

软件定义卫星光网络跨层路由波长算法研究

李海, 赵尚弘, 李勇军, 彭聪

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西 西安 710077)

摘要: 针对卫星网络管理及维护难度大和大容量数据传输的迫切需求, 提出一种基于蚁群算法的软件定义卫星光网络跨层波长路由算法(SDNCL-RWA)。该算法将时延和可用波长率作为启发函数, 并设计一种两阶段的跨层波长路由机制来减少路由跳数和网络阻塞率, 首先在LEO卫星单层网络中路由, 当路由失败或者路由跳数过高时借助MEO卫星网络路由。在软件定义卫星光网络架构下进行仿真, 结果表明SDNCL-RWA算法比传统的Dijkstra+FF(First Fit)算法和波长路由蚁群算法(ACO+FF)在网络阻塞率和路由平均跳数这两方面有明显的改善。

关键词: 软件定义卫星光网络; 波长路由算法; 蚁群算法; 路由跳数

中图分类号: TP393

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.2096-8930.2021033

Research on Wavelength Algorithm for Cross-Layer Routing in Software Defined Satellite Optical Network

LI Hai, ZHAO Shanghong, LI Yongjun, PENG Cong

School of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China

Abstract: In response to the difficulty of satellite network management and maintenance and the urgent need for large-capacity data transmission, a software-defined satellite optical network cross-layer wavelength routing algorithm based on ant colony algorithm (SDNCL-RWA) was proposed. The algorithm took delay and available wavelength rate as heuristic functions, and designed a two-stage cross-layer wavelength routing mechanism to reduced routing hops and network congestion rate. First, it was routed in the LEO satellite single-layer network. The MEO satellite network was used for routing only when the routing fails or the routing hop count was too high. The simulation was carried out under the software-defined satellite optical network architecture and the results showed that the SDNCL-RWA algorithm proposed was better than the traditional Dijkstra+FF algorithm and the wavelength routing ant colony algorithm (ACO+FF) in terms of network blocking rate and average routing hops.

Keywords: software-defined satellite optical network, wavelength routing algorithm, ant colony algorithm, routing hop count

1 引言

随着人类活动空间的进一步拓展以及对地观测和军事应用等业务需求的不断扩大, 卫星传输的数据量迅猛增长, 这对卫星网络的容量提出了新的要求。以微波链路为主的传统卫星网络难以承载大量的业务请求, 激光链路具有通信容量大、低能耗和强抗毁性等特点, 能够很好地满足大量业务数据传输的要求, 是下一代卫星网络链路的理想选择^[1]。

卫星网络为了满足探测、信息传输、情报获取等功

能的要求, 长期以来按照功能独自发展。目前, 我国已经初步建成了具备通信、导航、遥感3个功能的卫星子网络, 由于各子网络独自发展和技术规范不统一, 导致卫星资源具有难以实现有效的利用、网络更新维护成本高和信息融合难度大等缺点。近年来提出的软件定义网络(Software Defined Network, SDN)将数据平面和控制平面解耦, 极大地简化了网络的管理和配置^[2], 方便了网络服务的快速按需布置和网络节点资源的有效利用, 在5G网络、物联网等领域得到了广泛的应用。为了改善卫星网络“烟囱式”的发展现状, 已

收稿日期: 2021-05-10; **修回日期:** 2021-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.91638101); 国家自然科学基金资助项目(No.6170010130)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China(No.91638101), The National Natural Science Foundation of China(No. 6170010130)

经有研究将软件定义^[9]的思想应用到卫星网络,通过高轨道的控制器来实现对卫星网络的集中控制,实现了灵活高效的网络配置和管理、信息的有效融合、数据共享与卫星功能和性能的持续加强。

