

基于组播树的多粒度波带静态疏导算法

杨 帆 徐展琦 邱智亮 许齐钦 王正平 邢淇翔

(西安电子科技大学综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要 研究了波带交换中的静态业务疏导算法。波带交换可以有效地减少波长交换的端口数量,但是当波带粒度值取固定值时,波带的粒度难以取得合适值。波带的粒度大,有助于减少交换端口的数量,但是波带利用率低;波带粒度小,有助于提高波带利用率,但是交换端口的数量多。为此,提出了多粒度的波带取值方法。根据静态业务疏导与组播路由的相似性,提出了利用构造组播树解决静态疏导问题的方法。另外,为了减少波带与波长交换平面互联的端口数量,采用了同目的地的波带疏导策略,并针对这一疏导策略提出了一种新的波带疏导辅助图。仿真结果表明,相对于固定粒度的波带取值,可以有效地减少交换端口的数量,并提高波带利用率。

关键词 光计算;多粒度光交换;波带;组播树;波带业务疏导辅助图

中图分类号 TN915 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.0906004

A Multi-Granularity Static Waveband Grooming Algorithm Based on Multicast Tree

Yang Fan Xu Zhanqi Qiu Zhiliang Xu Qiqin Wang Zhengping Xing Qixiang

(State Key Laboratory of Integrated Services Networks, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

Abstract The static waveband grooming algorithm is studied. Waveband switching can effectively decrease the ports of wavelength switching. But the granularity of waveband is difficult to be set when it is constant. When the waveband granularity is large, the switching ports can be decreased while the waveband utilization is low. When the waveband granularity is small, the waveband utilization is high while the switching ports can be increased. To solve this problem, a multi-granularity waveband scheme is proposed. The static traffic grooming is similar to multicast routing in some degree. So the multicast tree is used to solve the waveband grooming problem. In order to decrease the connection ports between the waveband switching plane and wavelength switching plane, the same destination grooming scheme is adopted. A new waveband auxiliary graph is proposed for this grooming scheme. The simulation result shows that the scheme proposed can decrease the waveband switching ports and improve the waveband utilization ratio effectively.

Key words optics in computing; multi-granularity optical switching; waveband; multicast tree; waveband grooming auxiliary graph

OCIS codes 060.6781;060.1155; 060.4251; 060.4253

1 引 言

随着波分复用(WDM)技术的快速发展,目前一根商用光纤中复用的波长数量已达 160 路,实验室中已经可达 1000 路^[1~3]。随着光纤中复用的波长数量不断增长,如果使用纯波长交换的话,需要大量的交换端口,管理控制复杂。为此,多粒度光交换应运而生^[4]。多粒度光交换由光纤交换、波带交换

和波长交换构成,由于光纤和波带中包含多个波长,因此对光纤和波带的交换,可以完成多个波长的交换,有效地节省波长交换的端口数量。本文研究多粒度光交换中的波带交换技术。波带中包含的波长数量,称为波带粒度。波带粒度的取值非常关键。以往波带交换的研究中,波带粒度往往取固定的值。但是这会产生如下的矛盾:波带粒度大时,有助于减

收稿日期: 2011-12-30; **收到修改稿日期**: 2012-05-15

基金项目: 国家 863 计划(2009AA01ZZ254)、ISN 国家重点实验室基金(ISN1104003)、中央高校基本科研业务费专项(K50510010025)、高等学校创新引智计划(B08038)和陕西省自然科学基金(2011JM8037)资助课题。

作者简介: 杨 帆(1973—),男,博士,副教授,主要从事光网络方面的研究。E-mail: fany@xidian.edu.cn

少波带交换的端口数量,但是波带的利用率低,现有的许多研究表明,波带粒度大时波带的利用率往往要低于波带粒度小时的波带利用率^[5-7];波带的粒度小时,波带的利用率虽然高,但是波带交换的端口数量大。因此波带的粒度难以取得合适的值。解决这一问题的途径,是采用多种波带粒度,根据节点间的业务量,选取合适粒度的波带承载业务。本文研究多种波带粒度取值下的静态波带疏导算法。静态波带疏导算法,是指当节点间的统计业务量已知时,如何将节点间的业务进行汇聚,消耗尽量少的波带资源来传输业务。静态疏导算法主要用于光网络的规划设计^[8,9]。

