航空科学技术
Aeronautical Science & Technology
Jul. 25 2019 Vol. 30 No.07 62-67

基于波长共享机制的机载WDM网络波长分配算法

李瑞欣*，赵海燕，朱蒙，于龙强
空军工程大学 信息与导航学院， 陕西 西安 710077

摘　要：针对航电网络节点间信息量的不同，依据子网划分理论，提出了一种光电混合式航电波分复用（WDM）网络结构，并在此基础上提出了一种基于邻接会话和行（列）会话共享波长的机载WDM子网路由波长分配算法。定义了邻接会话和行（列）会话，分析了会话间共享波长的原理，推导了波长需求数目。仿真结果证明，正常情况下该算法波长需求数目与Token算法一样，最好情况下相比Token本算法可减少$\lceil N/6 \rceil$的波长耗费（N为网络节点数），达到了有效利用波长的目的，且简单易实现，是一种值得参考的机载WDM网络RWA设计方法。

关键词：机载WDM网络；波长分配；子网；邻接会话；行（列）会话；共享波长

中图分类号：V243.1　　**文献标识码**：A　　DOI：10.19452/j.issn1007-5453.2019.07.010

由于波分复用（WDM）光网络具有带宽大、抗干扰能力强、延迟小、重量(质量)轻、插损小、功耗低、多协议透明传输等优点[1]，非常适合应用在机载航电网络中，有助于解决机载总线型网络带来的不足，学者们从不同角度对此进行了深入研究[2~8]。WDM网络中，依据光通道建立请求分配波长，即路由与波长分配问题（Routing and Wavelength Assignment,RWA）。由于机载通信网络的确定性特点，机载WDM的RWA问题就是如何用最少的波长承载机载通信业务，满足实时性要求。目前机载WDM网络研究热点是光电混合形式。据SAE组织统计，未来电子战的每通道数据率大致范围是1~3Gbps（bit/s），而雷达每通道数据率也大致达到1Gbps，所以这些部分是首先使用WDM网络的。在适合使用WDM技术的各个部分其速率要求也参差不齐，若把这些部分混合到一个网络内，通信的流量、通信的距离等不够均匀，不利于网络负载的平衡。参考文献[9]使用多维空间聚类方法把通信量接近的部分组成子网，子网内部使用WDM技术；子网间由于通信量不大，交换的信息限于处理完毕的低速率信息、控制和状态信息等，用成熟的电交换技术实现，这种划分子网的方法值得借鉴。

本文提出了一种基于子网的光电混合WDM网络架构，设计了一种基于邻接会话共享波长和首次命中（FF）算法的机载WDM子网内的波长分配方案。仿真证明算法减小了波长需要数，降低了网络阻塞率，满足了机载网络传输的需要。

1 光电混合航空电子WDM网络架构设计

根据参考文献[10]提出的子网划分过程，假设可划分为4个子网，设计了光电混合式机载航电网络架构如图1所示。子网内部使用WDM形式进行通信，而子网间使用现有的FC电交换机连接，这样只要电交换机容量许可，子网的扩充是没有任何问题的，即使未来FC电交换机不能满足吞吐量要求，可以使用光交换机来替换而不会影响子网内的通信。这种架构的优点是可扩展性好、能为不同速率的业务提供服务、数据独立性好、容量大、速率高（至少能达到10Gbps以上）、抗电磁干扰能力强、健壮性容错性好、对上层协议透明等。

收稿日期：2019-05-06；退修日期：2019-06-13；录用日期：2019-06-18
基金项目：陕西省自然科学基金（2016JM6073）；国家自然科学基金（91638101）
*通信作者. Tel.：029-84791462　　E-mail：cftegh@sina.com
引用格式：Li Ruixin, Zhao Haiyan, Zhu Meng, et al. Wavelength assignment for avionic WDM optical subnet based on sharing-wavelength scheme[J]. Aeronautical Science & Technology, 2019, 30(07): 62-67. 李瑞欣，赵海燕，朱蒙，等. 基于波长共享机制的机载WDM网络波长分配算法[J]. 航空科学技术，2019，30(07)：62-67.

