

光网络高精度授时体系建设策略研究

李恩¹,宋文忠²,罗青松¹,钟震林¹

(1.中国电子科技集团公司第三十四研究所,广西桂林 541004; 2.火箭军装备部驻深圳地区军事代表室,广东深圳 518000)

摘要:针对天基授时系统的可靠备份需求,分析国内外光网络授时技术现状及发展趋势,提出一种广域覆盖的地面高精度授时体系建设方案,其体系架构包含传输层、授时承载层、应用层和运维管理层等。该方案以精确时间协议/White Rabbit PTP(PTP/WR-PTP)等标准通用授时协议为基础,适配多种信道后承载于不同体制光网络中,并辅以多种手段提升授时组网性能,以满足各领域时间同步应用需求。另外,详细说明了光网络授时体系所涉及的关键技术及组网实现方案,并按分阶段演进的策略规划了未来的发展路线。

关键词:授时;光网络;时间同步

中图分类号:TN929.11 文献标识码:A 文章编号:1002-5561(2019)09-0058-05

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2019.09.013

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on construction strategy of optical network high precision time service system

LI En¹, SONG wenzhong², LUO Qingsong¹, ZHONG Zhenlin¹

(1. The 34th Research Institute of CETC, Guilin Guangxi 541004, China;

2. Military Representative Office of Rocket Army Equipment Department in Shenzhen area, Shenzhen Guangdong 518000, China)

Abstract: Aiming at the reliable backup requirement of space-based time service system, this paper analyses the current situation and development trend of optical network time service technology at home and abroad, and puts forward a construction scheme of wide-area coverage ground high-precision time service system. Its architecture includes transmission layer, time service bearing layer, application layer, operation and maintenance management layer, etc. This scheme is based on the precise time protocol/White Rabbit PTP(PTP/WR-PTP) and other standard universal time service protocols. It adapts multiple channels and carries them in different optical networks. It also improves the performance of time service network by various means to meet the requirements of time synchronization applications in various fields. In addition, the key technologies and networking achievement schemes of time service in optical fiber networks are introduced in detail, and the future development route is planned according to the strategy of staged evolution.

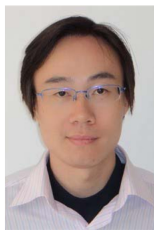
Key words: time service; optical network; time synchronization

0 引言

随着科学技术的飞速发展,时间同步应用越来越广泛,通信、电力、金融、交通、气象、农业、公共安全、国防和科研等众多领域都需要高精度的时间同步,时间同步精度的需求范围从秒量级到皮秒量级。因此,

收稿日期:2019-08-08。

作者简介:李恩(1981-),男,福建建瓯人,高级工程师,主要从事光通信技术研究,重点研究方向为OTN/DWDM授时、SDH授时、WR-PTP授时和光纤专线授时等。主持参与多项通信预研、中国电科创新基金和省级地方科研项目。



高精度的授时技术对国民经济发展和国防建设都至关重要^[1]。目前,诸多领域的精确授时主要依赖GPS和北斗等天基授时系统,一旦天基授时信号受到外界干扰或战争时期的蓄意破坏,将使得各个重要领域的时间统一系统无法正常工作,导致灾难性的后果。因此,寻求一种广域覆盖的有线授时手段作为天基授时系统的备份,已成为各个国家提升自身时间统一系统可靠性的主要办法。光网络凭借链路资源充沛、覆盖范围广和时频传递精度高等特点,使其成为承载高精度授时业务的首选。研究多体制层级式光网络授时技术,构建广域覆盖、跨网络、多层级和高可用的泛在地

面高精度授时体系,是作为卫星授时系统备份的最佳选择。

1 技术现状及发展趋势

1.1 国外现状

20世纪末开始,美国NASA一直从事光网络授时技术方面的研究和应用。随后,日本和欧洲发达国家也进行了深入的理论和实验研究。

早在2001年,日本用175 km长的2.5 Gb/s同步数字体系(SDH)光纤链路连接CRL和NTT实验室,中间经过7个中继节点;采用段开销字节(SOH)中未定义字节传输时间同步信息,并对光纤线路温度变化进行补偿,时间同步精度为32 ns^[2]。到目前为止,国际上利用SDH网络双向传输高精度时间,本地100 km的时间同步精度已达20 ps,长途2400 km的时间同步精度已优于100 ns^[3]。

