

航电全光波分复用网络的波长路由算法研究

王岩¹, 熊颖²

(1. 沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035; 2. 北京航空航天大学, 北京 100191)

摘要: 随着多播消息流在航空电子全光波分复用网络中的普遍应用,多播路由问题被广泛研究,合理的多播路由配置能够在充分利用网络资源的同时,提高网络通信效率。对全光航空电子 WDM 网络进行了模型抽象,并针对包含与不包含波长转换器的网络,分别提出以最小化网络总费用为目标的线性规划算法。将其用于 NSFNet 网络拓扑进行多播路由配置,配置结果显示,算法在保证网络实时性的前提下减少了网络的总费用。

关键词: 航空电子全光波分复用网络; 延迟约束; 最小化费用

中图分类号: V271.4; TP393

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)02-0001-04

Routing and Wavelength Assignment Algorithm of Avionics All-Optical WDM Network

WANG Yan¹, XIONG Ying²

(1. Shenyang Aircraft Design & Research Institute, Shenyang 110035, China; 2. Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: With the application of the multicasting information flow in the avionics all-optical Wavelength Division Multiplexing (WDM) network, the multicast routing problem was investigated more and more widely. The proper configuration of multicast router can not only make full use of the network resource, but also improve the communication efficiency of networks. In this paper, a model of avionics all-optical WDM network is built up and the integer linear programming algorithms with the objective of minimum total cost are proposed separately for network schemes with and without wavelength converter. The algorithms are used in NSFNet network topology for multicast routing configuration. The simulation results show that the algorithm can minimize the cost and ensure the real-time capability.

Key words: avionics all-optical WDM network; delay constraint; minimum cost

0 引言

全光波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)网络具有几乎无限带宽的潜力,抵抗电磁干扰的能力以及对协议透明等优点^[1],成为对灵活性、可靠性、实时性等有着高要求的未来航空电子网络的一个很合适的选择。目前,航电网络中的多播消息量在迅速增加,如机载多媒体消息。而对航空电子波分复用网络的路由波长(Routing and Wavelength Assignment, RWA)规划研究是很重要的,因为合理的路由波长规划能够在充分利用网络资源的同时,提高网络性能。

一般在全光网络传输多播消息的方法有:IP over

WDM 多播技术,利用单播方式来支持多播以及分光机制 3 种^[2]。近年来,最广泛的方法为分光机制,因为它避免了中间节点的光电转换。在分光机制的基础上,现有文献对全光 WDM 网络的 RWA 问题已有了很广泛的研究。文献[3]同时研究了以最小化费用为目标的线性规划算法和启发式算法;文献[4]中首先考虑了稀疏分光的 RWA 问题,稀疏分光是指并不是每个路由器具有分光能力;文献[5]设计了一种以延迟为限制的全光 WDM 网络路由算法;目标函数为最小化路径的总距离的路由算法在文献[6-7]中被研究。然而,目前已有的研究都是基于骨干网或者是 WDM 城域网,只有很少一部分考虑了航空电子网络。

本文在上述对 RWA 问题的研究基础上,对网络进行了建模,针对不同的航空电子网络场景,提出基于考虑消息延迟为约束,最小化网络总费用为目标的算法,并对 NSF 网络拓扑进行了仿真验证。

收稿日期:2013-05-03

修回日期:2013-05-14

基金项目:国家自然科学基金(61073012)

作者简介:王岩(1962—),男,河北唐山人,学士,研究员,研究方向为飞机航电系统。

1 全光网络模型抽象

为了对全光航空电子 WDM 网络进行深入的研究和分析,提出基于考虑延迟保证为约束,以减少网络总费用为目标的算法。首先对网络模型进行建模,给出建模所需的各个参数。

网络可以抽象为包含节点和光纤的模型 $G = (V, E)$, 其中, V 为网络节点的集合, E 为光纤链路的集合。该网络包括 N 个波长路由器, 每根光纤中的波长数为 W , 每个波长的传输容量为 C , 该网络上传的多播消息集为 $M = \{\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_k\}$, 模型参数假设如图 1 所示。