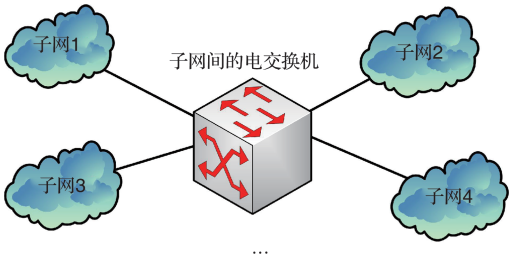

图1 机载光电混合网络的结构

Fig.1 Structure of avionic hybrid optical-electric network

子网内部可采用环形结构，也可采用星形结构。星形结构简单，但对调度算法要求较高，环形结构具有较强的故障恢复能力，鲁棒性较好。所以这里采用环形结构，有三层考虑：(1)环形网络在地面局域网和城域网已应用多年，具有技术成熟，硬件可得的优势；(2)环网具有多业务支持能力和子速率复用能力，这种能力特别适合传感器种类较多的机载设备；(3)环形网具有较强的保护倒换能力，即光路保护和故障恢复能力较强，这对于航空数据的传输来说很有吸引力。

2 WDM环形子网的波长分配算法

2.1 WDM网络波长分配算法研究现状

丹麦技术大学的Jiang Zhang提出了一种系统隔离限制要求下的、基于模拟退火方法的WDM航空网络波长和光纤分配算法[11]，选用的拓扑结构是环形结构。模拟退火是一种基于迭代计算的优化过程，目的是找到接近全局最小的值。该文献中将分配算法分为路由选择、波长分配、光纤分配三个步骤。在路由选择环节，选路原则是找到环形拓扑中已用边数最少的通路，并尽量减小波长数目；在波长分配环节，使用了染色图的方法，但它的仿真结果是针对多播业务的，不具有普遍性。美国海军学院的Clifford N. Jessop团队研究了机载WDM Ring具有波长转换功能的路由算法[12]，结果表明使用波长转换功能可以降低57%的延迟，在较小的功率损失下得到了较低的误比特率，但是该文献并没有给出具体的路由和波长分配算法。

刘晓敏提出了一种基于多令牌协议的航电WDM光环形网波长分配算法[13]，此协议下的波长分配方法在网络中可以实现波长重用，比传统环网的波长数目平均降低了58.1%，优化了波长数目，满足了航空电子系统对实时性的要求。但是该文献使用了令牌来控制阻塞率，前提条件是假设令牌数等于波长数。只有得到令牌的节点才能进行波长的分配和数据的发送，若连续有两个节点满消息传输，则按照其波长分配方案，该两个节点传输数据期间，令牌将全部占用，其余节点将不会得到令牌，即没有波长分配机会，就无法传递数据，将会不可避免地产生拥塞。参考文献[10]使用多维空间聚类方法把通信量接近的部分组成子网，子网内部使用WDM技术；子网间由于通信量不大，交换的信息限于处理完毕的低速率信息、控制和状态信息等，用成熟的电交换技术实现，这种划分子网的方法值得借鉴。但是该文献对子网内的其他问题未进行深入研究。

2.2 基于邻接对的启发式子网WDM网络波长分配算法

机载WDM网络中，端系统之间通过建立光通道进行通信，依据光通道建立请求，需要进行路由选择并分配波长。由于机载通信的实时性要求很高，在连接请求随机到达的情况下，如何在短时间内及资源有限的情况下为连接请求分配一条合适的链路和波长，尽量减小呼叫阻塞率是一个较为复杂的问题，在通信理论中是NP-complete问题[9]。

本文设计了一种依据事先预置备选路由情况下的波长分配算法。具体方法是首先在预置的路由表中选择一个合适的路由，然后再在该路由内部进行波长分配。

考虑没有波长变换能力情况下的双向WDM子网。相邻的两个节点通过光纤连接在一起，所有的光纤中都包含了相同数目的波长数。这里假设每个会话业务的速率都足以占用一个波长(实际上，很多子系统的业务可以通过复用器复用到一个波长上)。在任一时刻，一根光纤内一个特定的波长只能承载一个会话业务，但是多个会话业务可以经过相同的节点。

(1) 定义

定义1

定向波长：定向波长为环网中顺时针或逆时针方向的一个波长。假如在每根光纤中有W个波长，则在顺时针方向和逆时针方向各有W个定向波长。环形网的任一方向的定向波长可以传输任何业务会话。