2005年,日本NTT公司使用单纤双向传输技术实现了高精度的时间传递,能够在100 km范围内实现亚纳秒的授时精度。随后,该公司在链路中增加125个双向光放大器,使传输距离达到10000 km,系统的授时精度约为10 ns^[4]。

2008年,瑞典SP科技研究院利用已有的以直埋线路为主约560 km长密集波分复用(DWDM)光波长信道进行高精度时间传递实验,授时精度约为5 ns;2010年,系统改进后,授时精度提高至3 ns^[5,6]。

2016年,芬兰搭建了950 km的长距离WR-PTP的双纤授时试验网络,授时精度优于2 ns^[7]。2018年,美国国家标准与技术研究院NIST构建了10 km的分布式WR-PTP授时网络,授时精度优于200 ps^[8]。

国外光网络授时的技术手段较为丰富,由于承载信道、网络距离和组网模式不同,授时精度差异也较大,但总体而言在授时精度、组网能力和授时距离上都实现了较好的性能指标。

1.2 国内现状

21世纪初,国内光网络授时技术发展如火如荼;在光纤专线授时技术研究方面,中科院、清华大学、上海交通大学和陆军工程大学等多家单位实现了超高精度的光纤时频传输,授时精度均优于纳秒量级^[9,10]。2018年,中国科学院“高精度地基授时系统”项目获批,该项目旨在利用通信光纤网建设覆盖主要城市和重要用户的高精度光纤时频传递骨干网,时间传递精度优于百皮秒^[11]。此外,基于量子的光纤授时技术已成为新兴的研究方向,未来将逐步走向实用化^[12,13]。

随着网络All-IP化的长期演进,基于分组数据架构的PTP精确时间同步(IEEE 1588v2)协议的应用越来越广泛,PTP over Everything的光网络授时组网技术逐渐成为主流。

2017年,国家电网在SDH网络中采用PTP over E1的方式开展小规模授时组网试用,在数百千米传输链路条件下,授时精度达到百纳秒量级^[14]。

2017年,国内铁路系统采用PTP over光监控信道(OSC)的授时方式实现了铁路通信网络北京至广州站点间的时间同步,精度测试结果优于 $\pm 1 \mu\text{s}$ (24 h内),PTP同步链路倒换产生的相位瞬变小于51 ns^[15]。

2010年,分组传送网(PTN)各运营商的传输设备已完全支持PTP报文传输;在中国移动试点网络中,经过30跳节点时间同步情况下,节点同步精度仍优于270 ns^[16]。

2012年,烽火通信研究了以太无源光网络(EPON)的PTP同步技术,采用SyncE+BC模式组建授时网络,授时精度优于10 ns^[17]。

2014年,WR-PTP(White Rabbit PTP)授时技术被用于LHAASO大型物理装置的超高精度时间同步,多节点短距离组网的同步精度优于1 ns^[18,19]。

综上所述,国内光纤专线授时技术在精度上亮点突出,性能指标达到国际先进水平;而PTP类授时协议则呈现较好的网络适应性,可承载于SDH、光传送网(OTN)、PTN、EPON和分组网等多种体制的光传输网络。

1.3 发展趋势

光纤专线授时采用波长直接承载授时信号,时频传输处理较为扁平化,具有极佳的精度优势,在距离上也满足广域覆盖要求。但实现方法各不相同,在通用性上有一定不足;再者,大部分光纤授时技术体制并非采用通信授时一体化方式,传输授时信号同时不能承载操作管理维护(OAM)信息,不利于规模化组网管控;此外,要实现超高精度传输,还需对网络进行一定的改造,代价较大。因此,光纤专线授时更适用于为少数需要超高精度的主要和关键用户提供授时手段。

为增强光网络授时业务覆盖的泛在性,需采用网络适应能力、组网能力和易管控能力更强的授时协议,以更好地适配不同光网络传输信道。鉴于PTP类授时协议的标准化、通用化、通信授时一体化承载和便于组网等特性,该技术已成为大多数光网络授时应用的首选方式。虽然当前未能形成广域覆盖的大型同步网络,但得益于其良好的互通性和网络适应性,未