考虑到激光链路和SDN在卫星网络应用中的巨大优势,软件定义卫星光网络架构被认为是下一代卫星网络中最具潜力的架构。在软件定义卫星光网络中,波长路由是影响整个网络性能的重要因素。波长路由算法是指为光网络的连接请求选择路径并且分配波长,如何设计一种适合此架构的波长路由算法成为研究的热点。参考文献[4]针对分布式卫星设计了一种基于蚁群算法的波长路由算法,该算法引入了小窗口策略来提高算法的收敛速度并且通过计算相邻链路空闲波长的交集同时实现了波长和路由分配。参考文献[5]提出一种针对双层卫星光网络的面向多业务的波长路由算法,该算法综合考虑剩余波长数和传输时延来动态地设置链路权重并且针对不同业务分配不同的波长集。参考文献[6]建立了一个多约束的跨层波长路由模型,然后利用蚁群算法来求解此模型下的最优路径。参考文献[7]对两种典型的低地球轨道(Low Earth Orbit, LEO)卫星网络的波长路由算法进行分析,在综合考虑了时变性和连通需求的基础上,提出了一种基于具备存储计算功能的超级卫星节点的波长路由算法。上述文献针对卫星网络的波长路由问题进行研究,针对不同的应用场景建立模型并进行求解,但是在设计波长路由算法时都没有考虑软件定义卫星网络的特点。参考文献[8]首次结合软件定义网络的思想来设计卫星网络的多服务质量(Quality of Service, QoS)路由算法。同时参考文献[9]提出一种软件定义卫星光网络下的多QoS路由,该算法综合考虑了波长空闲率、时延等QoS指标和不同业务的需求差异。上述波长路由算法都没有考虑光波长路由跳数带来的影响,由于卫星的运动性和光链路建链时间长等特点,使得跳数将直接影响误码率、时延和中断概率等^[10]。

因此,本文以蚁群算法为基础提出一种软件定义卫星光网络跨层波长路由算法(SDNCL-RWA),该算法的主要创新点在于综合考虑时延和可用波长率来设计转移概率,并设计了一种两阶段的跨层路由机制。

2 SDNCL-RWA

2.1 软件定义卫星光网络架构和路由机制

软件定义卫星光网络逻辑架构如图1所示,其架构主要由应用层、控制层和基础设施层3层组成。应用层为最上层,包括对地观测等任务和应用,负责网络功能的定制化;中间为控制层,主要由静止地球轨道(Geostationary Earth Orbit, GEO)控制器构成,负责网

络资源的管理和控制;底层为基础设施层,主要由中地球轨道(Medium Earth Orbit, MEO)和LEO卫星组成,负责数据的处理和转发。卫星间链路采用激光链路,并且通过波分复用技术实现多波长通道。

GEO卫星通常作为软件定义卫星光网络的控制器,通过GEO卫星控制器和底层MEO/LEO卫星的南向接口进行数据通信来统一部署底层网络的路由。GEO卫星控制器通过和底层网络的卫星进行信息交互从而可以得到卫星光网络全局状态信息,然后在GEO卫星控制器计算出底层网络的最佳路由并且通过南向接口控制底层MEO/LEO卫星光网络的数据传输。

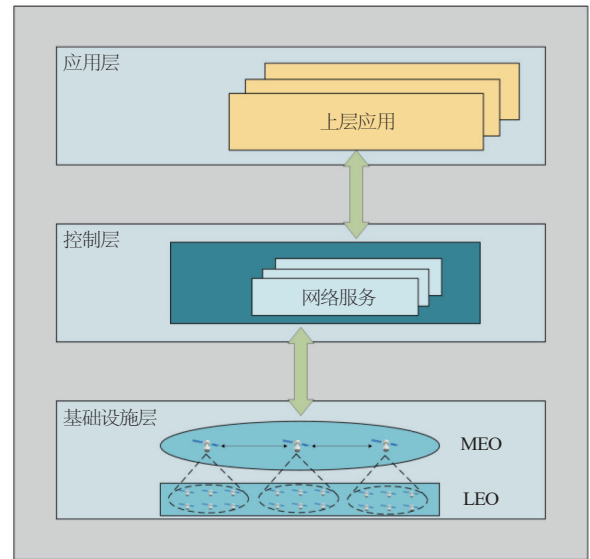


图1 软件定义卫星光网络逻辑架构

2.2 算法原理

2.2.1 状态转移概率函数

波长路由算法包括路由的选择和波长的分配这两个过程。为了使蚁群算法更适用于波长路由过程,本文改进了蚁群算法的状态转移函数。为了更好地描述转移概率函数,首先对相关的概念和参数进行定义。