对于静态波带业务疏导算法而言,有两个重要的目标:1)减少波带的使用数量,从而减少波带交换平面的交换端口数量,降低交换设备的成本及复杂度;2)提高波带的利用率,使波带中的空闲波长数量少,减少网络中总的波长消耗数量。要减少波带的数量,必须使用大粒度波带。但如果采用大粒度的波带导致波带利用率降低,是得不偿失的。为了解决这个问题,采用了两种方法:1)通过构造组播树的方法来提高波带的利用率;2)采用波带分裂的方法,一个大粒度的波带,如果还剩下空闲波长,将被分解成为多个小粒度的波带,在小粒度的波带层次上继续使用。仿真结果表明,采用了多种波带粒度后,波带的使用数量,与采用最大的单一粒度波带时的波带数量基本相当,但是波带利用率大幅度提高。

2 一种新的同目的地的波带业务疏导辅助图

把节点间的业务用波带装载时,有两种方法:1)向上装载,即把业务用一个比它自身业务量大的波带装载。例如节点间的业务量为12个波长,可以将其装入粒度为16个波长的波带。这种方法的好处是波带的使用数量少,但是波带内会出现空闲的波长。2)向下装载,即把业务依次装入多个粒度逐次降低的波带中。例如把12个波长的业务分别装入1个8粒度的波带和1个4粒度的波带。这种方法的好处是波带中的空闲波长少,但是使用的波带数量多。为了减少波带的使用数量,从而减少波带交换的交换端口数量,本文采用第一种方法。由于这种方法会在波带中产生空闲波长,因此减少空闲波长的数量,提高波带利用率,是本文算法的最主要目标。通过使用波带疏导的方法,将多个业务汇聚在

一个波带中传输,来达到这一目标。例如上面的例子中,粒度为16的波带中空闲的4个波长,可以通过疏导算法来传输其他业务。

利用波带疏导,可以用已建波带中的空闲波长来传送其他业务^[10-13]。为了充分使用已建波带,采用了基于辅助图的方法^[14-17]。把节点间的已建波带用逻辑路径表示出来,与物理链路相区别。在为业务计算路由时,把逻辑路径赋予较低的权值,这样,业务就会优先使用已建的波带传输,从而达到使用已建波带中空闲波长的目的。

对于波带疏导策略,使用同目的地的策略,即把目的地相同的业务汇聚在一个波带中传输。之所以使用同目的地的策略,主要是因为:在以往多粒度光交换的研究中,波带交换平面与波长交换平面需要耗费大量的互联端口,会到达波带交换平面端口数量的40%^[18]。出现这种现象的原因,是在把波长业务汇聚成波带时,把目的地不同的波长业务汇聚在了一起。在这些业务共同路径的终点,需要把波带解复用成波长,然后把把这些波长送入波长交换平面,并交换到各自不同的传输路径上去。而使用同目的地的疏导策略,由于将目的地相同的波长业务汇聚成一个波带传输,因而波带中的业务就不需要依靠波长交换平面来分离其传输路径,从而波带交换平面可以不需要与波长交换平面互联,可节省大量的波带交换端口。

在图1(a)中描述了同目的地的疏导策略,图中有3个节点,节点1到节点3之间建立有一个途经节点2的波带,则在节点1与节点3之间,节点2与节点3之间,有逻辑路径相连接,如图中的虚线所示,表示节点1去往节点3的业务以及节点2去往节点3的业务可以在这个波带中传输。在图1(b)中给出了同目的地的疏导辅助图。图中分3层,其中waveband layer用来表示物理拓扑的连接关系,而access layer和link path layer是逻辑层,已建波带的逻辑路径存在于逻辑层中。为逻辑路径赋予小的权值,业务使用最短路径进行路由时,就会优先地使用逻辑路径,即使用已建的波带来传输业务,从而可以提高已建波带上的波长利用率。该辅助图的另一个用处是可以统计波带交换中一个重要的器件(波带复用器)的使用情况。辅助图之所以用2个逻辑层,主要是为了统计使用的波带复用器数量。在一个交换节点,如果为一个波带分配了复用器^[19],以后再有业务在这个节点和该波带中的已有业务进行汇聚时,就可以使用已分配的复用器,不必