来完全可形成规模化组织应用的光网络授时体系,实现不受网络结构、设备类型、节点数量和地理气候等限制的全天候授时。当然,未来仍需进一步更好地解决 PTP 协议在不同网络体制传输信道的适应性;研究各类补偿算法,提升广域授时条件下的同步精度;在运维管理方面,逐步形成跨域的统一时间管理系统;在时间应用方面,针对不同的需求能提供不同等级时间服务。

2 建设方案

2.1 体系架构

光网络高精度授时体系的建设应秉承标准化、通用化的体系适应原则,充分贯彻“广域覆盖、适应网络、精确传递、抗毁顽存和可用可靠”设计思想,以高精度授时业务与通信业务一体化承载传输为目标。本文在现有网络结构基础上,采用分层分面的设计模式,构建满足跨域传输、授时路径自适应、一体化管控和多方式补偿的高精度授时网络架构,如图 1 所示。

光网络授时体系主要由传输层、授时承载层、应用层和运维管理层组成。传输层是光网络授时的关键

传输通道和基础支撑,包括物理层和适配层 2 个子层。物理层主要为 OTN/DWDM、SDH、PTN、EPON、分组网和光纤专线等各类光传输网络,提供授时信息的传输通道;由于物理层中某些业务或开销信道特性不同,并不能兼容 PTP 协议的直接传输,因此需通过适配层将 PTP 协议进行特定的解析封装,实现授时业务的多层级、跨网络和跨域承载。

授时承载层包括授时协议、性能提升和时间接口等子层。其中,授时协议子层包括 PTP/WR-PTP 授时组网协议和光纤/波长专线授时协议。前者基于分组数据报文传输架构,优点在于该协议具有很好的标准化和通用化特性,有利于规模化的授时组网;后者优点在于满足长距离和超高精度的特殊同步需求。性能提升子层通过对光纤温度效应、色散效应、Sagnac 效应和光纤链路不对称等授时偏差因素进行补偿,提升广域网络的授时准确度;通过卡尔曼滤波及比例积分微分(PID)时间驯服等手段,提升授时的长期稳定度。在复杂拓扑网络条件下,各节点的授时路径可以灵活变化,其最终的同步精度可能因途经节点数量及光纤长度的不同而大相径庭,因此需建立整网的时延特性数