(1) 信息素 $\tau_{ij}(t)$ 表示 t 时刻节点 i 和节点 j 链路上信息素大小,信息素的更新采用全局更新规则,即在所有蚂蚁完成一次循环后对信息素进行更新,具体公式如下

$$\tau_{ij}(t+\Delta t) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t+\Delta t) \quad (1)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t+\Delta t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} Q/T_k(t), & \text{如果 } t \text{ 时刻蚂蚁 } k \text{ 经过链路 } (i,j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\rho \in [0,1]$ 表示信息素挥发程度, $\Delta\tau_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 在链路 (i,j) 释放的信息素浓度, Q 为蚂蚁一次循环释放的信息素浓度之和, $T_k = \sum_{(i,j) \in L_k} T(i,j)(t)$ 表示蚂蚁 k 到目的节点所用的时间, L_k 表示蚂蚁 k 经历的路径集合。

(2) 禁忌表 $\text{Tabu}_k(t)$ 用来存储 t 时刻蚂蚁 k 走过的路径, 可用波长集 $\text{Lamda}_k(t)$ 表示 t 时刻蚂蚁 k 走过路径上可用的波长集合。

(3) 链路时延

$$T(i,j)(t) = T_r(i,j) + T_{ot}(i,j)(t) \quad (4)$$

其中, $T(i,j)$ 表示从 t 时刻节点 i 到节点 j 之间的时延, $T_r(i,j)$ 表示节点间的传输时延, $T_{ot}(i,j)(t)$ 表示在 t 时刻节点的排队、处理等其他时延的总和, 为了简化分析, 本文将所有 $T_{ot}(i,j)(t)$ 定义为一个常数 T_{ot} 。

(4) 可用波长率

$$I_{ij}(t) = \frac{|N_{ij}| - n_{ij}(t)}{|N_{ij}|} \quad (5)$$

其中, $I_{ij}(t)$ 表示 t 时刻链路 (i,j) 的可用波长率, $|N_{ij}|$ 表示链路 (i,j) 上总的波长数, $n_{ij}(t)$ 表示链路 (i,j) 上已有的波长数。

综合以上定义, 改进的状态转移概率函数如下

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha g[D_{ij}(t)]^\beta g[I_{ij}(t)]^\gamma}{\sum_{l \in A_k} [\tau_{il}(t)]^\alpha g[D_{il}(t)]^\beta g[I_{il}(t)]^\gamma}, & j \in A_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

其中, $P_{ij}^k(t)$ 为蚂蚁 k 在 t 时刻从节点 i 向节点 j 的转移概率, $D_{ij}(t) = 1/T(i,j)(t)$, α 、 β 、 γ 分别为信息素启发因子和各函数的启发因子, 表示在蚂蚁转移过程中信息素和各函数的重要性, A_k 表示蚂蚁可选的下一节点集合。

2.2.2 路由选择和波长分配规则

为了使蚂蚁同时完成路由选择和波长分配任务, 本文改进了蚁群寻路过程。首先, 每个蚂蚁建立禁忌表的同时建立可用波长集, 当蚂蚁每到达一个节点时, 更新禁忌表同时更新可用波长集, 即把前一个节点和此节点链路上可用的波长和当前的可用波长集求交集; 然后根据禁忌表来确定下一跳的备选节点, 根据当前节点和备选节点的可用波长率以及时延综合决定下一跳节点的具体位置。依次迭代, 最终蚂蚁到达目的节点同时也得到了可用波长集; 蚂蚁在可用波长集中随机选择一个波长, 于是蚂蚁就同时完成了路由选择和波长分配。