再重新分配复用器,否则,必须在业务汇聚时重新分配复用器。为了区分交换节点是否为波带分配了复用

器,并能够统计波带复用器的使用数量,使用2个逻辑层来表示已建的波带。

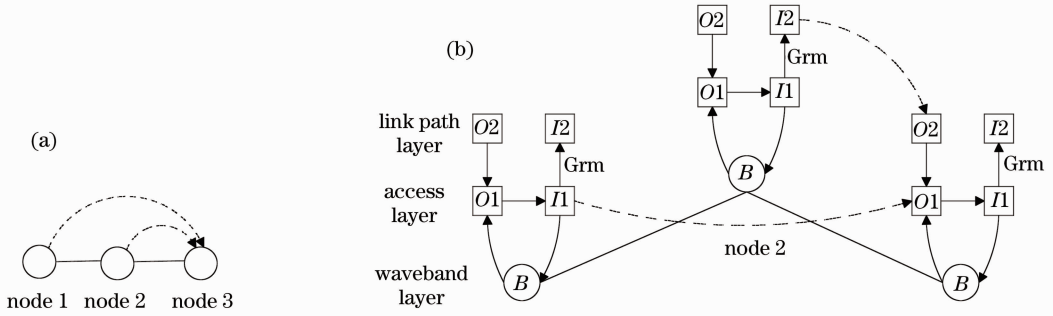


图1 同目的地疏导(a)及其辅助图(b)

Fig. 1 Same destination grooming (a) and its auxiliary graph (b)

辅助图中各个点以及连线的意义如下:

网络中的一个节点,在辅助图中由5个点组成,其中 link path layer 和 access layer 各2个点, waveband layer 中有1个点。网络中业务的源点在源节点的 access layer 的 I1 点,业务的目的点在目的节点的 access layer 的 O1 点。即业务从源节点的 I1 点进入网络,从目的节点的 O1 点离开网络。

如果一个节点中为一个波带中的波长业务汇聚使用了复用器,那么,就在这个节点的 I1 点和目的点的 O1 点之间建立一条逻辑路径。如图1(b)中,节点1的 I1 点和节点3的 O1 之间建立有一条逻辑路径。

如果一个波带途经一个节点,而该节点没有为该波带分配复用器,那么就在这个节点的 I2 点和目的节点的 O2 点之间建立一条逻辑路径,如图1(b)中,节点2的 I2 点与节点3的 O2 点之间建立有一条逻辑路径。

疏导边 Grm: 一个节点的 I2 点与 I1 点之间的连线,表示波带复用器的使用。例如在图1(b)中,如果节点2有业务要使用节点1到节点3的已建波带传输,其路由为节点2内部的 I1 → I2, 节点2的 I2 → 节点3的 O2, 节点3内部的 O2 → O1。可见,在该路由中,需要使用疏导边,即节点2使用波带复用器把节点2去往节点3的业务以及节点1去往节点3的业务复用在一起,在已建的波带中传输。而一旦一个交换节点为一个波带分配了复用器,就要将其与目的节点在 link path layer 的逻辑路径,换成 access layer 的逻辑路径。对应上面的例子,节点2一旦为业务使用了波带复用器,就要将节点2与节点3之间 I2 与 O2 之间的逻辑路径,替换为 I1 与 O1 之间的逻辑路径。当节点2再有业务使用该波带去往节

点3时,将使用 access layer 的逻辑路径,表示可以使用已有的复用器,不用新分配复用器。由于使用同目的地的疏导策略,波带中的波长业务的目的地相同,因此一个波带只在目的地才需要被解复用,所以解复用器的数目与网络中建立的波带数量相同,不需要用特殊的方法进行统计。

3 基于组播树的多粒度波带疏导算法

对于多粒度的波带交换,需要解决好两个问题:

