

# 基于频谱位示图的联合优化路由频谱分配算法

张曙光<sup>1\*</sup>, 李正贤<sup>1</sup>, 王伟<sup>2</sup>

<sup>1</sup>安阳学院航空工程学院, 河南 安阳 455000;

<sup>2</sup>聊城大学计算机学院, 山东 聊城 252000

**摘要** 为提高频谱利用率,同时减少光路的建立时延和阻塞率,提出了一种基于时延和频谱利用率联合优化路由频谱分配(CODS-RSA)算法。CODS-RSA算法在提前计算期间,利用提前计算控制模型、频谱位示图和最佳分配算法,建立了光连接请求业务数据库。CODS-RSA算法根据光连接请求业务数据库和实时更新计算结果,进行了路由频谱分配(RSA)。仿真结果表明,CODS-RSA算法提前计算减少了光路的建立时延,频谱位示图和最佳分配算法的分配频谱提高了频谱利用率,也相对降低了业务请求的阻塞率。

**关键词** 光通信; 路由频谱分配; 提前计算; 频谱位示图; 低时延

中图分类号 TN914.32

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.130602

## Joint-Optimization Routing and Spectrum Allocation Algorithm Based on Spectrum Bit Diagram

Zhang Shuguang<sup>1\*</sup>, Li Zhengxian<sup>1</sup>, Wang Wei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Aviation Engineering College, Anyang University, Anyang, Henan 455000, China;

<sup>2</sup>Computer College, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252000, China

**Abstract** To improve the spectrum utilization rate and reduce the establishment delay and blocking rate of an optical path, a joint-optimization routing spectrum allocation (CODS-RSA) algorithm based on the delay and spectrum utilization rate is proposed herein. The CODS-RSA algorithm establishes an optical connection request service database by calculating a control model, a spectrum bit diagram, and an optimal allocation algorithm during a preliminary calculation period. Then, the CODS-RSA algorithm performs routing spectrum allocation based on the optical connection request service database and real-time update calculation. The simulation results show that preliminary calculations of the CODS-RSA algorithm reduce the optical path's establishment delay; the allocated spectra of optimal allocation algorithm and the spectrum bit diagram improve the spectrum utilization; the service request's blocking rate is relatively reduced as well.

**Key words** optical communications; routing spectrum allocation; preliminary calculation; spectrum bit diagram; low delay

**OCIS codes** 060.2605; 060.4510; 220.4830

## 1 引言

互联网市场飞速发展对骨干传输网络的要求越来越高,尤其是在高清视频、电子商务、移动互联、“互联网+”等为代表的互联网业务驱动下,互联网对光网络的综合性能提出了更高的要求。“大带宽、高可靠、低时延”已经成为光网络的发展目标,但是,

要实现这个目标是十分困难的,这是由于性能指标之间存在着相互制约的关系。降低时延可以提高光纤的吞吐能力,进而提高带宽利用率,但是过低的时延会使得光网络的可靠性大打折扣;而增加时延会使光纤的吞吐能力下降,进而减少带宽利用率,无法满足用户低时延需求。两种方案都会使客户体验质量(QOE)大打折扣,因此仅仅提高带宽并不是最好

收稿日期: 2018-12-19; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-01-24

基金项目: 河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2017GGJS204)

\* E-mail: 112943400@qq.com

解决问题的方法。频谱资源利用率降低影响光路建立的资源使用,增加了光路的建立时延,因此在为业务请求分配光链路和频谱资源时,需要对光网络进行整体协调,使频谱利用率尽可能高的同时使光路建立时延尽可能低。