为了降低跳数过多造成的误码率、中断概率和时延等性能恶化带来的影响, 本文针对 MEO/LEO 双层卫星网络设计了一种两阶段的跨层波长路由机制。首先用本文改进的蚁群算法求出在 LEO 单层卫星网络中的最佳路由。如果最佳路由的跳数超过最大允许跳数 Numth 或者在单层 LEO 卫星网络中路由失败, 则利用 LEO 卫星作为

中继来寻找可行路由。寻找距离起始节点和目的节点最近的 MEO 卫星, 将找出的 MEO 卫星分别作为源节点和目的节点; 然后利用本文改进的蚁群算法进行求解; 最终可以得到满足条件的最佳路由。

综合以上分析, SDNCL-RWA 算法的伪代码如算法 1 所示, 终止条件为到达给定的最大迭代次数。

算法1 SDNCL-RWA 算法的伪代码

```

1) 网络初始化, 设定蚁群数量  $N$ , 最大迭代次数  $M$ , 最大允许跳数  $\text{Numth}$ 
2) Loop: 业务到达, 获取业务源节点和目的节点、到达和持续时间, 初始化迭代次数  $m=0$ 
3)   while  $m < M$ 
4)     初始化蚂蚁种群, 可用波长集初始化, 禁忌表清零,  $n=0$ , 路由跳数  $\text{Num}=0$ 
5)     if 蚂蚁  $m$  初次路由
6)       路由标志  $\text{Label}=L$  ( $L$  代表在 LEO 卫星间路由)
7)     end
8)     while  $n < N$ 
9)       while 当前节点不是目的节点
10)        if  $\text{Label}=L$ 
11)          根据蚁群算法的状态转移概率函数选择下一跳 LEO 卫星节点
12)        else
13)          根据蚁群算法的状态转移概率函数选择下一跳 MEO 卫星节点
14)        end
15)        if 下一跳节点为空集且  $\text{Label}=L$ 
16)          禁忌表清零,  $\text{Label}=M$ , 选择距离源节点和目的节点最近的 MEO 卫星作为重路由的源节点和目的节点, 返回第 4 步
17)        else if 下一跳节点为空且  $\text{Label}=M$ 
18)          本次搜索失败, 禁忌表清零, 跳到第 11 步释放下一只蚂蚁
19)        end
20)        if 路由跳数  $\text{Num} > \text{Numth}$  且  $\text{Label}=L$ 
21)          禁忌表清零,  $\text{Label}=M$ , 选择距离源节点和目的节点最近的 MEO 卫星作为重路由的源节点和目的节点, 返回第 4 步
22)        else if 路由跳数  $\text{Num} > \text{Numth}$  且  $\text{Label}=M$ 
23)          本次搜索失败, 禁忌表清零, 跳到第 11 步释放下一只蚂蚁
24)        end

```

```

end
11)     $n=n+1$ ;
end
12)    根据所有搜索成功的蚂蚁经过的路径对信息素进行更新;
        计算本次迭代的最佳路径, 在可用波长集中随机选择波长;
13)     $m=m+1$ ;
end
14)    if 一次迭代最佳路径存在
15)        计算最佳的一次迭代路径和得到路径相应的波长; 更新网络状态;
16)    else 本次路由失败
17)    end
18) end

```

3 算法仿真分析

在仿真分析中将SDNCL-RWA和传统的Dijkstra+FF (First Fit) 算法以及传统的波长路由蚁群算法 (ACO+FF) 在网络阻塞率和平均路由跳数方面进行了仿真比较。仿真基于参考文献[11]提出的3层卫星星座Tr。Tr星座是满足3层卫星网络对地面全覆盖、MEO卫星网络对LEO卫星网络全覆盖、地面站和用户与各层卫星的可视时间等限制条件的3层卫星星座中轨道数量和卫星数量最少的卫星星座, 并且将软件定义卫星网络的控制器部署在GEO卫星从而使得GEO卫星和底层MEO/LEO卫星逻辑上分层。星座Tr的具体参数见表1。