- 1) 波带粒度的选择; 2) 提高波带利用率,特别是对于大粒度的波带,需要有效地利用已建波带中的剩余空闲波长。对于第一个问题,使用的波带粒度,按照2的整数次幂取值,即波带的粒度的值为2、4、8、...、 2^k 。之所以这样取值,是为了提高波带利用率,提出了波带平面分裂的方法。所谓波带平面分裂,包含两个内容: 1) 一个大粒度的波带平面,如果有些链路在路由大业务时没有被使用(称这些链路为空闲波带链路),则这些链路中的空闲波长将全部转入小粒度的波带平面继续供业务使用。 2) 当大业务在大粒度波带平面中完全被路由完毕后,如果某些大粒度的已建波带中,有空闲波长,则把这些大粒度的波带分解成为若干小粒度的波带,在小粒度的波带平面中继续使用。

图2给出了波带平面分裂的一个例子。图2(a)为一个粒度为16的波带平面的物理拓扑,图中的每条链路上包含有16个波长。当把业务在网络中路由的时候,采用的基本方法是把大业务用大粒度的波带装载,小业务用小粒度的波带装载,因而网络中的一个波带平面只装载了网络中相应业务量大小的业务,也就是只装载了部分节点间的业务。所以一个大粒度的波带平面用大业务装载完毕后,链路上会

出现以下三种情况:1)链路上的波长全部被使用完毕,如图 2(a)中的 $A-E-F-D$;2)链路上有闲置的波长,如图 2(a)中的 $B-C, F-C-D$;3)链路上的波长都没有被使用,如图 2(a)中的 $A-B, B-E$ 。对于后两种情况,要设法使用链路上的空闲波长,可以有以下两种方法:

1) 把小业务继续在大粒度的平面用大粒度的波带装载。但是正如引言中所述,从目前众多的已有研究结果来看,让大粒度的波带具有高的波带利用率比较困难,而让小粒度的波带具有高利用率则相对容易。特别是对于链路上有闲置的波长的情况,如果一个业务要利用已建波带传输,往往还需要新建一段波带链路。例如在图 2(a)中,假设 $B-C$ 的已建波带中的空闲波长数量为 7,而 $E-C$ 的业务量是 5 个波长,如果 $E-C$ 的业务要利用 $B-C$ 的已建波带传输的话,还需要新建 $E-B$ 的波带。但是如果新建的波带粒度是 16 的话,那么在 $E-B$ 的链路上,承载完 $E-C$ 的业务,又将出现 11 个空闲波长的链路。也就是说,为了利用 $B-C$ 之间的 7 个空闲波长,反倒造成了 $E-B$ 之间新出现 11 个空闲波长。可见,当大业务利用大粒度的波带装载完毕后,对于小业务,如果依然用大粒度的波带装载的话,往往并不具备好的效果。

2) 波带平面分裂技术,如图 2(b)与(c)所示。在这两个图中,把图 2(a)中 16 粒度波带平面空闲

波带链路以及有闲置波长的波带链路分解成为两个 8 粒度的波带平面。其中 $A-E-F-D$ 这条路径由于把 16 个波长都使用完,因此在图 2(b)及(c)的两个 8 粒度平面,链路 $A-E, E-F, F-D$ 中没有线路相连。而 $A-B, B-E$ 两条链路由于有 16 个空闲波长,因此在 2 个 8 粒度波带平面这两条链路都有线路相连。 $B-C$ 以及 $F-C-D$ 的两条波带路径,由于剩余波长不足 8,因此在一个 8 粒度波带平面 $B-C, F-C, C-D$ 有线路(逻辑路径)相连,而在另一个波带平面没有线路相连。进行波带分裂后,可以把小业务在分裂后的波带平面路由。例如上面的例子中, $E-C$ 的 5 个波长的业务可以在图 2(b)的波带平面路由,依然通过新建 $E-B$ 的波带,再利用 $B-C$ 的已有波带,实现业务 $E-C$ 的传输,但是 $E-B$ 的波带的粒度是 8,承载了 5 个波长的业务后,只剩 3 个空闲波长,比使用 16 粒度的波带的剩余波长大大减少。为了继续有效利用波带中的空闲波长,波带平面的分裂可以继续下去,8 粒度的波带平面,可以继续分裂为 2 个 4 粒度的波带平面,甚至 4 个 2 粒度的波带平面。之所以采用 2 的整数次幂的波带粒度,是因为可以将大粒度的波带方便地分裂为各级小粒度的波带,例如 1 个 16 粒度的波带,可以分裂成 2 个 8 粒度的波带;或者 1 个 8 粒度波带、2 个 4 粒度的波带;或者 1 个 8 粒度、1 个 4 粒度波带、2 个 2 粒度波带;或者 4 个 4 粒度的波带等,非常方便和灵活。

