码<sup>[33]</sup>,并且根据即时信道条件将数据分散到两种信道中并合理安排传输速率,即可合理利用两种信道。虽然 LDPC 编码技术改善了切换性能,提高了信道资源利用率,但是接收机和发射机的信道条件必须已知,而且该技术难以按照 FSO 的高通信速率进行软解码,且解码过程非常复杂。短快速旋风码解决了 LDPC 编码需要较多信道条件信息的问题<sup>[25,34]</sup>,其无须知道发射端和接收端的信道条件信息,并且能够通过仅一个比特的反馈信息调节发射速率。

快速旋风码是一种喷泉码,可实现线性时间内编解码。主要思路是将发送数据分成  $k$  个长度为  $l$  的分组,长度  $l$  通常从单个比特到数千比特不等,然

后通过预编码和 LT(Luby Transform)编码将数据发送出去。解码过程先利用 LT 码技术解码,恢复固定比率的中间编码校验单元,再利用传统纠错码的解码性质,即可恢复原始数据。而短快速旋风码的分组个数  $k$  主要是 16~1024,这种编码的设计和优化具有快速、高效且编解码速率快的特点。

图 10 为基于数据包级的短快速旋风码软切换互补通信链路<sup>[30]</sup>。 $l$  个比特长度的数据包通过 FSO 和 RF 信道分别以不同的数据速率传输。通过对两种信道的建模,能够通过实测数据和信道模型模拟真实信道对信号的衰减。接收端采用硬判决方式,能够降低硬件复杂度。为了保证可靠通信,采用循环冗余校验码(CRC)检测数据包中出现的任何错

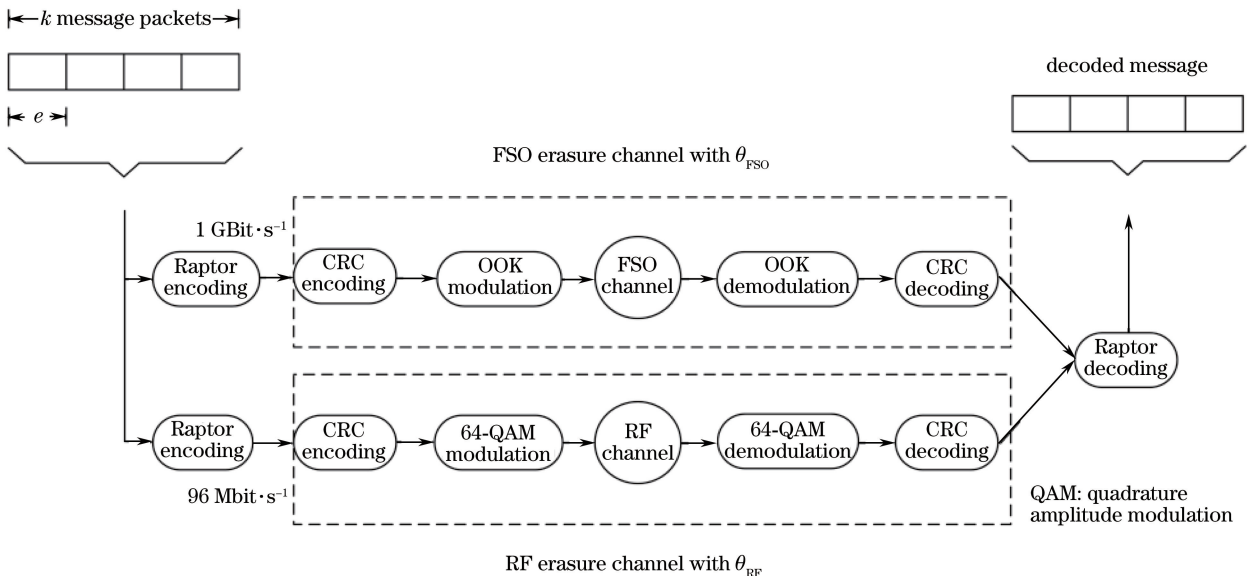


图 10 基于数据包级快速旋风码的软切换互补通信系统

Fig. 10 Soft-switching complementary communication system based on packet-level Raptor codes

误。采用执行 IEEE 802.3 标准的 32 位高速 CRC 编解码器,该编解码器出现不可检测错误的概率可以忽略不计。因此,RF 和 FSO 信道是可擦除信道,任意数据包恶化都将被丢弃。其中,RF 链路和 FSO 链路数据包擦除概率分别为  $\theta_{\text{RF}}$  和  $\theta_{\text{FSO}}$ 。

$k=16\sim 1024$  的短快速旋风码不仅满足了高速解码的要求,而且译码开销很低。在现场可编程门阵列(FPGA)中使用  $k=16$  的硬件编解码器验证了链路的可行性。当  $k=16$  时,系统数据吞吐量能够

表 2 互补通信系统主要切换算法的特性分析

Table 2 Characteristic analysis of main switching algorithms in complementary communication system

Parameter	SNR threshold	Time and power delay	Trend prediction	RMS power detector	Packet-level Raptor codes
Traffic rate	Medium	Low	Medium	Low	High
Bit error rate	Low	Low	Low	High	Low
Reliability	High		High		Low
Channel resource utilization	Low	Low	Low	Low	High
Decoding overhead	Low				Low
Hardware implementation complexity			High	Low	Low