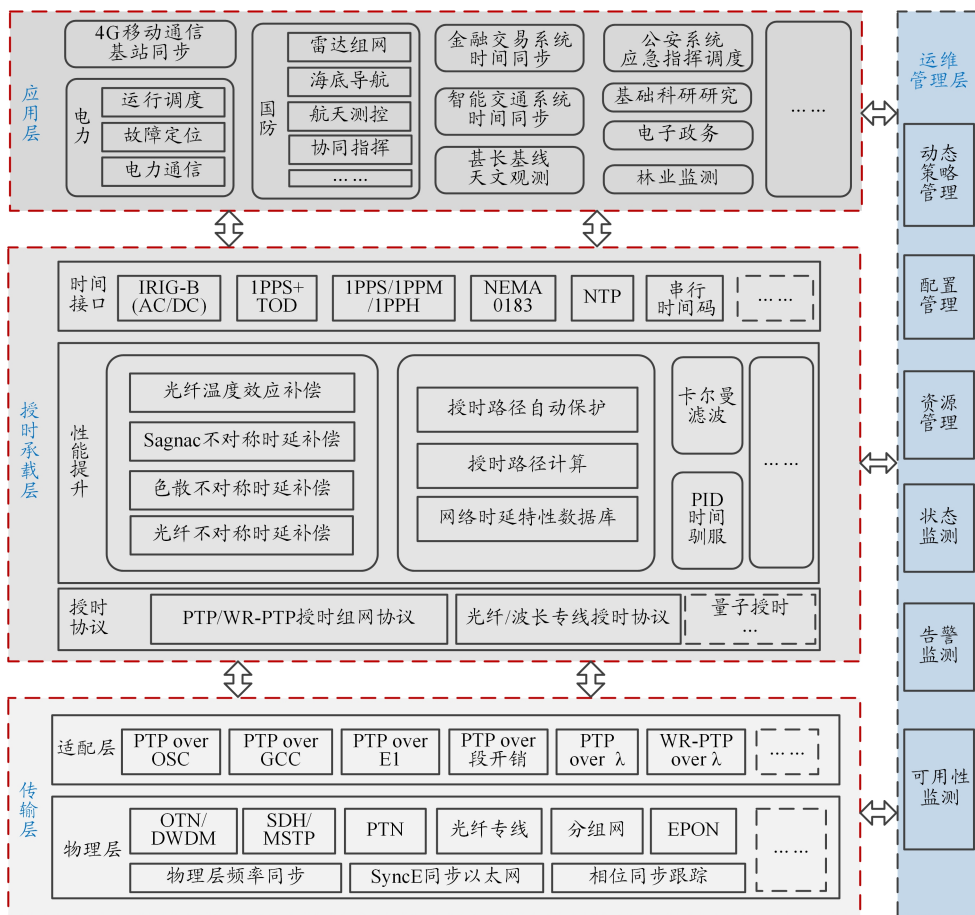


图 1 光网络高精度授时体系架构

据库,并通过授时路径计算单元,自动选择最佳的授时路径等功能,优化授时网络的整体时间同步精度。此外,当默认授时路径不可用时,还应能切换至其它可用路径。时间接口子层直接面向应用层用户,为其提供各类格式和各种精度要求的标准时间信号,应能满足个性化用户的不同需求。

应用层主要针对各领域时间同步系统的具体需求,构建不同的时间运维管理软件接口,结合授时承载层和传输层特性,为其提供不同等级的时间同步服务。由于最终应用环境和背景纷繁复杂,时间同步用户的需求在覆盖范围、节点数量、授时精度和可用性等级等方面均存在差异,需通过运维管理层中动态策略管理单元进行授时资源调配,确保满足用户性能指标要求。

运维管理层用于光网络授时体系的动态策略管理、配置管理、资源管理、状态监测、告警监测和可用性监测等。其中,策略管理单元依据用户的具体需求,选择适当的授时信息传输方式、性能提升策略和时间接口输出;配置管理单元完成授时承载层及传输层中授时业务的相关配置;资源管理单元依据用户不同服务等级,将授时体系网络中的资源进行合理分配。状态监测、告警监测和可用性监测等单元主要用于监测光网络授时体系中的各层级的信道资源状态、同步状态等信息,提示并记录各类非正常工作告警信息,实时监测时间信号可用度等。

2.2 关键技术

光网络高精度授时体系的关键技术主要有:①在总体技术方面,包含整个光网络授时的需求分析与系统建模、网络体系架构演进及授时性能的软件仿真等。②在传输层,物理层时钟同步和同步以太网技术用于实现各类网络的频率同步;WR-PTP 相位精确同步跟踪技术实现更为严格的频率相位同步;PTP 协议智能接口适配技术实现协议接口的时延对称转换。③授时承载层涉及 WR-PTP 亚纳秒授时组网、PTP 授时组网、光纤/波长专线授时、量子授时、光纤温度时延波动补偿、最佳授时路径计算、光纤时延不对称补偿、色散效应补偿、Sagnac 效应补偿、无跳变授时路径切换、PID 时间跟踪驯服、精确守时算法和多协议时间接口等关键技术。④应用层中涉及人机界面软件接口技术、地理信息系统和定制化授时软件服务等关键技术。⑤运维管理层涉及智能化动态策略选择、授时性能监测分析、资源虚拟化管理技术和多层跨域一体化管控等关键技术,未来还可通过人工智能及大数据分析提升运维管理水平。

2.3 组网实现

为实现 PTP 授时信息在不同传输网络类型光网络上的承载,本文采用了多种授时设备类型,形成多层次分布式的授时组网架构。

2.3.1 省际骨干高精度授时子网

在省际骨干光网络中,各行业专网基本都采用 OTN/DWDM 技术,未来将全面演进至 OTN 网络覆盖。省际骨干网高精度授时子网主要作用是将精确的时频基准信号分发至各级省内骨干网,通过采用 WR-PTP over λ 或光纤/波长专线授时与单纤双向传输技术相结合,辅以多种补偿算法提升性能,实现上千千米优于纳秒级的超高精度授时。为保证省内骨干授时子网的同步精度,各省至少应有一条授时链路用于承