定义2

邻接会话：如果一个会话业务的目的节点是另一个会话业务的源节点，则这两个会话可称为邻接会话。

定理1

在双向环网中，与任一对相邻会话对应的光路可以在顺时针或逆时针方向上共享一个定向波长。

参考文献[14]证明了该定理。举例如图2所示。图2(a)中4→2和1→4是相邻会话，若沿顺时针方向传输数据，

它们的路径上有一段是重叠的，需要两个不同的波长进行传输；但若是按照逆时针方向传输，它们刚好可以共享一个定向波长，这样逆时针传输就比顺时针传输节省了一个波长。这个结论对于波长资源有限，且容易产生路径重叠的环网来说是一个节省波长资源的好方法。所提出的静态路由波长分配算法就是基于该定理论述。

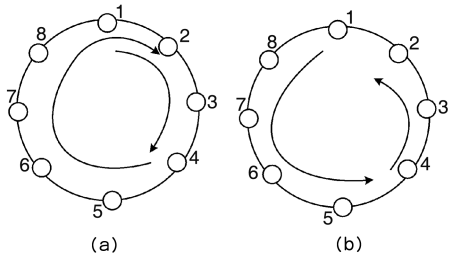

图2 邻接会话共享一个定向波长

Fig.2 Adjacent sessions share a directed wavelength

定义3

反向波长：环形网内同一源点发送出去的不同方向的波长或同一目的节点接收的波长。

定义4

行(列)会话：环形网消息流矩阵中的同行会话(源节点相同)、同列会话(目的节点相同)称为行(列)会话。

定理2

在双向环网中，同行(列)内的行列会话可以在共享一个反向波长(一个顺时针方向，一个逆时针方向)。

定理2成立是显而易见的。如图3所示，图3(a)中节点1发送两个消息流，1→4和1→6，由于没有重叠链路，所以可以共享一个波长，但方向不同；图3(b)中节点6和节点4分别向节点1发送消息，互相没有重叠链路，可以共享一个波长，方向相反。这样通过反向波长的使用，可以节省1/2的波长数，有效缓解了环形网重叠链路较多导致波长分配受限的现象。

(2) 子网内路由波长分配算法

假设：环形骨干网络上的每个节点处都预置从这个节点到任一其他节点间的不同路由，这些路由按照方向分为顺时针和逆时针方向两类，并按照跳数进行排序，跳数少的路由在前，跳数多的路由在后，形成初步的路由表。当一个环网共有N个节点时，每个节点上的路由表大小为$2(N-1)$条。

子网内静态路由及波长分配算法(RWA)的实现步骤：

(a) 由于机载WDM通信业务是确定性业务，即事先知道其通信方向、通信量、周期等参数，可由这些参数建立子网的流量矩阵；检测流量矩阵两两节点间有无存在邻接会话，凡是存在的，两个会话共享一个波长；波长的方向可以是顺时针也可以是逆时针，只要能共享一个波长即可。

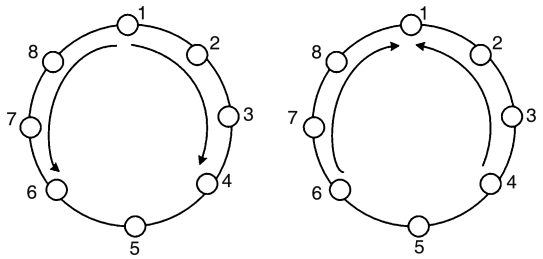

图3 行(列)会话共享一个反向波长

Fig.3 Row(Column) sessions share an opposite direction wavelength

(b) 邻接会话波长分配完成之后，未分配到波长的消息在流量矩阵内查找有无行(列)会话，若有则两两共享一个波长即可，路由选择最短的路由方向。

(c) 除(a)、(b)步骤外，若还存在无法和其他会话共享波长的会话，则在最短路由方向使用首次命中波长分配策略(长路由优先LP)。

上述RWA算法的前提条件是：只有相邻会话和行(列)可以共享一条波长。

3 结果及分析

3.1 波长需要数分析

(1) 反方向波长共享分析

N个节点的网络中，消息流集合组成了消息流矩阵：

$$\begin{bmatrix} 0 & M_{01} & \cdots & M_{0(N-1)} \\ M_{10} & 0 & & M_{1(N-1)} \\ \cdots & & & \cdots \\ M_{(N-1)0} & M_{(N-1)1} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

假设消息流M_{ij}表示节点i到节点j的消息流，在双向环网上，同行(列)的任意两个消息流可以共享一个波长(两个不同方向)，如图3所示。这样行(列)从每行$N-1$个有效消息流中任选两个，可以有种可能，若为满消息传输需要的波长数为条。当矩阵中共有W个消息流可以形成相反方向波长共享情况时，则只需要$W/2$个波长就够了。