华为技术有限公司在光网络单元上预先存储波长分配表,光连接请求根据光网络单元所在的服务提供商通过波长分配表获得对应的波长信息,接着依据光网络单元所提供的波长信息,发送或者接收光信号,通过该方法简化了波长分配的流程,降低波长分配时延,提高了 QOE<sup>[1]</sup>。郭宏等<sup>[2]</sup>为了降低时延,打破业务请求到来后再进行计算的限制,预先并行计算出资源分配方案,并且在提前计算过程中把静态和动态算法结合起来进行计算,但是,该算法没有考虑频谱资源利用率。Chen 等<sup>[3]</sup>在业务请求到达前综合考虑其他算法的优势<sup>[4-5]</sup>,提前计算路由和分配频谱资源,达到文献 [6]中报道的优化路由频谱分配(RSA)算法的性能,节约了路由计算所需时间,但是,在光网络中,业务请求是动态随机的,因此业务预测的 RSA 算法具有很大的局限性。

为了解决前面提到的问题,本文提出基于时延和频谱利用率联合优化 RSA 算法(CODS-RSA)。CODS-RSA 算法思想是以文献[2]报道的提前计算策略为基础,采用多核多线程技术预先利用最短路径法和频谱着色图,计算所有的未来可能到达业务请求的路由和频谱资源的分配方案,当业务请求到达后立即根据方案分配路由和频谱资源。

## 2 CODS-RSA 算法

根据低计算时延和频谱分配的需要,提出了一种新的 RSA 算法:CODS-RSA 算法。CODS-RSA 算法的思路是将路由和频谱分配分开解决,具体步骤如下:

1) 利用 CODS-RSA 算法的提前控制模型,建立光连接请求业务数据库,依据建立的数据库进行路由选择,如果有可用的路由,则找出路由所使用的光链路;否则,更新网络状态,重新计算路由。把可用路由所使用的光链路建立一个集合,记为  $D$ 。

2) 依据频谱位示图法对集合  $D$  中链路的频谱资源进行量化。

3) 利用最佳分配算法进行频谱资源分配。算法中,  $W_{ij}$  ( $i \in D$ ) 代表光链路集合  $D$  中第  $i$  条链路的第  $j$  个频谱资源情况;  $F_j$  代表集合  $D$  中的所有链路不能使用第  $j$  个频谱资源的链路个数;  $F_1, F_2, \dots, F_k$  中的最小值记为  $\alpha$ ;  $k$  代表集合  $D$  中的光链路个数( $k$  值随集合  $D$  的变化而改变)。其中

$$F_j = \sum_{i \in D} W_{ij}, \quad (1)$$

$$\alpha = \min\{F_1, F_2, \dots, F_N\}. \quad (2)$$

频谱分配过程依据  $\alpha$  的值分配频谱资源;当  $\alpha=0$  时,可以将该频谱资源分配给集合  $D$  中的所有链路;当  $\alpha=k$  时,则无可用频谱资源,阻塞光连接请求;当  $0 < \alpha < k$  时,则说明光路需要多个频谱资源,并且需要在光节点进行频谱资源转换。CODS-RSA 算法流程如图 1 所示。

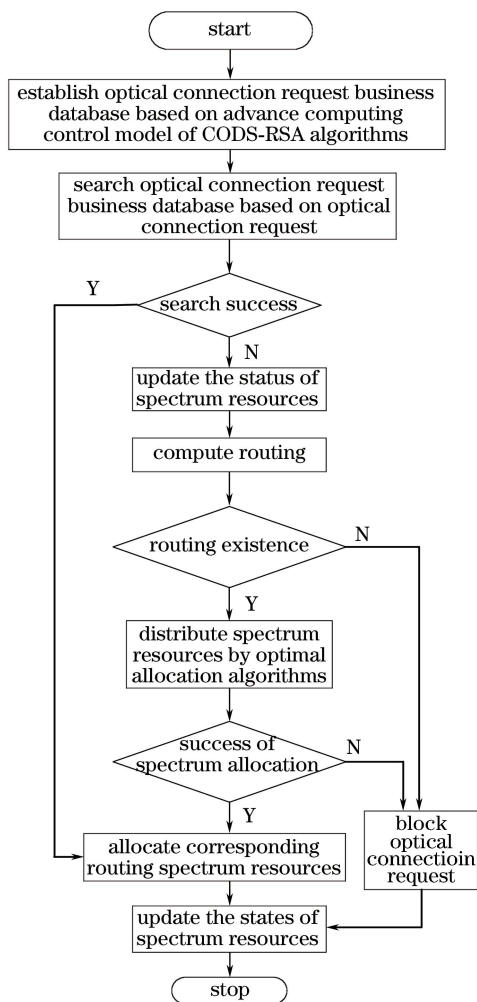


图 1 CODS-RSA 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of CODS-RSA algorithm