载超高精度授时服务。同时,省际骨干网中具有丰富的信道资源,也可通过 OTN 授时设备在 OSC/专用波长等信道中承载一般性授时业务,满足不同层次的用户需求。

省际授时网覆盖范围广,传输节点多,涉及多厂家设备;需同时采用光纤温度时延波动补偿、光纤时延不对称补偿、色散效应补偿和 Sagnac 效应补偿等技术确保授时精度;采用无跳变授时路径切换、最佳授时路径计算、多层跨域一体化管控和智能化动态策略选择等技术确保规模化组网应用。

2.3.2 省内骨干授时子网

省内骨干授时子网同样采用 OTN 网络承载授时业务为主,但其以 OSC 或业务信道授时为主,为大多数一般用户提供服务,仅为少数特殊用户提供 WR-PTP 或光线专线授时服务;而省际骨干授时网则恰好相反。其中,WR-PTP over λ 授时方式可用于省内主要城市的精确时间同步,授时服务精度在亚纳秒量级;PTP over λ 授时方式仅需一般的双纤链路,授时服务精度可达 1~10 ns;PTP over OSC 授时方式基于 TDM 体制,有较好的频率同步基础,并且该功能可集成于光通信设备中,其授时服务精度在 10~100 ns;PTP over Ethernet 授时方式通过业务信道承载,在硬件支持的情况下,授时服务精度为 100~1000 ns。

2.3.3 省内汇聚/接入授时子网

汇聚/接入授时子网主要实现省内城域汇聚及接入网的授时业务承载,是光网络授时体系泛在性覆盖的关键。该网络包含 PTN、SDH 及 EPON 等多种传输体制,需采用不同的传输方式实现授时业务承载。

PTN 承载时间同步已经成为一项标准技术,主流厂商设备均支持该功能。通过 SyncE 同步以太网与 PTP 协议相结合,节点工作于主时钟、边界时钟、透传时钟和从时钟等不同模式,即可方便实现 PTN 整网时间同步。因此,PTN 网络基本已实现通信授时一体化融合,单跳授时服务精度最高可达纳秒级,在多节点组网后,精度在 50~500 ns 之间。

SDH 网络通常采用 PTP over 段开销和 PTP over E1 传输 2 种方式实现授时组网。前者是将 PTP 报文插入 SOH 复用段开销字节中,该方式具有传输延时小、线路时钟抖动敏感性低和时延恒定等优点,有利于实现较高的授时精度。通过 SDH 丰富的开销字节,能够方便实现多种网络拓扑环境下的授时组网,授时服务精度在 10~100 ns 之间。后者通过协议转换器将 PTP 报文封装为 2M 的 E1 信号,在 SDH 业务通道中

传输。该方式的优点在于能够实现授时信息的任意传输而无需繁琐的配置,具有较好的灵活性。但由于 E1 信道通复杂的映射、分接复用及指针调整,其授时精度在 100~1000 ns 之间。

EPON 的授时承载也采用 SyncE+PTP 协议的方式实现。光线路终端(OLT)与光网络单元(ONU)都工作在边界时钟 BC 模式,OLT 既作为从时钟同步于 EPON 授时主时钟,又作为 ONU 的主时钟;ONU 则作为 OLT 的主时钟授时于 EPON 授时从时钟。EPON 的授时服务精度可达 10~100 ns 之间。

由于汇聚/接入网络技术体制原因,业务信道的传输时延存在较大不对称性和波动,未来仍需通过提升时间戳精度、改进时间驯服算法技术等手段,进一步提升授时服务精度。

3 建设发展路线

光网络高精度授时体系建设应采用分阶段逐步演进的实施策略。现阶段,应着手开展光网络授时体系规划论证、总体技术方案和网络体系架构设计,对授时网络的性能进行软件仿真分析;建立可模拟未来广域授时网络的原型试验系统,验证技术的可行性及性能指标。下一步,完善理论和技术体系,对总体方案、体系架构和技术体系进行优化与深化;建设小规模区域授时网络,结合各项关键技术提升授时业务指标,建立完善的运维管理平台,具备实用化应用条件。最后,形成完整的光网络授时理论体系、系统体系、技术体系和标准体系,构建广域覆盖、分布式和多等级的泛在光网络授时体系,同时针对不同领域的各类需求开发不同的应用,通过云服务等手段为其提供不同等级、不同特色的授时服务。