(2) 同方向波长共享再次共享情况分析

消息流矩阵中的元素M_{ij}可以和$M_{jkkn}(0<i,j,k\leqslant N)$共享一条同向波长，根据前面的分析知这样的多个消息流可称为邻接会话(Adjacent Mission)，这样M_{ij}可以和$N-1$个M_{jk}组

成邻接会话，所以可组成的总的邻接会话数为$N-2$个，所以整个消息流矩阵需要的波长数为$\lceil (N-2)/2 \rceil$条。当矩阵中共有M个消息流可以形成相同方向波长共享情况时，则只需要$M/2$个波长就够了。如该共享波长在反方向再次分配给某一消息，则所需的波长数目为$\lceil N/3 \rceil$，该情况如图4所示。消息1→4和4→2形成邻接会话，在逆时针方向可共享一个波长；如果此时又有一个从1→5的消息要传输，则可在顺时针方向把该波长分配给该消息使用，这样就是三个消息共享了一个波长，更能有效利用波长。

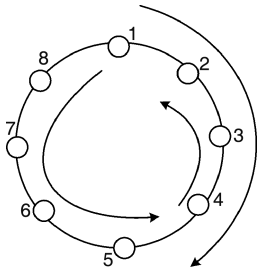

图4 邻接会话共享波长反方向再次分配

Fig.4 Adjacent session opposite sharing direction wavelength assigned again

（3）不能形成共享波长的情况分析

当不能共享会话波长时，采用路由跳数最短方法来选择路由，然后再在此基础上使用首次命中策略随机分配波长即可。需要的波长数为：

$$W_{MH}=\lceil I/(N-1) \rceil \cdot (N^2/8+N/4)$$

式中：N为偶数；I为网络传输的信息量，由网络中的一个节点传输到其他所有的节点。

假设网络是满消息传输时，即

$I=N-1$时，所需的波长数目$W_{MH}=N^2/8+N/4$。

综合以上分析，环形子网所需的波长数分配如下：

$$|W|=\begin{cases} M/2,\text{反方向共享波长情况},M\text{为同行（列）消息个数} \\ M/2,\text{同方向共享波长情况},M\text{为形成邻接会话对的消息个数} \\ \lceil N/3 \rceil\text{邻接会话波长可被反向共享时} \\ N^2/8+N/4,\text{未找到邻接会话对和在消息矩阵中不处于同行（列）} \\ N\text{为节点个数（满消息传输）} \end{cases}$$

根据以上分析，对比了几种波长分配算法所用波长数目，图5是MH算法、Token、共享波长算法的比较。由于整个航电网络已被分为多个子网，这里取节点数小于10。统计可知，采用共享波长算法的所用波长数比令牌协议Token要少$\lceil (N/6) \rceil$个。

3.2 时延性能比较

航空电子网络的物理范围较小（<100m），所以光纤线路产生的传播时延d_{prop}可以忽略不计，则环网的网络时延$d=d_{send}+d_{queue}+d_{search}$，其中$d_{send}$为发送时延，$d_{queue}$为缓存引入的时延。本文提出的波长分配算法在时延性能上只能影响网内处理时间d_{search}，主要体现在对邻接会话、行（列）会话的搜索上。根据参考文献[15]的研究，基于地址空间的路由表的搜索时间复杂度为$O(\log_2 N)$，N为地址前缀表中的前缀数目，子网内节点数目N本身较少，$O(\log_2 N)$较小，故d_{search}的大小不会对环网时延产生微秒左右的影响。而据参考文献[16]的研究，按照其仿真参数预置，运用确定性网络演算理论，混合式机载WDM在网内负载和网间负载不同的比例下都可以达到机载网络强实时的要求，并且随着网内业务比例的增加，平均端到端时延也随之下降，性能较FC网络要好很多。在网内负载和网间负载比例为50%时，传统FC网络的最大端端时延为1200μs，而混合式WDM网络最大端端时延为920μs左右，平均时延在此比例下传统FC网络的端端时延为320μs左右，而混合式WDM为185μs左右，并且随着网内业务的增加，时延性能比较更为明显，从而也证明了在子网的基础上进行波长分配不但减小了波长数目耗费，同时也满足了机载网络的强实时要