表1 Tr星座参数

参数	GEO卫星	MEO卫星	LEO卫星
轨道高度/km	36 000	10 390	895.5
允许周期/h	24	6	12/7
卫星数量/颗	1×3	2×5	6×11
轨道倾角	0	45°	90°
近地点幅角	17.31°	50.56°	119.5°

为了便于仿真分析, 本文采用虚拟拓扑的思想, 将卫星网络的周期分为若干时间片; 在每个时间片内整个卫星网络的拓扑结构保持不变, 由GEO卫星控制器收集此时间片内的整个网络状态并且根据网络状态制定业务请求的路由; 然后通过南向接口下载给MEO/LEO卫星节点进行数据的转发。首先将整个卫星网络参数输入到STK中得到每个时间片内的拓扑结构; 然后将得到的拓

扑结构导入MATLAB中对仿真算法进行分析。业务参数包括源节点、目的节点、到达时间和持续时间, 在仿真中假设所有业务按照泊松分布到达且在[2.5, 25]中等比例产生10个值作为泊松分布的期望, 所有业务持续时间全部服从期望为40的指数分布, 业务的源节点和目的节点在LEO卫星中随机产生, 同时假设所有业务没有被立即服务则被丢弃。仿真中设定存在30只蚂蚁, 迭代次数为50, 最大允许跳数Numth=10。图2给出了网络阻塞率随着业务强度变化的曲线示意。由图2可知本文提出的SDNCL-RWA算法较Dijkstra+FF和ACO+FF算法在网络阻塞率性能上有所改善。这是因为SDNCL-RWA算法采用了可用波长率作为启发函数和限制MEO卫星只能转发LEO路由失败和路由跳数较多的业务, 从而能最大限度地减少网络的阻塞率。