基于功率检测器输出电压特性的切换算法虽然硬件实现复杂度较低,但是误码率较高,所以在互补通信系统的切换中并不实用。基于 FSO 信噪比阈值的切换算法误码率低且可靠性高,特别是在双阈值的情况下切换系统的中断概率很低,系统稳健性很好。基于时间滞后与功率滞后的切换算法在时间和功率上对切换的执行增加了一定的滞后性,目的是保证切换的可靠性。基于被动趋势预测与主动趋势预测的切换算法是对通信信道条件的一种预测,能够提前保证切换的正确性。但是因为机器学习过程中需要大量数据,所以在硬件实现时复杂度会较高。基于数据包级的短快速旋风码软切换不同于前 4 类算法,由于是软切换,可以同时利用两种信道,因此其信道资源利用率较高。此外,该算法的译码开销较小,硬件可实现复杂度低,但可靠性低。除了上述几种算法,栗嘉等<sup>[35]</sup>还提出了基于网络丢包率的混合 FSO/RF 系统切换判决机制。

由于先验知识的缺乏,互补通信系统的切换算法难以同时保证其结果的唯一性。针对各类算法存在的问题,对其进行改进,寻找最可靠最高效的切换算法是互补通信系统的一个研究方向。

### 3.2 近距离湍流效应问题与自适应光学补偿技术

为了实现长距离的 FSO 通信,有若干关键问题亟待解决。除了云能阻断链路,数十数百千米的大气湍流也能阻断链路。湍流还会导致激光光束发

散、发生干扰及光束消散,导致链路另一端的接收功率减小,大气湍流造成的功率闪烁有时甚至能达到 1000 倍。所以为了保证互补通信系统中 FSO 通信部分的正常工作,需解决湍流效应带来的影响,对此,自适应光学(AO)<sup>[36]</sup>有较好的补偿效果。

#### 3.1.3 互补通信切换算法分析

为了更清晰地明确上述 5 大类互补通信系统切换算法的优缺点,从算法的通信速率、误码率、可靠性及信道资源利用率等方面进行了分析(见表 2)。

自适应光学系统能够提高链路性能,但受到天线孔径大小、相位补偿执行机构数量、链路带宽和工作距离的限制<sup>[18]</sup>。自适应光学系统的作用距离是由瑞利范围(又称菲涅耳距离)决定的。即当超过一定距离时,产生的相差无法再通过接收端和发射端的望远镜进行自适应相位补偿。补偿范围与发射孔径及激光波长的关系可表示为

$$R \approx \frac{\Phi^2}{\sqrt{2}\lambda} = \frac{0.7\Phi^2}{\lambda}, \quad (1)$$

式中: $\Phi^2/\lambda$  为散射理论中的菲涅耳距离。当  $\Phi = 0.1 \text{ m}$  时,

$$R \approx 0.7 (0.1 \text{ m})^2 / (1.55 \times 10^{-6} \text{ m}) = 4.5 \text{ km}. \quad (2)$$

图 11 为采用自适应光学系统的机载 FSO 通信链路示意图,图中 tip/tilt 表示泽尼克多项式,用来描述波前特性。自适应光学系统在发射端和接收端能够补偿瑞利范围内的气动光学边界效应和湍流效应。此外,还能应对穿越整个路径的激光光束消散问题,并使光束更好地耦合进接收机光纤中。

表 3 为基于上述原理设计的接收端和发送端采用



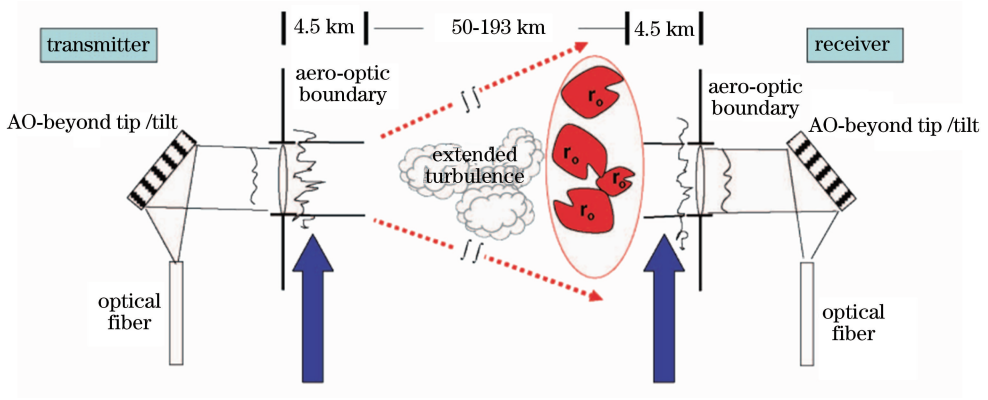


图 11 带有自适应光学补偿的激光通信链路

Fig. 11 Laser communication link with adaptive optics compensation

表 3 强湍流下 ( $C_n^2 = 1.45 \times 10^{-14}$ ) 有无自适应光学补偿的系统性能对比

Table 3 Performance comparison of systems with and without adaptive optics compensation under strong turbulence

( $C_n^2 = 1.45 \times 10^{-14}$ )

Transmitter adaptive optics status	Receiver adaptive optics status	Measured PIB /dBm	Measured PIF /dBm	Transmitter correction distance /m	Receiver correction distance /m	Measured PIB /dBm	Measured PIF /dBm
On	On	0.0	-10.0	4,950	4,950	-1.2	-11.3
On	Off	-2.0	-22.0	4,600	0	-5.9	-20.9
Off	On	-12.0	-23.0	0	7,900	-9.0	-27.1
Off	Off	-12.5	-	0	0	-12.5	-34.0

自适应光学系统前后的系统性能对比,能够看出,无论在发射端还是接收端,自适应光学系统都能一定程度改善桶中功率(PIB)和光纤功率(PIF)。来自瑞利范围之外的大气湍流效应影响只能通过其他手段补偿。

自适应光学对 FSO 通信畸变波前的校正能够实现采用更小的初始光功率得到更好通信质量的目的。模糊控制与 PID 相结合的模糊校正方法再结合快速波面重构算法<sup>[37]</sup>,能够摆脱对变形镜响应模型的依赖,以增加校正的适应性,降低系统光路安装调试难度,提高校正效率。此外,基于随机并行梯度