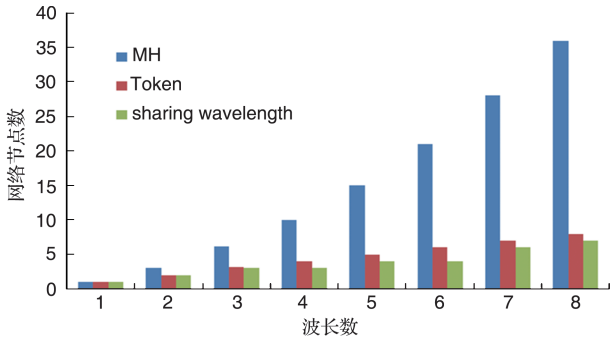

图5 波长数目的比较

Fig.5 Comparison of wavelength number

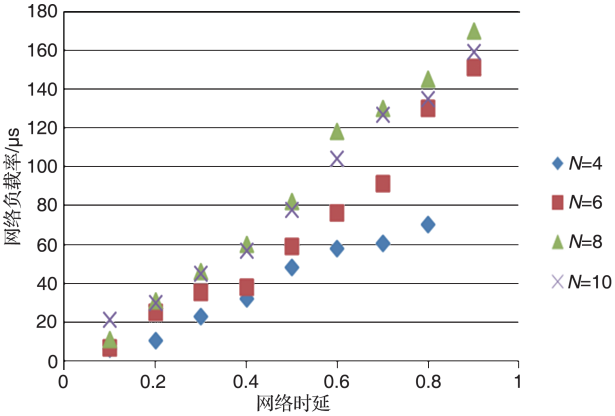

图6 子网内节点数不同情况下的时延与负载关系图

Fig.6 Relationship of delay and load in subnet

求。图6是子网内波长数不同情况下的时延与负载关系图，可以看出随着负载的增大，网络时延也在增大；随着网络中节点数目的增加，同样的负载下网络时延随之增大，这表明仿真结果与理论分析是一致的。

4 结论

本文在机载WDM子网的基础上，提出了一种基于邻接会话和行(列)会话共享波长的一种机载WDM子网波长分配算法，定义了邻接会话和行(列)会话，分析了两种会话共享波长的原理，给出了不同情况下的波长需求数目，仿真结果证明相比MH算法和Token算法，本算法不但能够有效降低所需波长数目，且与Token算法相比，本算法易于实现，控制简单，是一种可行的机载WDM网络波长路由分配方法。

参考文献

[1] 韩太林,韩晓冰,臧景峰. 光通信技术[M]. 北京：机械工业出版社，2011.
Han Tailin, Han Xiaobing, Zang Jingfeng. Optical communication technology[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2011. (in Chinese)

[2] 刘晓敏,朱建良,张龙,等. 统一航空电子WDM光网络容错建模研究[J]. 中国电子科学院学报，2015，20(2)：138-143.
Liu Xiaomin, Zhu Jianliang, Zhang Long, et al. The modeling of WDM optical network for unified avionics network[J]. Journal of China Academy of Electronics and Information Technology, 2015, 20(2): 138-143. (in Chinese)

[3] 黄金，凌云，邱昆. 基于FC over WDM架构的航电网络研究[J]. 电子科技大学学报，2014，43(4)：823-828.
Huang Jin, Ling Yun, Qiu Kun. Reaearch of avionic network based on FC over WDM architecture[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2014, 43(4): 823-828. (in Chinese)

[4] Reardon C, Profumo J, George A D. Comparative simulative analysis of WDM LANs for avionics platforms[C]// Atlantic City: IEEE, MILCOM, 2006: 1-7.

[5] Habiby S F, Vaidyanathan R. WDM optical backbone networks in aircraft applications: networking challenges and standards progress[C]// Boston, MA: IEEE, MILCOM, 2009: 1-6.

[6] 史春燕. 基于WDM的未来机载航电网络架构和关键技术研究[D]. 西安：西安电子科技大学，2017.
Shi Chunyan. Study on the key technology and architecture of the future WDM-based avionic networks[D]. Xi'an: Xidian University, 2017. (in Chinese)

[7] 焦龙. 基于波长路由算法的航电WDM网络[J]. 电脑知识与技术，2018(14):17-18.
Jiao Long. Avionics network based on wavelength routing algorithm[J]. Computer Knowledge and Technology, 2018(14): 17-18. (in Chinese)

[8] 王岩，熊颖. 航电全光波分复用网络的波长路由算法研究[J]. 电光与控制，2014(02)：1-4.
Wang Yan, Xiong Ying. Routing and wavelength assignment algorithm of avionics all-optical WDM network[J]. Electionics Optics&Control, 2014(02): 1-4. (in Chinese)

[9] Chlamtac I, Ganz A, Karmi G. Lightpath communications: an approach to high bandwidth optical WANs [J]. IEEE Transaction Communication, 1992, 40(7): 1171-1182.