### 2.1 CODS-RSA 算法的提前计算控制模型

传统 RSA 算法存在很大的计算时延,这里的计算时延指从业务请求到达光网络直至计算路由和频谱分配完毕所花费的时间。

CODS-RSA 算法的提前计算控制模型旨在降低时延。在所有时延中,硬件设备的处理时延在设计 and 建设阶段已经基本不可改变;信号的传输时延

主要与所选路由的总距离有关,也基本无法改变;而控制器的策略处理时延和所选的频谱路由分配算法有关,可以通过优化降低。因此,上述几种时延中只能降低控制器的策略处理时延。传统的 RSA 算法,忽略了计算路由和频谱分配的时延<sup>[4,7-8]</sup>。本部分阐述 CODs-RSA 算法的提前计算控制模型,旨在减少控制器的策略处理时延,即降低计算时延。CODs-RSA 算法的提前计算控制模型如图 2 所示。

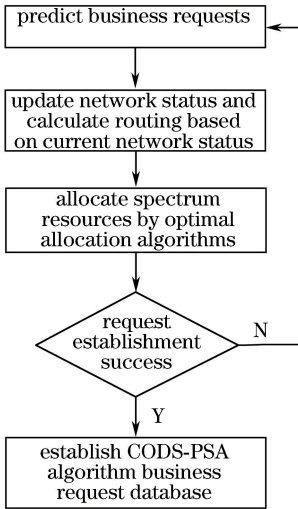


图 2 CODs-RSA 算法的提前计算控制模型  
Fig. 2 Preliminary calculation control model of CODs-RSA algorithm

通过前面分析可知,所提 CODs-RSA 算法的提前计算控制模型的计算量依然较大,但这个时间是提前计算所花费的时间,而非路由和频谱分配的计算时延。为了降低提前计算所花费的时间,受文献<sup>[2,9-12]</sup>的启发,把传统的单线程的运行方式变成多线程多任务运行方式。在仿真验证时,编程运用 C++ 语言,在 VS2010 开发平台上运行。

CODs-RSA 算法提前计算控制模型的业务请求应答时序如图 3 所示。

由图 3 可以看出,CODs-RSA 算法提前计算控制模型中大部分业务请求到达后可以通过提前计算的方案立即得到响应,计算时延一般是 2 个时隙;而部分业务请求由于提前计算控制模型没有给出分配方案,所以没有立即得到响应,计算时延仍然是 4 个时隙。

利用提前计算控制模型的多线程并行运算方式不但降低了提前计算时延,还打破了先响应业务请求再计算的限制,进而极大地降低了光路建立时延。另外,路由和频谱分配过程的可选面非常大,既可以是静态 RSA 算法,也可以是动态 RSA 算法。

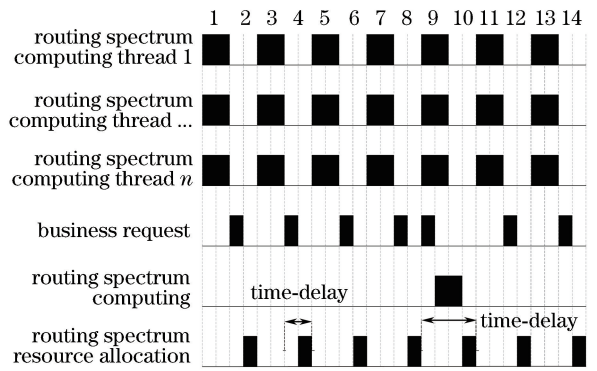


图 3 CODs-RSA 算法提前计算控制模型的业务请求应答时序

Fig. 3 Service request response time of preliminary calculation control model in CODs-RSA algorithm