下降(SPGD)算法的无波前传感器自适应光学校正系统对远场的畸变波前进行校正<sup>[38]</sup>,可使远场光斑能量更加集中,对通信质量的提高更有效。

### 3.3 远距离湍流效应问题与光自动增益控制技术

对于远距离的 FSO 链路,大气各种效应的影响非常严重,虽然自适应光学能够补偿,但距离非常有限,亟需利用其他技术解决长距离补偿。美国 JHU-APL 针对此问题研发了光自动增益控制(OAGC)前向设计的光调制解调系统<sup>[18]</sup>,用于补偿瑞利范围之外的大气湍流效应,其结构框图如图 12 所示。

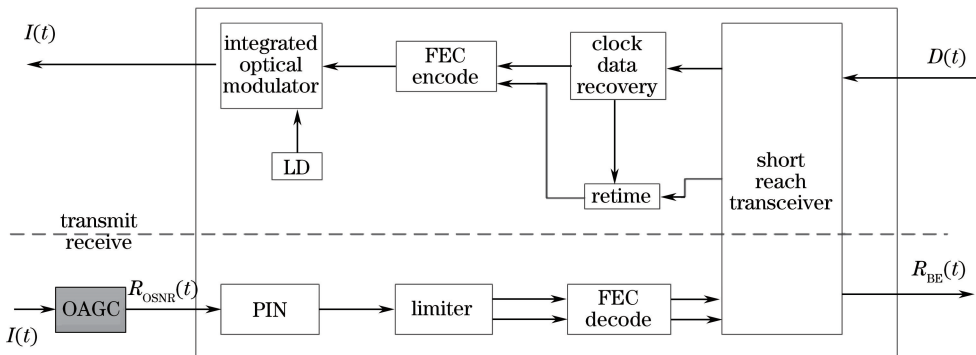


图 12 光调制解调器结构框图

Fig. 12 Structural diagram of optical modem

发送端的调制器将待发送信号  $D(t)$  进行前向纠错编码(FEC),以减少远距离传输给系统误码率  $R_{BE}$  带来的影响,然后对发送激光进行调制,得到已调光信号  $I(t)$ 。接收端的解调器前的 OAGC 系统将时变的光信号  $I(t)$  变换为光幅为常量而光信噪比变化的信号  $R_{OSNR}(t)$ 。OAGC 系统采用前向设计,能够在亚毫秒时间尺度内将闪烁的信号平均功率控制在合理的范围内,避免光电探测饱和或损伤光电探测器。该 OAGC 能够控制强湍流带来的接

收信号光功率超过 40 dB 的闪烁。

图 13 为 OAGC 对系统眼图的改善情况。采用 PIN/TIA/Limiting amplifier 组合的测试链路传输速率为  $10 \text{ Gbit} \cdot \text{s}^{-1}$ ,接收功率为  $-2 \text{ dBm} \sim -16 \text{ dBm}$ ,以  $10 \text{ kHz}$  的正弦波形式闪烁变化。图 13(a)没有采用 OAGC,眼图未睁开。因为存在符号间干扰,误码率较高。图 13(b)清楚地显示,OAGC 开启时 FSO 链路的接收信号眼图睁开较大,误码率也从  $1.2 \times 10^{-6}$  降到  $10^{-12}$  (零误码)。

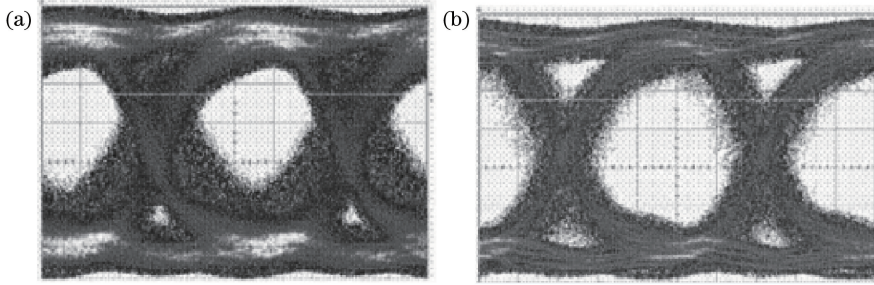


图 13 OAGC 对 FSO 链路信号眼图的影响。(a)无 OAGC;(b)有 OAGC

Fig. 13 Effect of OAGC on eye diagram of FSO link signal. (a) Without OAGC; (b) with OAGC

光自动增益控制的一种技术是在掺铒光纤中,通过控制激光和信号光共同消耗光纤放大器上的能级粒子数来控制增益。李国玉等<sup>[39]</sup>提出了一种增益控制掺铒光纤放大器的新颖结构,其新颖之处是利用高双折射光纤布拉格光栅作为双激光的振荡源和利用偏振控制器来改变内部的偏振损耗。该系统有较高的增益,双激光控制的掺铒光纤放大器系统稳定性较强,有效增强了自动增益控制系统的稳定性。此外,贾东方等<sup>[40]</sup>提出了光纤布拉格光栅双波长全光自动增益箝制方案,该方案在设计双波长全光自动增益箝制掺铒光纤放大器时,为了取得足够大的信号增益,两箝制波长的波长间隔尽量大。光自动增益控制的目的是实现高增益、稳定增益,以适应在不同湍流强度下 FSO 通信的接收光处理,提高通信质量,保证通信稳定性。

### 3.4 RF 通信链路多径效应问题与自适应均衡技术

RF 通信链路也是互补通信系统的重要组成部分。在 RF 通信链路中,由于地面、海面或者其他物体的反射,电磁波的传播路径并不单一,多路信号到达接收端的时间不一,导致接收出现问题。值得注意的是多径效应会带来时延扩展,当时延扩展远小于一个码字持续的时间时,认为信号同时到达接收端,不会造成符号间干扰;但当时延扩展和一个码字持续时间相差较小时,多径效应会导致符号间干扰。