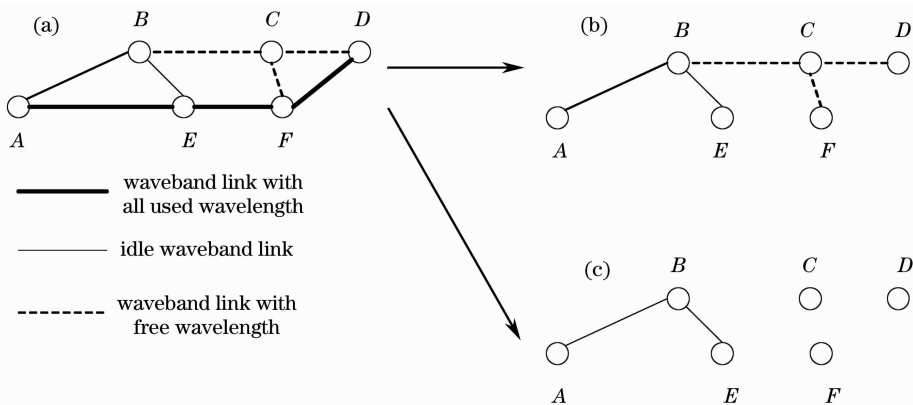


图 2 波带平面分裂示意图。(a)16 粒度波带平面的物理拓扑;(b)8 粒度波带平面 1;(c)8 粒度波带平面 2
 Fig. 2 Schematic of waveband plane splitting. (a) Topology of waveband plane with granularity 16; (b) waveband plane 1 with granularity 8; (c) waveband plane 2 with granularity 8

在为静态业务选路时,首先为大业务在大的波带平面内选路,再依次为小业务在小的波带平面内选路。波带平面的选择采用向上装载的方法,以减少波带的使用数量。该方法即业务量为 2^{k-1} 至 2^k 个波长的业务,在粒度为 2^k 的波带平面选路。大的

波带平面中没有使用完的波带,自动分裂为小的波带平面继续使用。小业务路由时,也可以使用一个全新的小粒度波带平面,但优先使用由大粒度平面分裂下来的小平面。

使用波带平面分裂后,有闲置波长的已建波带,

会将逻辑路径带入小波带平面,如图 2(b)所示。为了充分地使用这些已建波带,采用了构造疏导树的方法。如果想要利用已建波带,必须要进行业务汇聚,把有共同传输路径的业务汇聚到一起传输,这其实和组播路由的要求很相似。在组播路由中,源节点把业务传送到各个目的节点时,为了节省带宽,通过构造组播树来使源节点到各个目的节点的业务传输路径尽可能重合。而在进行业务的静态疏导时,由于一个节点去往其他各个节点的业务量已知,因此往往把节点间的业务量用一个业务矩阵来表示。业务矩阵的一行,表示着一个节点去往其他各个节点的业务量,所以可以采用构造组播树的方法,使从一个节点出发的各个业务的传输路径尽量重合,这样,为一个业务建立的波带中的剩余波长,就可以给其他业务使用。采用同目的地的疏导算法,以目的节点为根建立组播树,把去往同一个目的节点的业务传输路径尽量往一起汇聚,称这种汇聚了多个业务的组播树为疏导树。

组播树的构造算法采用的是最短路径启发式(MPH)算法^[20],该算法的思想是每次选择目的节点加入在建组播树时,总是把离在建组播树最近的节点先加入组播树。MPH算法的优点是算法的计算复杂度低,同时算法构造出的组播树树上路径总代价小。