### 2.2 CODs-RSA 算法的频谱位示图法

根据算法仿真计算的需要,提出了频谱位示图法,即在光处理单元为每一条链路的每一个频谱资源建立一张称为位示图的表,网络中链路频谱分配图如图 4 所示。其中,每一行代表一条链路,每一列代表该链路上的频谱资源,每个二进制位对应该链路上该频谱资源的使用情况, $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6$  分别代表进程 1,进程 2,进程 3,进程 4,进程 5,进程 6。若该二进制位的值为 0 表示该链路上该频谱资源空闲,若该二进制位的值为 1 表示该链路上该频谱资源已被占用。例如,第 8 条链路中可用的频谱资源有 1,2,7,8,9,10,11,12,13,14,15,16,即  $W_{81}=0, W_{82}=0, \dots, W_{816}=0$ ;第 8 条链路中不可用的频谱资源有 3,4,5,6,即  $W_{83}=1, W_{84}=1, W_{85}=1, W_{86}=1$ ;并且可以看出该频谱资源被进程  $P_6$  占用。

通过前面分析可知,频谱位示图可以满足一致性约束和连续性约束,即:频隙在频域上相邻且频谱在一条路径的链路上连续。

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	$P_1$	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	1	1	1	1	0	1	1	0	1	$P_2$	1	0	0	0	0	0
4	1	1	1	1	0	0	0	1	$P_2$	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	0	0	0	$P_1$	1	0	0	0	0	1	$P_3$	1	1
6	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1
7	0	0	1	$P_1$	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	1	1	$P_1$	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1
12	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		1	3	5	7	9	11	13	15							

图 4 网络中链路频谱分配图

Fig. 4 Diagram of link spectrum allocation in network

### 2.3 最佳分配算法

频谱分配采用提出的最佳分配算法,最佳分配算法的中心思想是为光连接请求优先分配同一频谱资源,如果不满足,频谱资源转换尽量减少。

最佳分配算法的步骤如下:

Step1:初始化频谱资源,利用 0 和 1 对频谱资源进行标识;

Step2:确定所使用的光链路序号,并按照光信号传输方向对光链路依次排序;

Step3:确定光链路集合  $D$ ;

Step4:计算  $W_{i1}, W_{i2}, \dots, W_{iN}$  ( $i \in D, N$  代表频谱资源数),  $W_{ij}$  代表中第  $i$  条链路的第  $j$  个频谱资源使用情况,空闲为 0,否则为 1;

Step5:求出  $F_1, F_2, \dots, F_N$ ,其中  $F_j$  按照(1)式进行运算;

Step6:求出  $F_1, F_2, \dots, F_N$  中的最小值,记为  $\alpha$ ,  $\alpha$  按照(2)式进行运算,并记录相应的下标,记为  $s$ ;

Step7:判断  $\alpha$  是否为 0,如果  $\alpha$  为 0,则分配第  $s$  个频谱资源给每条光链路,分配完毕;否则,继续 Step8;

Step8:计算  $k$  值,判断  $\alpha$  是否为  $k$ ,如果  $\alpha$  为  $k$ ,则分配该频谱资源失败,该光连接请求阻塞;否则,转去 Step9;

Step9:把第  $s$  个频谱资源分配给部分光链路,把该链路从  $D$  中删除;

Step10:判断  $D$  中是否为空,如果为空,分配完毕;否则,转去 Step3;

CODS-RSA 算法中的最佳分配算法流程如图 5 所示。

## 3 仿真结果和分析

对 CODS-RSA 算法进行了仿真,仿真过程采用 NSFNET 网络拓扑。假设业务连接请求服从泊松分布,服务时间服从负指数分布,利用 VC++ 编程得出相应的仿真结果。