美国空军研究实验室、美国国防部高级研究计划局和约翰霍普金斯大学在 IRON-T2 项目<sup>[41]</sup>中,为了减少多径效应给 FSO 与 RF 互补通信系统带来的影响,采用了判决反馈均衡器(DFE)来决定各路径信号的增益<sup>[42]</sup>。判决反馈均衡器如图 14 所

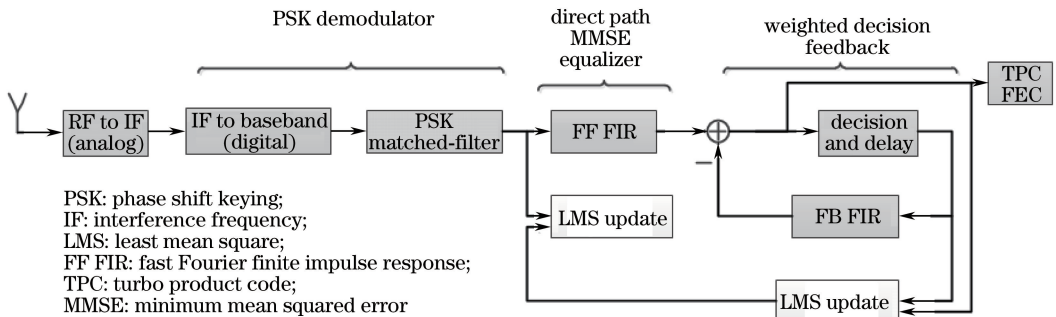


图 14 DFE 方框图

Fig. 14 Block diagram of DFE

示。在该系统中,RF 链路使用信号与干扰加噪声的比值(SINR)来度量信号的质量,而没有使用信噪比,这是因为接收信号中夹杂着很多地面反射信号,地面反射信号不属于噪声,但会对接收端造成干扰。该系统 RF 链路采用 Ku 波段的正交相移键控(QPSK)信号,可以用以下等价基带信号表示,即

$$x(n) = \sqrt{E_b} d(n) \exp[j\theta(n)], \quad (3)$$

式中: $E_b$  为比特能量; $d(n)$  为振幅; $\theta(n)$  为滤波脉冲输出在  $n$  时刻的相位。

接收信号包括两部分,第一部分是视距传输的信号,第二部分是通过反射路径到达接收端并附加延时  $D$  的部分,延时  $D$  用符号个数来度量。每条路径的信道响应都是时变的,且都会使信号到达时间各不相同。在某一时刻  $n$  接收到的复合信号可以表示为每个符号  $x(n)$ 、信道响应  $h_l(n)$  和反射信道的  $q_m(n)$  加权线性组合,即

$$y(n) = \sqrt{E_b} \sum_{l=0}^{L-1} h_l(n) \cdot x(n-l) + \sqrt{E_b} \sum_{m=0}^{M-1} q_m(n) \cdot x(n-D-l) + \delta(n), \quad (4)$$

式中:第一项包含  $L$  项视距信号成分,第二项包含延时了  $D$  个符号的  $M$  个反射信号,第三项  $\delta(n)$  表示某一时刻  $n$  接收到的噪声。因此,接收机接收到的信号能量包含来自多个符号延迟的信号,其幅值和相位各不相同,导致符号间产生干扰。理想信号是第一项中  $l$  取 0 的部分,即

$$y(n) = \sqrt{E_b} h_0(n) \cdot x(n), \quad (5)$$

符号间干扰的成分可表示为

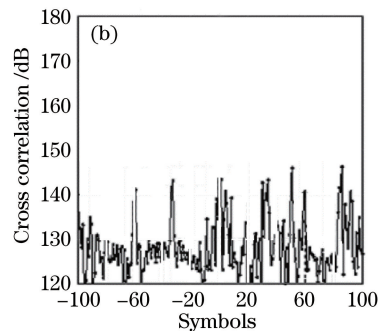
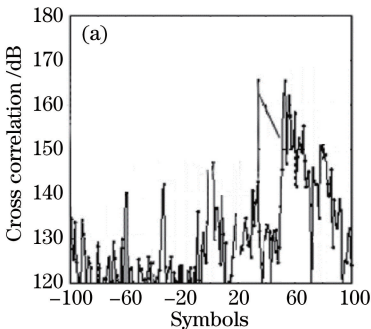


图 15 均衡前后系统性能。(a)均衡前;(b)均衡后

Fig. 15 System performances before and after equalization. (a) Before equalization; (b) after equalization

在高速自适应均衡器研究与设计中,有一种结合线性均衡器和 2 抽头系数判决反馈均衡器的均衡系统<sup>[44]</sup>,判决反馈均衡器采用半速率结构和“预判决”结构以减轻时序要求,并采用自适应算法和阈值跟踪技术以实现时变信道自适应均衡。此外,带二

$$I_0(n) = \sqrt{E_b} \sum_{l=1}^{L-1} h_l(n) \cdot x(n-l) + \sqrt{E_b} \sum_{m=0}^{M-1} q_m(n) \cdot x(n-D-l) + \delta(n). \quad (6)$$

组合信道效应可以由多径传播中的非相干平坦衰落和非相干频率选择性衰落的叠加建模。每条延时路径的幅度可以由复杂高斯随机变量建模。

如果相对于视距路径反射路径的延迟太大,延迟分散将导致最优线性滤波方案很难实施,并且地形和通信双方的位置变换带来的反射信号的时变延迟会导致滤波方案更难实施。因此,需要采用判决反馈均衡器解决长延迟路径的干扰,该均衡器是一种限制长度的 RAKE 接收机,消除前馈部分的线性干扰可解决后续的符号间干扰。采用多径分集接收技术能在时间上分辨出细微的多径信号,将分辨出来的多径信号分别进行加权调整,使之复合成加强的信号,这样既解决了干扰问题,又增强了有效信号。IRON-2 项目使用在夏威夷采集的数据,以信号与干扰加噪声的比值为度量标准验证了判决反馈均衡器的性能<sup>[43]</sup>。