将基于组播树的多粒度波带静态疏导算法称为多粒度波带静态疏导(MWSM)算法。其中 \mathbf{T} 为节点间的业务矩阵,业务矩阵中的元素 $a_{i,j}$ 表示节点 i 与节点 j 间的业务量, $a_{i,j}$ 的值为节点 i,j 间的业务需要使用的波长数量,不失一般性,假设 $a_{i,j} \leq 2^n$; \mathbf{T}_1 为业务量子矩阵 1,矩阵中的元素 $a_{i,j}^1$ 的值 $0 \leq a_{i,j}^1 \leq 2$,如果 $0 \leq a_{i,j} \leq 2$,则 $a_{i,j}^1 = a_{i,j}$,否则 $a_{i,j}^1 = 0$; \mathbf{T}_k 为业务量子矩阵 k ($1 < k \leq n$),矩阵中的元素 $a_{i,j}^k$ 的值 $2^{k-1} < a_{i,j}^k \leq 2^k$,如果 $2^{k-1} < a_{i,j} \leq 2^k$,则 $a_{i,j}^k = a_{i,j}$,否则 $a_{i,j}^k = 0$ 。

下面给出 MWSM 算法的流程:

1) Step1: 业务量矩阵分解 $\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \dots + \mathbf{T}_n$;

2) Step2: 建立粒度为 2^n 的最大粒度波带平面路由矩阵 \mathbf{T}_n 中的业务。如果 $a_{i,j}^n \neq 0$,就在波带平面中,节点 i 与节点 j 之间使用最短路由,建立粒度为 2^n 的波带来承载业务,并在图 1 的辅助图中建立相应的逻辑路径。如果 1 个粒度为 2^n 的波带平面容纳不下 \mathbf{T}_n 中的所有业务,则新建粒度为 2^n 的波带平面来承载 \mathbf{T}_n 中尚未路由的剩余业务。

3) Step3: 进行波带平面分裂。将 Step2 中使用的波带平面分裂为粒度为 2^{n-1} 的平面,为业务矩阵 \mathbf{T}_{n-1} 中的业务路由。采用基于组播树的方法,将 \mathbf{T}_{n-1} 矩阵中,各列的业务量总和按从大到小的顺序排序,矩阵中一列元素代表着去往一个目的节点的各个业务,为业务量总和大的列先建立疏导树,然后依次为业务量总和小的列建立疏导树。建立疏导树时,使用辅助图,在辅助图中,把离在建树近的目的节点加入组播树中。优先使用已有的波带平面为 \mathbf{T}_{n-1} 中的业务路由,如果已有波带平面再也装不下 \mathbf{T}_{n-1} 中的业务时,新建粒度为 2^{n-1} 的平面来为业务路由。

4) Step4~Step $n+1$: 按照 Step3 中的方法为 $\mathbf{T}_{n-2}, \dots, \mathbf{T}_1$ 中的业务路由。

5) Step $n+2$: 将所有的业务路由完毕后,执行波带合并。把上面波带平面分裂过程中从一个大波带分裂出的小波带,只要其中包含有使用过的波长,就将这些小波带重新组合成大波带,以节省波带数量。

在图 3 中给出了一个例子,说明了采用多粒度的波带与采用单一粒度的波带时的不同效果。

在图 3(a)与(b)中,分别有 3 个业务去往目的节点 D ,分别是 $A-D$ 的 9 个波长的业务, $G-D$ 的 5 个波长的业务, $I-D$ 的 2 个波长的业务。采用多波带粒度构造的疏导树如图 3(a) 所示。其中先建立 $A-D$ 的路径, $A-D$ 使用的是 16 粒度的波带, $A-D$ 的波带剩余 7 个空闲波长。之后 $A-D$ 的波带分解为 2 个 8 粒度的波带,其中一个波带的 8 个波长完全被占用,另一个波带的 8 个波长空闲 7 个。然后在 8 粒度的平面, $G-B$ 加入树, $G-B$ 的波带剩余 3 个空闲波长再进行波带平面的分裂,在 2 粒度的波带平面内, $I-F$ 加入树。最后再进行波带的重组,把 $G-B$ 路径上分裂的波带重新组合成一个 8 粒度的波带,把 $A-D$ 路径上分裂的波带,重新组合成一个 16 粒度的波带。可以看出,MWSM 算法在构造组播树的过程中,不同业务量的业务,按照适合自身的波带粒度,加入到疏导树中去,而在这些业务汇合的共享路径上,使用了大粒度的波带,一方面减少了波带的使用数量,另一方面,由于疏导树的使用,通过业务汇聚提高了波带的利用率,减少了空闲波长。在图 3(a)中, $B-D$ 这段路径上的空闲波长数量为 0, $F-B$ 这段路径上的空闲波长数量为 1, $F-I$ 这段路径上的空闲波长数量为 0。反之,如果不采用多种波带粒度,而是采用单一的波带粒度,依然使用构造组播树的方法形成业