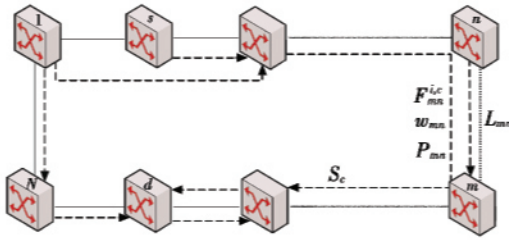


图 1 网络拓扑图

Fig. 1 Topology of network

定义网络参数为: m, n 为航空电子网络物理拓扑节点; i 为航空电子网络传输的消息编号; s_i, d_i 为消息 i 的源节点和目的节点, 其中, $d_i = \{d_{i_1}, d_{i_2}, d_{i_3}, \dots, d_{i_k}\}$, 为目的节点集合, L_i 为消息 i 的目的节点个数; P_{mn} 为物理拓扑上节点 m, n 间的波长数; L_{mn} 为节点 m, n 间的距离; w_{mn} 为节点 m, n 间光纤权重; C_{mn} 为节点 m, n 间光纤通信费用; $F_{mn}^{i,c}$ 为判断在 m, n 间的光纤上的波长 c 是否被消息 i 所占用的参数, 1 为是, 0 为否; $y_{mn}^{i,c,d}$ 为判断在 m, n 间的光纤上的波长 c 是否被消息 i 中目的地 d 所占用的参数, 1 为是, 0 为否; $y_{mn}^{i,d}$ 判断在 m, n 间的光纤是否被消息 i 中目的地 d 所占用, 1 为是, 0 为否; V_n^i 为消息 i 是否经过节点 n 的参数, 1 为是, 0 为否; $T_n^{i,d}$ 判断消息 i 中目的地为 d 时是否在节点 n 进行波长转换, 1 为是, 0 为否; p_{mn}^i 为布尔参量, 对消息流量进行单位化后它为一个单位的流量, 即它表示在 m, n 间的光纤上是否有消息 i , 1 为是, 0 为否; C_c^i 判断波长 c 是否被消息 i 所占用, 1 为是, 0 为否; Δ_d 为消息 i 的最大延迟限制; S_c 为光纤网传播速率; d_w 为波长转换延迟; $d_{T(d)}$ 为消息 i 中目的地为 d_j 时的延迟, d_{T_i} 为消息 i 的延迟, 定义为 $\max d_{T(d)}, d_j \in d_i$ 。

2 基于全光多播航电 WDM 网络 RWA 算法

航空电子 WDM 网络具有网络拓扑复杂、消息数目多、强实时性等特点, 因此, 算法考虑实时性, 以减少网络费用为目的进行建模, 即

$$\min \sum_{i=1}^k \sum_{c=1}^W \sum_{m,n} w_{mn} \cdot F_{mn}^{i,c} \quad (1)$$

为了更好地进行建模, 先进行条件假设: 1) 每根光纤的波长数一致, 波长通道的容量一致; 2) 光波长路由器各个参数都是一致的; 3) 每条消息须沿相同路径进行路由, 不能分成多个低速单独路由。

2.1 波长一致全光多播 MRWA-DC 算法

首先考虑一个最通用的场景, 该场景中的光路由器不包括波长转换能力, 即波长需保持一致才能进行传播, 约束条件如下。

1) 网络拓扑约束。

$$F_{mn}^{i,c} = \begin{cases} 1, & \text{if } \sum_d y_{mn}^{i,c,d} \geq 1 \\ 0, & \text{if } \sum_d y_{mn}^{i,c,d} = 0 \end{cases}, \forall m, n \quad (2)$$

$$\sum_{c=1}^W \sum_m y_{mn}^{i,c,d} = V_n^i, \quad \forall i, d, \forall n \neq s_i \quad (3)$$

$$\sum_{c=1}^W \sum_m F_{ms}^{i,c} = 0, \quad \forall i \quad (4)$$

$$V_n^i = 1, \quad \forall i, \forall n \in \{s_i, d_i\} \quad (5)$$

$$\sum_{c=1}^W \sum_n y_{mn}^{i,c,d} = V_m^i, \quad \forall i, d, \forall m \neq d_i \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^k \sum_{c=1}^W F_{mn}^{i,c} \leq P_{mn} \cdot W, \quad \forall n, m \quad (7)$$

$$\sum_{c=1}^W F_{mn}^{i,c} \leq P_{mn}, \quad \forall n, m \quad (8)$$

式(2)说明, 链路有消息传送到其中任意目的地代表该链路属于此消息的多播树; 式(3)保证每个节点的上游节点有且只有一个; 式(4)表示源节点没有上游节点; 式(5)保证源节点和目的节点有消息发送和接收; 式(6)表示除了目的端, 每个目的地所对应的路由中的节点有且只有一个下游节点; 式(7)、式(8)表示所利用的光纤和波长要小于总资源数。