仿真将面向传统 RSA 算法(图中简称 RSA)、PIRSA 算法和 CODS-RSA 算法,对 3 种算法独立运行的时延进行统计,传统 RSA 算法、PIRSA 算法和 CODS-RSA 算法的光路平均建立时延如图 6(a) 所示,其中单位 erl 表示每秒内网络接受请求的次数。

由图 6(a) 可以明显看出,不论负载轻重,PIRSA 算法和 CODS-RSA 算法均比传统 RSA 算

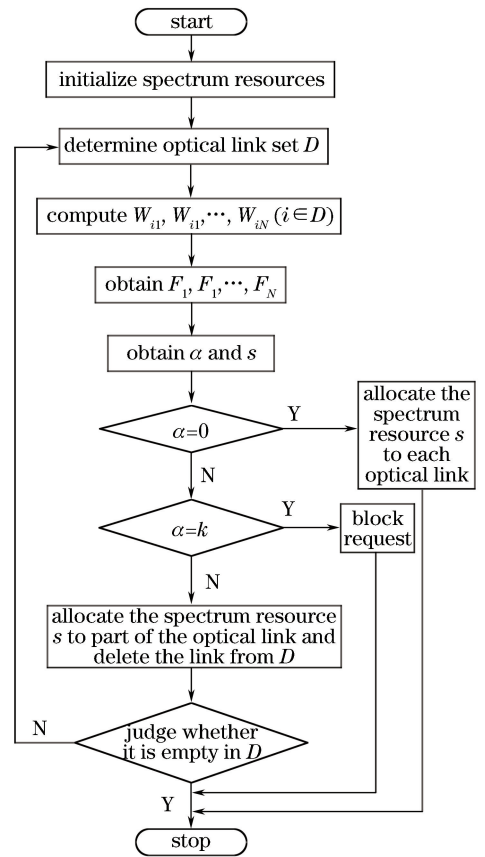


图 5 最佳分配算法流程图

Fig. 5 Flow chart of optimal allocation algorithm

法的时延低,因此,可以得出结论:PIRSA 算法和 CODS-RSA 算法的提前计算控制模型降低了时延,提升了光网络的综合性能。

在仿真过程,对传统 RSA 算法、PIRSA 算法和 CODS-RSA 算法的阻塞率和频谱利用率也进行了仿真统计,阻塞率如图 6(b) 所示,频谱利用率如图 6(c) 所示。由图可以看出,传统 RSA 算法和 PIRSA 算法的阻塞率高于 CODS-RSA 算法的阻塞率,传统 RSA 算法和 PIRSA 算法的频谱利用率低于 CODS-RSA 算法的频谱利用率。因此,可以得出结论:CODS-RSA 算法不但可以降低时延,还能略微降低阻塞率,同时可以提高频谱资源利用率。

## 4 结论

为了降低传输过程所花费的时延,提升频谱资源利用率,降低业务请求阻塞率,提出了 CODS-RSA 算法。仿真结果表明, CODS-RSA 算法不但可以降低时延,还能略微降低阻塞率,同时,可以提高频谱资源利用率。在后续的研究工作中,将继续研究联合优化算法,保证在低光路建立时延的前提下,降低阻塞率并提升频谱资源的利用率。