图 15 展示了均衡器均衡前后的干扰抑制情况,时延可由信号互相关计算得到,故采用互相关表征各个传输符号的时延情况。图 15(a)为均衡器前的信号延迟情况,在 40 到 100 之间信号延迟较大,图 15(b)是均衡器后的信号延迟情况,各符号时延均衡,说明噪声得到了明显抑制。如图 16 所示,根据恢复后的判决数据绘制的星座图能够更加直观地定性地看出噪声的改善情况。

阶数字锁相环快速收敛载波恢复修正的超指数迭代判决反馈盲均衡算法<sup>[45]</sup>在 FSO 通信中可以很好地对旋转相位进行跟踪和补偿,提高载波恢复性能,降低误码率,与常规的盲均衡算法相比,其在收敛速度、稳健性和抗干扰能力等方面优势明显。

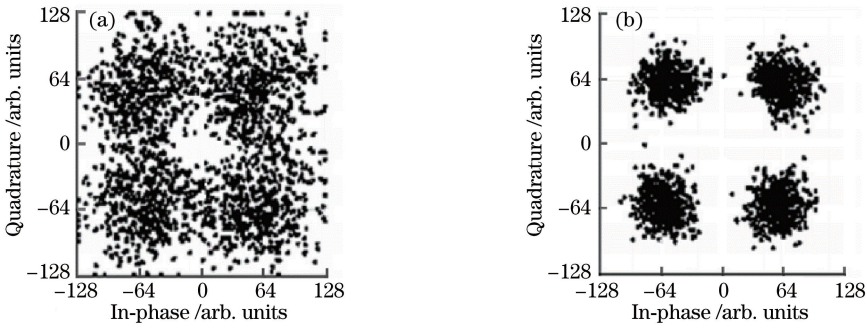


图 16 应用 DFE 后系统信噪比的改善。(a)均衡前;(b)均衡后

Fig. 16 Improvement in SNR after adopting DFE. (a) Before equalization; (b) after equalization

### 3.5 天气条件影响问题与频率选择研究

在互补通信系统中,两种通信链路信号频率选择非常重要。因为不同波长的信号在大气中受到的影响各不相同,正确选择频率能够有效降低大气对通信系统性能的影响。FSO 链路对天气条件具有极高的依赖性,为了提高通信可靠性,可以利用如图 17 所示的 3 个波长窗口<sup>[25]</sup>进行激光频率选择,但也需慎重选择 FSO 与 RF 互补通信系统中的 RF 通信频段。雾、雨和雪对不同频段 RF 信号的干扰是不同的。

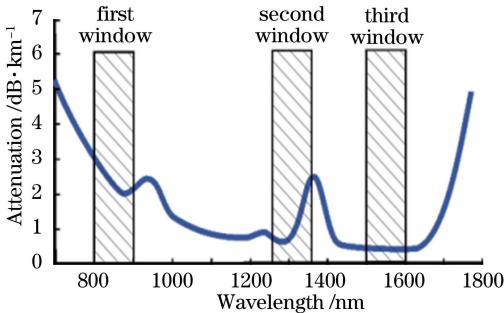


图 17 光学窗口

Fig. 17 Optical windows

雾中水分子对超过 10 GHz 的 RF 信号造成散射和严重衰减,但当频率低于 10 GHz 时,影响基本可以忽略。当雾中水滴尺寸小于 0.01 cm 且通信频率不超过 200 GHz 时,瑞利近似依然适用。每单位容量的水含量可以用来计算衰减。具体的衰减计算公式为

$$\gamma_{\text{fog}} = K_1 \rho, \quad (7)$$

式中: $\gamma_{\text{fog}}$  为雾中的具体衰减,单位为 dB/km; $K_1$  为具体衰减系数,单位为  $(\text{dB} \cdot \text{km}^{-1})/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $\rho$  为雾中的液体水密度,单位为  $\text{g}/\text{m}^3$ 。具体衰减系数可以通过基于瑞利散射的数学模型计算<sup>[43]</sup>。该模型采用双德拜模型计算水的介电常数  $\epsilon(f)$ ,具体衰减系数计算公式为

$$K_1 = \frac{0.819f}{\epsilon''(1 + \eta^2)}, \quad (8)$$

式中: $f$  为频率,单位为 GHz; $\epsilon$  为复杂介电常数, $\eta$  计算公式为

$$\eta = \frac{2 + \epsilon'}{\epsilon''}. \quad (9)$$

相对于雾、云和灰尘颗粒,当信号频率高于 10 GHz 时,雨才是造成 RF 信号衰减的主要因素。降雨量与实际衰减之间的关系为

$$\gamma_{\text{rain}} = k'R^\alpha, \quad (10)$$

式中: $k'$  和  $\alpha$  根据信号频率和雨的微结构而定,两种常用的雨衰减预测模型分别为 ITU-R 陆地模型<sup>[46]</sup>和 Crane<sup>[42]</sup>模型。(10)式中  $k'$  和  $\alpha$  可根据选用的信号频率结合相应的模型计算得出。

雪对 RF 通信的衰减很难分析,因为雪花的物理特性决定了其类别、外型、介电常数以及尺寸分布。文献[43]中阐述的具体衰减计算公式为

$$\gamma_{\text{snow}} = 0.00349 \frac{S^{1.6}}{\lambda^4} + 0.00224 \frac{S}{\lambda}, \quad (11)$$