4 结束语

本文介绍了一种广域覆盖的地面高精度授时体系建设方案,以满足各领域时间同步应用需求。光网络新增高精度授时业务,既符合未来通信授时业务一体化承载的发展趋势,同时扩展了光网络的应用领域范围,通过较低的代价提升了网络的使用价值,具有较好的经济效益。另一方面,光网络授时有助于减少对卫星授时系统的唯一性依赖,增强我国授时体系的整体生存性,提升了各领域时间统一系统的安全可靠性,具有一定的社会效益。鉴于光网络授时体系建设的重要意义,未来其必将成为高精度授时的一项主流技术。因此,当前应尽快开展体系规划论证和网络体

系架构设计工作,并着手构建有代表性的原型试验系统,突破授时承载层的部分关键技术。

参考文献:

- [1] 童宝润. 时间统一技术[M]. 北京:国防工业出版社,2004:7-8.
- [2] KIHARA M, IMAOKA A, IMAE M, et al. Two-way time transfer through 2.4 Gb/s optical SDH system[J]. IEEE Transactions on Instrumentation Measurement, 2001, 50(3): 709-715.
- [3] 谢毅. 用 SDH 网络传输高精度时间和频率信号:信息产业部电信研究院论文集[C]. 北京:人民邮电出版社,2004:219-222.
- [4] AMEMIYA M, IMAE M, FUJII Y, et al. Time and Frequency Transfer and Dissemination Methods Using Optical Fiber Network [C]//2005 IEEE International Frequency Control Symposium, August 29-31, 2005, Vancouver, Canada. New York: IEEE, 2005: 914-918.
- [5] EBENHAG S C, JARLEMARK P, EMARDSON R, et al. Time Transfer over 560 km Fiber Link [C]//The 22nd European Frequency and Time Forum, April 20-24, 2009, Besancon, France. New York: IEEE, 2009: 22-25.
- [6] SMOTLACHA V, KUNA A, MACHE W, et al. Time transfer in optical network[C]//The 42nd Annual Precise Time and Time Interval (PTTI) Systems and Applications Meeting, November 15-18, 2010, Virginia, USA. New York: IEEE, 2010: 427-435.
- [7] DIERIKX E F, WALLIN A E, FORDELL T, et al. White Rabbit Precision Time Protocol on Long-Distance Fiber Links[J]. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, 2016, 63(7): 945-952.
- [8] SAVORY J, SHERMAN J, ROMISCH S, et al. White Rabbit-Based Time Distribution at NIST[C]//2018 IEEE International Frequency Control Symposium, May 21-24, 2018, California, USA. New York: IEEE, 2018: 1-5.
- [9] 焦群,马涛,何迎利,等. 基于光通信系统建立时间传递网络技术的研究[J]. 电力系统通信,2011,32(1):21-27.
- [10] 瞿海燕,潘慧玲,刘芙蓉,等. 光纤时间频率传递研究发展态势的文献计量分析[J]. 科学观察,2017,12(3):24-31.
- [11] 张梅. 大科学装置之高精度地基授时系统[N]. 陕西日报,2018-10-24(5).
- [12] 侯飞雁,权润爱,邵朝阳,等. 量子时间同步协议研究进展回顾[J]. 时间频率学报,2014(2):65-73.
- [13] 岳洁东. 量子多相位测量与量子时钟同步的新方法[D]. 北京:中国科学院大学,2018.
- [14] 王栋,竹瑞博,邱祖雄,等. 基于 PTP 的高精度频率同步恢复技术研究[J]. 自动化与仪器仪表,2017(10):144-150.
- [15] 王胜军,李德莉. OTN 长距离传输时间同步的研究[J]. 光通信技术,2017,41(7):13-16.
- [16] 李晗. PTN 承载高精度时间同步协议技术研究 [J]. 中兴通讯技术,2010,16(3):35-38.
- [17] 张文星,王建利,吴红青. 1588 时间同步技术在 PON 系统中的实现[J]. 光通信技术,2012,36(1):10-12.
- [18] 潘维斌. LHAASO 实验高精度时间测量系统研究[D]. 北京:清华大学,2014.
- [19] YUAN Xu, WANG Bo. Using single wavelength light to improve the synchronization accuracy of the White Rabbit system [J]. Chinese Optics Letters, 2017, 15(10): 61-65.