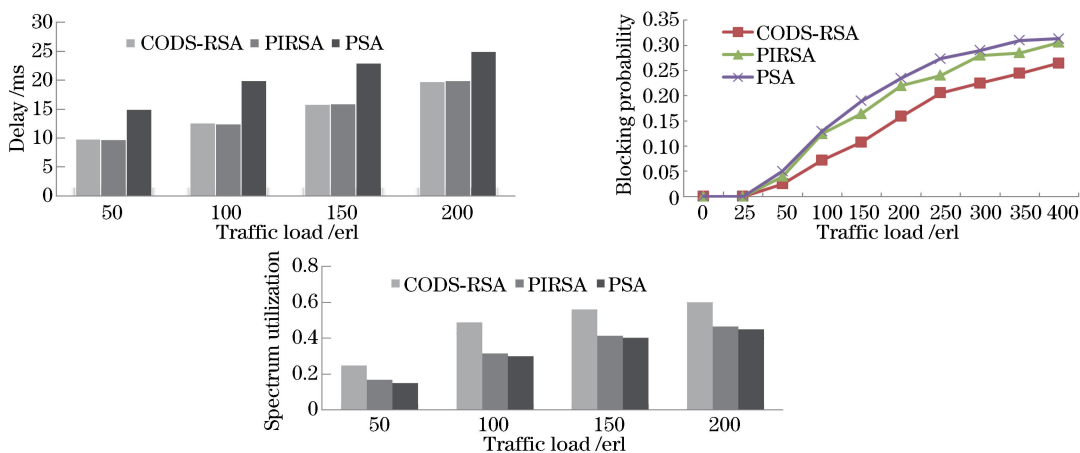


图6 仿真结果。(a)光路平均建立时延;(b)阻塞率;(c)频谱利用率

Fig. 6 Simulation results. (a) Average establishment delay of optical path; (b) blocking rate; (c) spectrum utilization

## 参 考 文 献

- [1] Zhao J J, Li W, Liu X, *et al.* Physical layer impairment (PLI)-aware RWA algorithm based on a bidimensional QoS framework [J]. IEEE Communications Letters, 2013, 17(6): 1280-1283.
- [2] Guo H, Yang R L, Wang W Y, *et al.* Physical layer impairment-aware and less delay RSA algorithm in flexible optical networks[J]. Optical Communication Technology, 2017, 41(5): 15-18.  
郭宏, 杨润利, 王文彦, 等. 基于物理损伤感知的低时延 RSA 算法[J]. 光通信技术, 2017, 41(5): 15-18.
- [3] Chen X L, Zhu S L, Jiang L, *et al.* On spectrum efficient failure-independent path protection  $p$ -cycle design in elastic optical networks [J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(17): 3719-3729.
- [4] Hsu C F, Chang Y C, Sie S C. Graph-model-based dynamic routing and spectrum assignment in elastic optical networks[J]. Journal of Optical Communications and Networking, 2016, 8(7): 507-520.
- [5] Wang W, Zhao Y L, Zhang J, *et al.* Cross-stratum resource reservation (CSRR) algorithm for deadline-driven applications in datacenter networks [J]. Photonic Network Communications, 2016, 31(1): 162-171.
- [6] Alaskar R W, Ahmad I, Alyatama A. Offline routing and spectrum allocation algorithms for elastic optical networks [J]. Optical Switching and Networking, 2016, 21: 79-92.
- [7] Zhao J J, Zhang S G, Zhao W Y. Design of wavelength rotation graph model applied in wavelength switching optical network in switching optical network [J]. Journal on Communications, 2010, 31(5): 44-50, 59.
- [8] Zhao J J, Zheng D, Hu J H, *et al.* Node-first virtual network mapping algorithm in elastic optical network [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(9): 0906003.  
赵继军, 郑斗, 胡劲华, 等. 弹性光网络中节点优先的虚拟网络映射算法[J]. 中国激光, 2017, 44(9): 0906003.
- [9] Yang H, Zhang J, Zhao Y L, *et al.* Performance evaluation of multi-stratum resources integrated resilience for software defined inter-data center interconnect [J]. Optics Express, 2015, 23(10): 13384-13398.
- [10] Yang H, Zhang J, Zhao Y L, *et al.* Time-aware software defined networking for OpenFlow-based datacenter optical networks [J]. Network Protocols and Algorithms, 2014, 6(4): 77-91.
- [11] Jiang X K, Zhao F, Fan Y Q, *et al.* Frequency assignment algorithm for elastic optical network with multi-cores considering crosstalk [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 060601.  
江祥奎, 赵峰, 范永青, 等. 考虑串扰的多纤芯弹性光网络中的频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 060601.
- [12] Zhao J J, Guo H. A routing and spectrum assignment algorithm with low delay in optical interconnection of data center [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(8): 080602.  
赵继军, 郭宏. 数据中心光互联中低时延路由由频谱分配算法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(8): 080602.