[10] 任宇，邱昆，凌云，等. 基于多维空间聚类算法的波分复用子网划分[J]. 光学学报，2013，33(2)：0206001-1-0206001-6.
Ren Yu, Qiu Kun, Ling Yun, et al. Wavelength division multiplexing subnet partition based on clustering algorithm in multidimensional space[J]. ACTA Optica Sinica, 2013, 33(2): 0206001-1-0206001-6. (in Chinese)

[11] Jiang Zhang, Yi An, Michael S Berger, et al. Developing a generic optical avionic network[C]// Ayia Napa, Cyprus: IEEE, Proc of 18th International Conference on Telecommunications, 2011: 244-249.

[12] Clifford N, Jessop R, Brian J, et al. Routing in an optical local area network using wavelength conversion[C]// Annapolis: IEEE, Avionics Fiber-Optics and Photonics, 2006: 24-25.

[13] 刘晓敏，丁凡，赵长啸，等. 基于多令牌协议航电WDM光环网波长分配方法[J]. 航空学报，2012，33(5)：879-884.
Liu Xiaomin, Ding Fan, Zhao Changxiao, et al. Wavelength assignment for avionic WDM optical ring network based on multi-tokens protocol[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2012, 33(5): 879-884. (in Chinese)

[14] Poompat S, Eytan M, Robert G G. On-line routing and wavelength assignment for dynamic traffic in WDM ring and torus networks[J]. IEEE Transaction on Network, 2006, l4 (2): 330-340.

[15] 徐恪,徐明伟,吴建平,等.路由查找算法研究综述[J].软件学报,2002,13(1):42-50.
Xu Ke, Xu Mingwei, Wu Jianping, et al. Survey on routing lookup algorithm [J]. Software Journal, 2002, 13(1): 42-50. (in Chinese)
[16] Huang Jin,Qiu Kun,Xu Bo, et al. Design of a hybrid switching architecture for avionic WDM platforms[J]. Optoelectronic Letters, 2014,10(1):0063-0066.

(责任编辑 王为)

作者简介

李瑞欣(1973-) 女,博士,讲师。主要研究方向:机载WDM网络及交换技术。
Tel: 029-84791462
E-mail: cftegh@sina.com
赵海燕(1980-)女,硕士,讲师。主要研究方向:网络管理技术。
Tel: 029-84791454
E-mail: haiyan@163.com
朱蒙(1985-)男,硕士,讲师。主要研究方向:网络信息处理技术。
Tel: 029-84791156
E-mail:victory@163.com
于龙强(1988-)男,博士,讲师。主要研究方向:网络同步技术。
Tel: 029-84791461
E-mail:LQYU@sohu.com

Wavelength Assignment for Avionic WDM Optical Subnet Based on Sharing-wavelength Scheme

Li Ruixin*, Zhao Haiyan, Zhu Meng, Yu Longqiang
School of Information and Navigation, AFEU, Xi'an 710077, China

Abstract: Aiming to different traffic of avionic network node, an optical-electric mix structure is proposed based on subnet division theory, and then an avionic WDM subnet Routing and Wavelength Assignment(RWA) algorithm is brought out based on adjacent session and row(column)session sharing wavelength. The algorithm gives the concept of adjacent session and row (column) session, analyses the principle of sharing wavelength, and derives the wavelength number formula in different conditions. Simulation results show the wavelength requirement is same with Token algorithm in most conditions, but in best condition the proposed algorithm can reduce $\lceil (N/6) \rceil$ (N is the subnet node number) wavelength number comparing with Token algorithm, achieving the purpose of efficient usage of wavelength. Besides this, the proposed RWA is easily realized. So the RWA is a worthy avionic WDM network RWA method reference.

Key Words: avionic WDM network; RWA; subnet; adjacent session; row(column) session; sharing wavelength

Received: 2019-05-06; **Revised:** 2019-06-13; **Accepted:** 2019-06-18
***Foundation item:** Shanxi Natural Science Foundation Project (2016JM6073); National Natural Science Foundation of China(91638101)
***Corresponding author.Tel. :** 029-84791462 **E-mail:** cftegh@sina.com