式中: $S$  为降雪量; $\lambda$  为信号波长。

互补通信系统中 RF 通信的频率选择不仅需要考虑地形和天气状况,还需考虑该频段设备的开销,根据上述 3 种衰减估计的方法,结合当地实际数据,即可得出适合特定地域的 RF 通信频率。文献[47]中详细描述了通过上述思路找出最适合奥地利格拉茨并用于互补通信系统的 RF 信号频率。

## 4 发展动向与展望

近年来,国外有关互补通信系统的研究日益增加,取得了一系列成果,但相关系统技术和性能还不足以满足实用要求。实现互补系统的实际应用还需解决以下的关键技术。

### 4.1 高速通信硬件

虽然 RF 通信中很多相关的软硬件已经很成

熟,但FSO通信采用的信息载体是频率为 $10^{14}$ 量级赫兹的激光,对器件的速率要求很高,传统器件很难满足需求。如互补通信系统中FSO通信系统的通信部分,激光器、光调制解调器、编解码器、滤波器和光电探测器都须持续不断地创新和研究<sup>[48]</sup>。PIN光电探测器作为FSO通信系统的核心器件,其本身具有一些优点,如低暗电流、低寄生电容、大带宽灵敏度、制作工艺简单等。为适应FSO通信的应用环境,要求探测器的光敏面面积足够大。但光电探测器的面积越大,器件的电容就成比例地变大,器件的工作带宽成比例下降,所以研制大面积、高响应速度、大信噪比和大动态范围的光电探测器成为当下研究热点。同样,高速的光学锁相环研究<sup>[49]</sup>也至关重要,分析相位噪声误差,建立误差因素、探测灵敏度以及环路带宽之间的关系必不可少。类似光电探测器和光锁相环这样的其他硬件研究还有很多。

#### 4.2 高性能捕获、对准和跟踪(APT)技术

在互补通信系统中,RF链路中的电磁波在自由空间中以辐射形式传播,对准指向不难。但点对点传输的FSO通信链路中光信号的APT系统的要求较高,不仅要考虑机械振动,还要考虑背景杂光和大气湍流的影响<sup>[50]</sup>。背景里面的杂光不仅会影响目标的获取和跟踪,还会因为系统可能被背景杂光形成的假目标而欺骗。大气湍流引起接收光信号的相位变化,导致信标光光斑形状随机变化,从而影响跟踪精度。大气湍流会使信标光闪烁和漂移,从而导致跟踪间断和不稳定。对于快速移动的终端而言,周围空气的流动性也会影响系统性能,所以为保证互补通信系统成为工程实际应用,还须考虑气动光学效应,应加强对大气湍流、快速反应反射镜以及背景杂光削弱方法进行研究。鉴于上述问题,很有必要加强更加实际的研究,如分析以卡式望远系统作为光学天线时,大气激光通信APT系统中四象限光电探测器光敏面上环形光斑位置检测的误差问题<sup>[51]</sup>、不同分辨率数模转换器对FSO通信的ATP系统性能的影响情况<sup>[52]</sup>等。

#### 4.3 不同应用场景的总体技术

不同的应用场景给互补通信系统带来了各种不同的机遇和挑战,想要获得新的发展空间,必须针对不同的应用场景开发不同的新技术。互补通信系统作为一种多学科融合的技术,新技术的不断突破将推动其不断发展。互补通信系统的总体技术极其重要,将通信、光学、控制、图像处理和机械有效地结合在一起,再针对不同的应用场景开发相应的新技术,

将成为互补通信的重要发展方向。

#### 4.4 终端组网问题

互补通信系统终端组网问题的挑战在于将各终端组成大容量高可靠的骨干网络。对于大气层外的飞行器、空间探测器和大气层内的飞机、地面移动与非移动的终端,如何将其有效结合并构成精密稳定的网络至关重要,或许可通过移动自组织网络(MANET)<sup>[48]</sup>实现。解决容忍链路从几毫秒到几十秒中断的能力非常具有挑战性,不仅需要解决应用的服务质量限制,还要解决类似传输控制协议的网络协议的问题。此外,可扩展性也是一个重要课题,其需要深空的、近地的、地面的还有海上的各节点都能随时增加或减少,不仅要灵活变动,还要保证其安全性和可靠性。节点数目有限,但必须保证网络有支持大量互联网协议地址通信节点接入的能力。此外,网络的数据率必须在一定的动态范围内,这要求系统的硬件和软件都有相应的适应性。

## 5 结束语

介绍了FSO与RF互补通信系统的基本原理和整体框架,综合近年来国外互补通信系统的发展情况,阐述了互补通信系统面临的关键问题和解决问题的关键技术。

近年来,FSO与RF互补通信系统正逐渐被公众认识,FSO通信也不断地取得新的技术突破。FSO与RF互补通信系统作为未来一种重要的通信发展方向,结合FSO通信和RF通信的优势,能够满足未来信息传输的高速、安全以及高可靠性的要求。随着互补通信系统研究的逐步深入,未来的应用前景将不断扩展,尤其是需要无线远距离传输大量信息的场景,如在太空中的高分辨率成像卫星数据回传和合成孔径雷达数据传输方面,相信在不久的将来,互补通信系统将会取代传统的通信方式,成为高速、安全和高可靠性的信息传输领域的重要力量。

## 参 考 文 献

- [1] Bojic D, Sasaki E, Cvijetic N, *et al.* Advanced wireless and optical technologies for small-cell mobile backhaul with dynamic software-defined management [J]. IEEE Communications Magazine, 2013, 51(9): 86-93.
- [2] Khalighi M A, Uysal M. Survey on free space optical communication: A communication theory perspective [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials.