2) 流量约束。

$$\sum_m p_{mn}^i = V_n^i, \quad \forall i, \forall n \neq s_i \quad (9)$$

$$\sum_m p_{ms}^i = 0 \quad (10)$$

$$\sum_n p_{mn}^i \geq V_m^i, \quad \forall i, \forall m \neq d_i \quad (11)$$

式(9)表示每个消息流均是从上游节点发出; 式(10)表示对于源节点, 没有上游消息; 式(11)表示每个消息流向下游节点发出至少一份。

3) 时延约束。

$$d_{T(d)} = \sum_{m,n} \frac{(\sum_c y_{mn}^{i,c,d}) \cdot L_{mn}}{S_c}, \quad \forall m, n > m, \forall i \quad (12)$$

$$d_{T_i} = \max d_{T(d)}, \quad d_j \in d_i \quad (13)$$

$$d_{T_i} \leq \Delta_d \quad (14)$$

式(12)表示对于任意目的地的延迟计算; 式(13)、式(14)保证消息最大延迟小于所要求的延迟。

4) 波长约束。

$$\sum_c C_c^i = 1, \quad \forall i \quad (15)$$

$$F_{mn}^{i,c} + F_{nm}^{i,c} \leq C_c^i, \quad \forall m, n, i, c \quad (16)$$

$$\sum_i F_{mn}^{i,c} \leq 1, \quad \forall m, n, \forall c \quad (17)$$

式(15)表示任何消息仅占用一个波长;式(16)表示任何消息在任何光纤上最多利用一个波长;式(17)代表一个波长在一个方向上最多被一个消息所利用。

2.2 有波长转换的全光多播 MRWA-DC 算法

考虑一个复杂些的场景,假设网络路由器包含波长转换器,波长转换器能将 WDM 传输的一个波长转换为另一个波长^[8],由于它的加入,波长可以任意转换,因此,对比在波长一致的全光网络场景,约束条件进行了如下改进。

在网络拓扑约束上,式(2)~式(8)保持不变;在流量约束上,式(9)~式(11)保持不变;在波长约束上仅保留式(17),即 $\sum_i F_{mn}^{i,c} \leq 1, \forall m, n, \forall c$ 。在时延约束上,由于波长转化的加入,则进行了修正

$$T_n^{i,d} = \begin{cases} 1, & \text{if } \forall c, m, n \neq \\ & s_i \cup d_i: \sum_m y_{mn}^{i,c,d} = \sum_k y_{nk}^{i,c,d} \\ 0, & \text{if } \exists c, m, n \neq \\ & s_i \cup d_i: \sum_m y_{mn}^{i,c,d} \neq \sum_k y_{nk}^{i,c,d} \end{cases} \quad (18)$$

$$d_{T_i(d)} = \sum_{m,n} \frac{(\sum_c y_{mn}^{i,c,d}) \cdot L_{mn}}{S_c} + d_w \sum_n T_n^{i,d_j}, \quad \forall m, n > m, \forall i \quad (19)$$

$$d_{T_i} = \max d_{T_i(d)}, \quad d_j \in d_i \quad (20)$$

$$d_{T_i} \leq \Delta_{d_i} \quad (21)$$

式(18)判断该节点是否会进行波长转换;式(19)表示对于任意目的地的延迟计算;式(20)、式(21)保证消息最大延迟小于所要求的延迟。

3 算法仿真及结果分析

本文采用 NSFnet 网络拓扑进行仿真实验,由于权重的加入,假设 NSFnet 网络如图 2 所示。

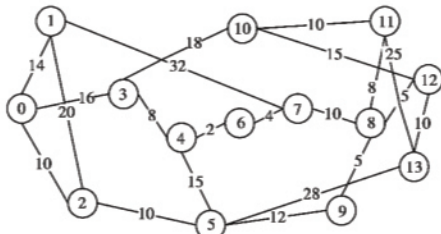


图2 NSFnet 拓扑
Fig.2 NSFnet

同时,假设每个节点和光纤的参数都一样,每一个光纤上包含 3 个波长。表 1 显示了消息参数。

表 1 消息参数

Table 1 Sessions

消息	源节点	目的节点
S1	0	3,4,12
S2	1	2,7,9,10,11
S3	3	2,4,6,8,7,13
S4	5	7,9,11
S5	10	0,1,2,3,4,5,6,8,12,13
S6	12	0,1,2,3,4,7,8,10,11

使用 LINGO 来进行该 ILP 问题的计算。这 3 个算法的复杂度都是 $O(kdWN^2)$,当计算了传输延迟之后,发现对于该场景,传输延迟非常小,是纳秒级别,但实际延迟基本为微秒级别,因此,该延迟可以忽略不计,所以对于第 1 个算法,复杂度可以减少为 $O(kWN^2)$ 。同时,由于对于有波长转换场景的算法,波长转换才是主要的延迟参数,因此,可以把问题简单化为对于一个消息而言,在传输过程中最多只能有 3 次波长转换。仿真结果如表 2、表 3 所示。