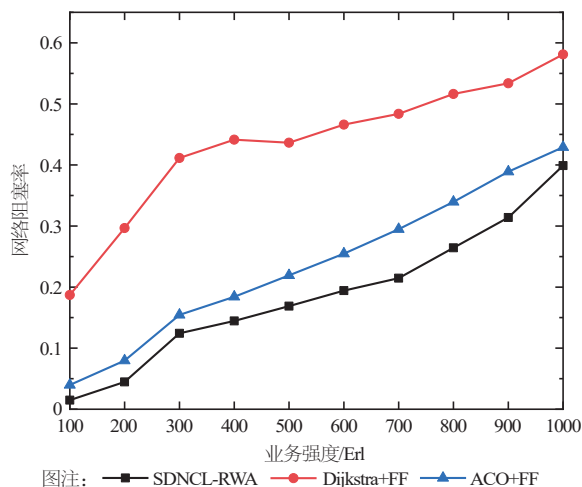


图2 网络阻塞率随着业务强度变化的曲线示意

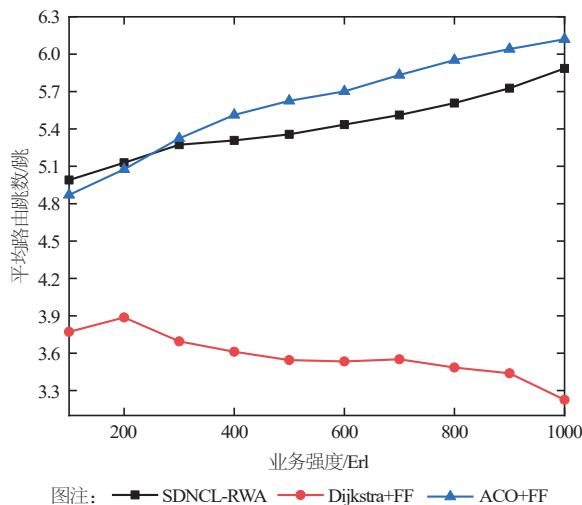


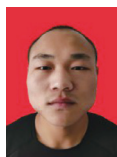
图3 不同算法求出的平均路由跳数随着业务强度的变化曲线

图3为不同算法求出的平均路由跳数随着业务强度的变化曲线。Dijkstra+FF算法平均路由跳数随着业务强度的提高略微有所下降。这是因为Dijkstra+FF算法在业务强度较大时拒绝服务跳数较多的业务从而跳数较少的业务请求更容易被成功服务。从图3中可以看出SDNCL-RWA算法和ACO+FF算法在平均路由跳数上差别不大,在业务强度较低时,ACO+FF算法平均路由跳数较小而业务强度较高时SDNCL-RWA算法平均路由跳数少于ACO+FF算法。这是因为ACO+FF算法在业务强度较小时可以充分利用MEO卫星来转发路由从而减少路由的平均跳数;在业务强度较高时,MEO卫星负载较大从而使跳数较多的业务请求不能被MEO卫星中继。从图2和图3中可以看出SDNCL-RWA算法可以在有效减少网络平均路由跳数的同时维持较好的网络阻塞率。

参考文献:

- [1] KARAFOLAS N, BARONI S. Optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2000, 18(12): 1792-1806.
- [2] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [3] BERTAUX L, MEDJIAH S, BERTHOUE P, et al. Software defined networking and virtualization for broadband satellite networks[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(3): 54-60.
- [4] 董毅, 赵尚弘, 李勇军, 等. 基于蚁群算法的分布式卫星光网络波长路由分配技术研究[J]. 电子与信息学报, 2015, 37(11): 2650-2656.
DONG Y, ZHAO S H, LI Y J, et al. Research on routing and wavelength assignment based on ant colony optimization in distributed satellite optical network[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2015, 37(11): 2650-2656.
- [5] 刘庆利, 姚俊飞, 刘治国. 基于多业务的卫星光网络波长路由算法研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(8): 1780-1787, 1794.
LIU Q L, YAO J F, LIU Z G. Research on wavelength routing algorithm based on multi-service in satellite optical networks[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(8): 1780-1787, 1794.
- [6] WEN G L, ZHANG Q, WANG H T, et al. An ant colony algorithm based on cross-layer design for routing and wavelength assignment in optical satellite networks[J]. China Communications, 2017, 14(8): 63-75.
- [7] SUN X, CAO S Z. A routing and wavelength assignment algorithm based on two types of LEO constellations in optical satellite networks[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(8): 2106-2113.
- [8] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 基于SDN的卫星网络多QoS目标优化路由算法[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(6): 1395-1401.
SHI X D, LI Y J, ZHAO S H, et al. Multi-QoS objective optimization routing algorithm of satellite network based on SDN[J]. Systems Engineering and Electronics, 2020, 42(6): 1395-1401.
- [9] 石晓东, 李勇军, 赵尚弘, 等. 软件定义卫星光网络蚁群优化波长路由技术[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(10): 211-218.
SHI X D, LI Y J, ZHAO S H, et al. Ant colony optimization routing and wavelength technology for software-defined satellite optical networks[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(10): 211-218.
- [10] 陈二虎, 刘颖, 刘璐, 等. 激光链路中继卫星系统网络设计及性能分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(9): 2778-2782.
CHEN E H, LIU Y, LIU L, et al. Network design and performance analysis of data-relay satellite system using laser links[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(9): 2778-2782.
- [11] LONG F. Satellite network multi QoS objective routing algorithm[M]//Satellite Network Robust QoS-aware Routing. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014: 93-128.

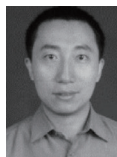
[作者简介]



李海 (1997-), 男, 空军工程大学信息与导航学院博士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络、资源分配和卫星波长路由。



赵尚弘 (1964-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为激光原理、天地一体化信息网络、微波光子、量子密钥分发和光电混合交换。



李勇军 (1979-), 男, 博士, 空军工程大学信息与导航学院教授, 博士生导师, 主要研究方向为卫星光网络、星上光信号处理和卫星轨道设计。



彭聪 (1995-), 男, 空军工程大学信息与导航学院博士生, 主要研究方向为天地一体化信息网络、光电混合交换和业务疏导。