务的共享传输路径,如果使用 16 粒度的波带,得到的结果如图 3(b)所示,疏导树的形式完全相同,但是在 $F-B$ 这段路径上的空闲波长数量为 9,而在 $F-I$

这段路径上的空闲波长数量为 14。可以看出,使用多粒度的波带比单粒度的波带可以有效地减少空闲波长的数量,提高波带利用率。

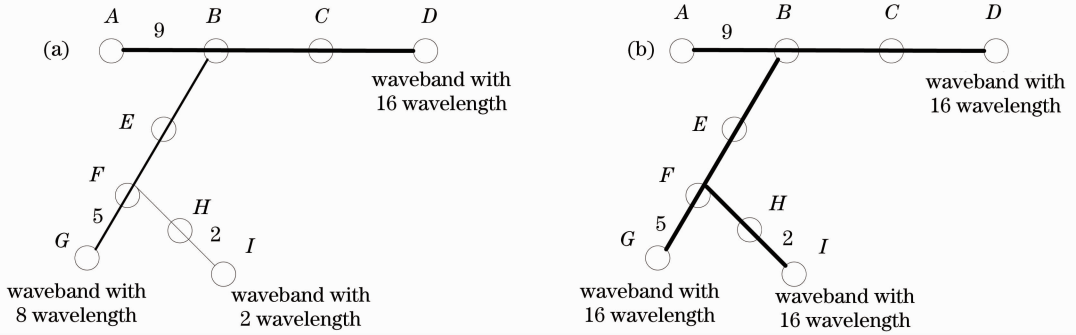


图 3 多粒度(a)和单粒度(b)波带疏导树

Fig. 3 Multi-granularity (a) and single-granularity (b) waveband grooming tree

4 算法仿真分析

使用 Opnet 仿真了 MWSW 算法的性能,仿真中使用的拓扑是 14 个节点的 NSFnet,网络的拓扑结构如图 4 所示。为了分析基于组播树的静态疏导算法的性能,还仿真了使用经典的最小代价优先(LCF)算法进行静态业务疏导,图 5 给出了使用两种算法在使用单一的波带粒度(波带粒度为 8)时,两种算法使用相同的业务矩阵时所需的波带数量。图中业务量分布范围表示节点间的业务量大小。例如当业务量分布范围的取值为 10 时,表示所有节点间的业务量是 0~10 之间均匀分布的随机整数个波长。可以看出 MWSW 算法使用的波带数量大体上要稍小于 LCF 算法的波带数量,这说明, MWSW 算法具有更高的波带利用率。所以当网络中承载相同的业务时, MWSW 算法使用的波带数量更少。图 6 给出了两种算法所用的波带复用器的数量比较,可以看出, MWSW 算法使用的波带复用器的数量稍高于 LCF 算法,这是因为, MWSW 算法把更

多的业务复用在一起,所以在获得高波带利用率的同时,肯定会消耗更多的波带复用器。MWSW 算法与 LCF 算法相比,最大的优势在于算法的复杂度低,从运行仿真程序的时间上看, MWSW 算法的运行时间是 LCF 算法运行时间的十分之一。