- 2014, 16(4): 2231-2258.
- [3] Uysal M, Nouri H. Optical wireless communications: An emerging technology[C] // 2014 Conference on Transparent Optical Networks (ICTON), July 6-10, 2014, Graz, Austria. New York: IEEE, 14526239.
- [4] Murphy D V, Kinsky J E, Grein M E, *et al.* LLCD operations using the lunar lasercom ground terminal [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710V.
- [5] Sodnik Z, Smit H, Sans M, *et al.* LLCD operations using the lunar lasercom OGS terminal [J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710W.
- [6] Biswas A, Kovalik J M, Wright M W, *et al.* LLCD operations using the optical communications telescope laboratory (OCTL)[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710X.
- [7] Oaida B V, Wu W, Erkmen B I, *et al.* Optical link design and validation testing of the optical payload for lasercomm science (OPALS) system[J]. Proceedings of SPIE, 2014, 8971: 89710U.
- [8] Sindiy O, Abrahamson M, Biswas A, *et al.* Lessons learned from optical payload for lasercomm science (OPALS) mission operations [C] // AIAA SPACE 2015 Conference and Exposition, AIAA SPACE Forum (AIAA 2015-4657), 2015: 1-11.
- [9] Biswas A, Oaida B, Andrews K S, *et al.* Optical payload for lasercomm science (OPALS) link validation during operations from the ISS [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354: 93540F.
- [10] Böhmer K, Gregory M, Heine F, *et al.* Laser communication terminals for the European data relay system [J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8246: 82460D.
- [11] Heine F, Mühlwinkel G, Zech H, *et al.* The Europeandata relay system, high speed laser based data links [C] // 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC), September 8-10, 2014, Livorno, Italy. New York: IEEE, 14699390.
- [12] Heine F, Mühlwinkel G, Zech H, *et al.* LCT for the European data relay system: in orbit commissioning of the Alphasat and Sentinel 1A LCTs [J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9354: 93540G.
- [13] Kolev D R, Takenaka H, Munemasa Y, *et al.* Overview of international experiment campaign with small optical transponder (SOTA) [C] // 2015 Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE, 15838634.
- [14] Phung D H, Samain E, Maurice N, *et al.* Telecom & scintillation first data analysis for DOMINO - laser communication between SOTA, onboard socrates satellite, and MEO OGS [C] // 2015 Conference on Space Optical Systems and Applications (ICSOS), October 26-28, 2015, New Orleans, LA, USA. New York: IEEE, 15838631.
- [15] Takenaka H, Koyama Y, Akioka M, *et al.* In-orbit verification of small optical transponder (SOTA): evaluation of satellite-to-ground laser communication links[J]. Proceedings of SPIE, 2016, 9739: 973903.
- [16] Anees S, Bhatnagar M R. Performance evaluation of decode-and-forward dual-hop asymmetric radio frequency-free space optical communication system [J]. IET Optoelectronics, 2015, 9(5): 232-240.
- [17] Anees S, Bhatnagar M R. Performance of an amplify-and-forward dual-hop asymmetric RF-FSO communication system [J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2015, 7(2): 124-135.
- [18] Stotts L B, Andrews L C, Cherry P C, *et al.* Hybrid optical RF airborne communications[J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97(6): 1109-1127.
- [19] Zech H, Heine F, Tröndle D, *et al.* LCT for EDRS: LEO to GEO optical communications at 1.8 Gbps between Alphasat and Sentinel 1A[J]. Proceedings of SPIE, 2015, 9647: 96470J.
- [20] Munemasa Y, Fuse T, Kubo-Oka T, *et al.* Design status of the development for a GEO-to-ground optical feeder link, HICALI [J]. Proceedings of SPIE, 2018, 10524: 105240F.
- [21] Kim I I, Korevaar E J. Availability of free-space optics (FSO) and hybrid FSO/RF systems [J]. Proceedings of SPIE, 2001, 4530: 84-96.
- [22] Leitgeb E, Gebhart M, Birnbacher U, *et al.* High availability of hybrid wireless networks [J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5465: 238-250.
- [23] Abadi M M, Ghassemlooy Z, Zvanovec S, *et al.* Dual purpose antenna for hybrid free space Optics/RF communication systems [J]. Journal of Lightwave Technology, 2016, 34(14): 3432-3439.
- [24] Shu F, Ao F L, Liao X D. Research on automatic switch conditions for hybrid FSO/RF system [J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2008, 28(1): 1-4.
- 舒芳, 敖发良, 廖新鼎. 混合 FSO/RF 系统自动切换