表 2 波长一致路由

Table 2 Network without converter

消息	路径	波长	费用
S1	0-3 3-4 4-6 6-7 7-8 8-12	λ_1	45
S2	1-2 2-5 5-9 9-8 8-7 8-11 11-10	λ_1	75
S3	3-4 4-6 6-7 7-8 8-12 5-13 4-5 5-2	λ_2	92
S4	5-9 9-8 8-11 8-7	λ_2	35
S5	10-12 12-8 12-13 10-3 3-0 0-1 0-2 2-5 5-4 1-7 7-6	λ_2	149
S6	12-8 8-11 11-10 8-7 7-6 6-4 4-3 3-0 0-1 0-2	λ_3	87
总费用			483

表 3 存在波长转换路由

Table 3 Network with converter

消息	路径	费用
S1	0-3 3-4 4-6 6-7 7-8 8-12	45
S2	1-2 2-5 5-9 9-8 8-7 8-11 11-10	75
S3	3-4 4-6 6-7 7-8 8-12 12-13 4-5 5-2	64
S4	5-9 9-8 8-11 8-7	35
S5	10-12 12-8 12-13 10-3 3-4 4-6 4-5 5-2 2-0 0-1	121
S6	12-8 8-11 11-10 8-7 7-6 6-4 4-3 3-0 0-1 0-2	87
总费用		417

从表中初步可以看出,有波长转换器的网络场景由于有更多波长的选择,因此,总费用要小于波长一致的情况。

然后以消息 5 为例进一步对结果进行分析。对于算法 1、算法 2,消息 5 的路径如图 3、图 4 所示。

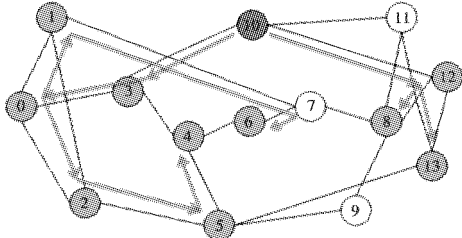


图 3 波长一致光树

Fig. 3 Light-tree for network without converter

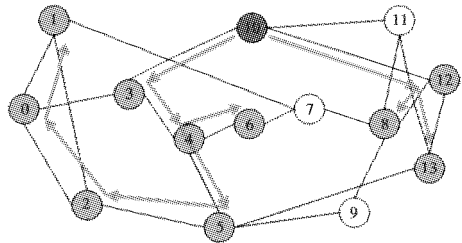


图 4 存在波长转换光树

Fig. 4 Light-tree for network with converter

从图 3、图 4 的对比可以看出,由于波长转换器的作用,虽然使延迟增加了波长转换产生的时间,但在时间约束的限制内,消息依然可以选择费用更小的路径进行传播,因此,虽然基于波长转换的算法复杂度更高,但是它的总费用比波长一致的情况要小。

4 结论

波长路由的设计对于网络性能有着重要的意义,本文针对航电全光波分复用网络提出了以最小化网络总费用为目标函数的线性规划算法,该算法根据网络物理拓扑和虚拓扑的特点给出了相应的约束,并对消息延迟进行了限定。通过把算法用于实例可以看到,该算法能够设计出满足航空电子网络要求的虚拓扑,同时也可以看出波长转换器的利用能够提高网络波长

的利用率,从而降低网络总费用。

参考文献

- [1] REARDON C, PROFUMO J, GEORGE A D. Comparative simulative analysis of WDM lans for avionics platforms [C]//IEEE, MILCOM, 2006:1-7.
- [2] 王雄. WDM 光网络中的多播算法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2008.
WANG X. Research on multicast algorithms in WDM optical networks[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2008.
- [3] SINGHAL N K, SAHASRABUDDHE L H, MUKHER J B. Optimal multicasting of multiple light-trees of different bandwidth granularities in a WDM mesh network with sparse splitting capabilities [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2006, 14(5): 1104-1117.
- [4] ZHANG X J, WEI J Y, QIAO C M. Constrained multicast routing in WDM networks with sparse light splitting [C]// Proceedings of INFOCOM 2000: 1817-1827.
- [5] CHEN M T, LIN B M T, TSENG S S. Multicast routing and wavelength assignment with delay constraints in WDM networks with heterogeneous capabilities [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2008, 31(1): 47-65.
- [6] WANG X, WANG S, LI L M. A novel efficient multicast routing algorithm in sparse splitting optical network [J]. Photonic Network Communications, 2007, 14(3): 287-295.
- [7] WANG J P, YU X S, YUAN J L, et al. An improved multicast routing algorithm in sparse splitting optical networks [C]// Communications and Photonics Conference and Exhibition, 2009: 1-8.
- [8] 邓忠礼. 光同步传送网和波分复用系统 [M]. 北京: 北方交通大学出版社, 2003.
DENG Z L. Light synchronous transmission network and WDM system [M]. Beijing: Beijing Jiaotong University Publisher, 2003.

欢 迎 投 稿 欢 迎 刊 登 广 告