- 条件的研究[J]. 桂林电子科技大学学报, 2008, 28(1): 1-4.
- [25] Tatarko M, Ovsenik L, Turán J. Management of switching in hybrid FSO/RF link[C]//Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC), May 27-30, 2015, Szilvasvarad, Hungary. New York: IEEE, 15287384.
- [26] Usman M, Yang H C, Alouini M S. Practical switching-based hybrid FSO/RF transmission and its performance analysis [J]. IEEE Photonics Journal, 2014, 6(5): 1-13.
- [27] Nock K, Font C, Rupar M. Adaptive transmission algorithms for a hard-switched FSO/RF link[C] // MILCOM 2016 - 2016 IEEE Military Communications Conference, November 1-3, 2016, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE, 16546493.
- [28] Abadi M M, Ghassemlooy Z, Zvanovec S, *et al.* Hard switching in hybrid FSO/RF link: Investigating data rate and link availability[C] // 2017 Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), May 21-25, 2017, Paris, France. New York: IEEE, 17009949.
- [29] Lee I E, Ghassemlooy Z, Ng W P, *et al.* Practical implementation and performance study of a hard-switched hybrid FSO/RF link under controlled fog environment[C] // 2014 9th International Symposium on Communication Systems, Networks & Digital Sign (CSNDSP), July 23-25, 2014, Manchester, UK. New York: IEEE, 14684047.
- [30] Zhang W Z, Hranilovic S, Shi C. Soft-switching hybrid FSO/RF links using short-length raptor codes: Design and implementation[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1698-1708.
- [31] Moradi H, Falahpour M, Refai H H, *et al.* On the capacity of hybrid FSO/RF links[C] // IEEE Global Telecommunications Conference, December 6-10, 2010, Miami, FL, USA. New York: IEEE, 2010: 1-5.
- [32] Shao J H, Su R M, Yao L, *et al.* Performance analysis of soft-switching hybrid FSO/RF links using hybrid coding and modulation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(5): 682-687.  
邵军虎, 苏润民, 姚柳, 等. 软切换 FSO/RF 链路混合编码调制算法性能分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(5): 682-687.
- [33] Shokrollahi A. Raptor codes[J]. IEEE Transactions on Information Theory, 2006, 52(6): 2551-2567.
- [34] Abdulhussein A, Oka A, Nguyen T T, *et al.* Rateless coding for hybrid free-space optical and radio-frequency communication [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(3): 907-913.
- [35] Su J, Chen H. Research on technology for switchover of hybrid FSO/RF systems using packet loss rate monitoring[J]. Optical Communication Technology, 2011, 35(10): 28-31.  
粟嘉, 陈辉. 基于网络丢包率的混合 FSO/RF 系统切换技术研究[J]. 光通信技术, 2011, 35(10): 28-31.
- [36] Lin X D, Xue C, Liu X Y, *et al.* Current status and research development of wavefront correctors for adaptive optics [J]. Chinese Optics, 2012, 5(4): 337-351.  
林旭东, 薛陈, 刘欣悦, 等. 自适应光学波前校正器技术发展现状[J]. 中国光学, 2012, 5(4): 337-351.
- [37] Liu Z W, Zhou Z Q, Li Z D. Wavefront correction technology based on fuzzy control [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(3): 030101.  
刘章文, 周志强, 李正东. 基于模糊控制的波前校正技术[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(3): 030101.
- [38] Wu J L, Ke X Z. Adaptive optics correction of wavefront sensorless [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(3): 030103.  
吴加丽, 柯熙政. 无波前传感器的自适应光学校正[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(3): 030103.
- [39] Li G Y, Dou Q Y, Liu Y G, *et al.* Optical automatic gain-clamped erbium-doped fiber amplifier based on a high-birefringence fiber bragg grating [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(9): 1308-1312.  
李国玉, 窦清影, 刘艳格, 等. 基于高双折射光纤布拉格光栅的自动增益控制掺铒光纤放大器[J]. 光学学报, 2006, 26(9): 1308-1312.
- [40] Jia D F, Wang Y Y, Bao H M, *et al.* Experimental studies on the dual-wavelength optical auto gain clamping EDFA[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(10): 1538-1541.  
贾东方, 王衍勇, 包焕民, 等. 双波长全光自动增益箝制掺铒光纤放大器的实验研究[J]. 光子学报, 2006, 35(10): 1538-1541.
- [41] Bagley Z C. Hybrid optical radio frequency airborne communications[J]. Optical Engineering, 2012, 51(5): 055006.

- [42] Crane R. Prediction of attenuation by rain[J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(9): 1717-1733.
- [43] Nadeem F, Kvicera V, Awan M, *et al.* Weather effects on hybrid FSO/RF communication link[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2009, 27(9): 1687-1697.
- [44] Li J. Research and design of high speed adaptive equalizer[J]. Information & Communications, 2018, 31(5): 67-68.  
李嘉. 高速自适应均衡器研究与设计[J]. 信息通信, 2018, 31(5): 67-68.
- [45] Chen Q, Yang X P, Da X Y, *et al.* A fast super-exponential iteration decision feedback blind equalization algorithm for carrier recovery of aeronautical channel[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2013, 44(9): 3707-3712.  
陈强, 杨霄鹏, 达新宇, 等. 一种快速收敛的航空信道载波恢复判决反馈盲均衡算法[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(9): 3707-3712.
- [46] Zhao Z W, Zhang M G, Wu Z S. Analytic specific attenuation model for rain for use in prediction methods[J]. International Journal of Infrared & Millimeter Waves, 2001, 22(1): 113-120.
- [47] Oguchi T. Electromagnetic wave propagation and scattering in rain and other hydrometeors [J]. Proceedings of the IEEE, 1983, 71(9): 1029-1078.
- [48] Wu C J, Yan C X, Gao Z L. Overview of space laser communications[J]. Chinese Optics, 2013, 6(5): 670-680.  
吴从均, 颜昌翔, 高志良. 空间激光通信发展概述[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 670-680.
- [49] Chang S, Tong S F, Jiang H L, *et al.* Optical phase-locked loop technology in inter-satellite high-speed coherent laser communication systems [J]. Acta Optica Sinica, 2017, 37(2): 0206004.  
常帅, 佟首峰, 姜会林, 等. 星间高速相干激光通信系统中的光学锁相环技术[J]. 光学学报, 2017, 37(2): 0206004.
- [50] Zeng F, Gao S J, San X G, *et al.* Development status and trend of airborne laser communication terminals[J]. Chinese Optics, 2016, 9(1): 65-73.  
曾飞, 高世杰, 伞晓刚, 等. 机载激光通信系统发展现状与趋势[J]. 中国光学, 2016, 9(1): 65-73.
- [51] Li S M, Zhang Y Q. Annular facula detection and error compensation of four-quadrant photoelectric detector in space laser communication[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(11): 1106005.  
李生民, 张圆清. 空间激光通信中四象限光电探测器环形光斑检测及误差补偿[J]. 中国激光, 2017, 44(11): 1106005.
- [52] Chen S J, Zhang L, Wang J Y. Effects of digital to analog converter resolution on ATM system tracking accuracy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(8): 0806004.  
陈少杰, 张亮, 王建宇. 数模转换器分辨率对捕获、跟踪、瞄准系统跟踪精度的影响[J]. 中国激光, 2017, 44(8): 0806004.