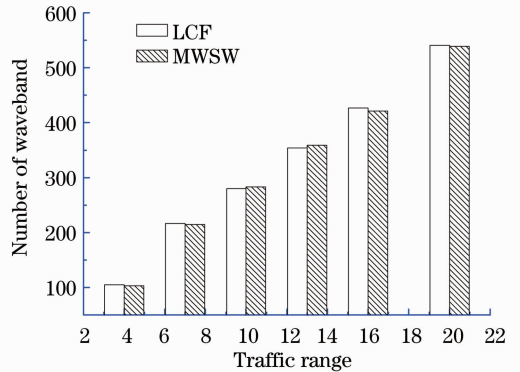


图 5 MWSW 算法与 LCF 算法使用波带数量比较

Fig. 5 Number of wavebands used by MWSW versus LCF

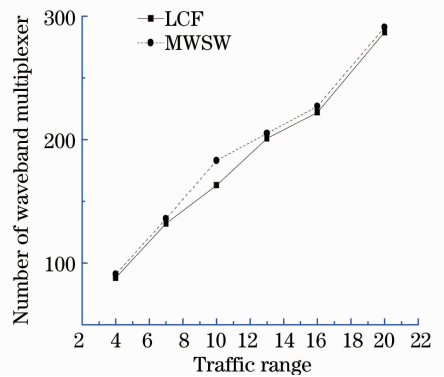


图 6 MWSW 与 LCF 算法使用波带复用器的比较

Fig. 6 Number of waveband multiplexers used by MWSW versus LCF

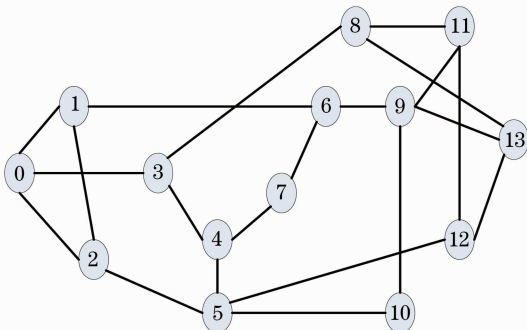


图 4 NSFnet 的拓扑结构

Fig. 4 Topology of NSFnet

图7给出了当使用固定粒度的波带时,基于组播树的静态波带疏导算法的性能。可以看出,波带的粒度越大时,需要的波带数量越少;波带的粒度小时,需要的波带数量多。原因非常简单,使用波带疏导后,当波带的粒度大时,一个波带中可以装载下多个业务,所以装载完网络中的所有业务,需要的波带数量少;而波带粒度小时,一个大业务可能需要分装到几个波带中,因而需要的波带数量多。另外,业务量分布范围越大时,需要的波带数量也越多。

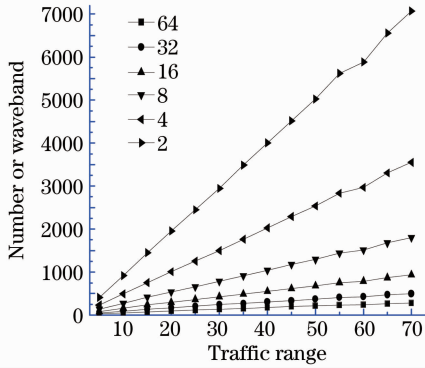


图7 不同粒度波带使用的波带数量比较
Fig. 7 Comparison of number of wavebands used when different waveband granularities are adopted

图8给出了使用固定粒度的波带时,不同粒度的波带对应的波带利用率。可以看出,波带的粒度越大,波带的利用率越低,64粒度的波带的利用率最低,2粒度的波带的利用率最高。这和前面的分析是一致的,对于大粒度的波带,想要保证其具有高的波带利用率是比较困难的。图9给出了使用不同波带粒度来承载业务矩阵中的业务时,所需的波长数量。可以看出,波带粒度越大,需要的波长数量越多。这是因为波带的粒度越大,波带利用得越不充分,因此承载相同的业务量,需要的波长总数越多。

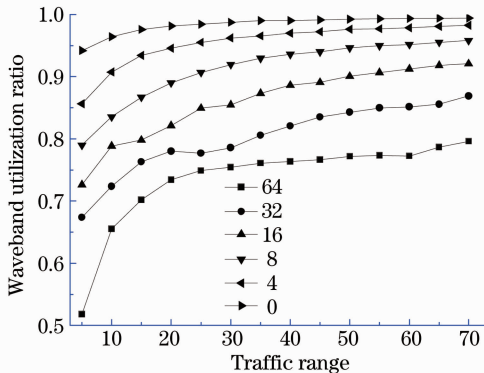


图8 不同粒度的波带的波带利用率比较
Fig. 8 Comparison of waveband utilization ratio when different waveband granularities are adopted

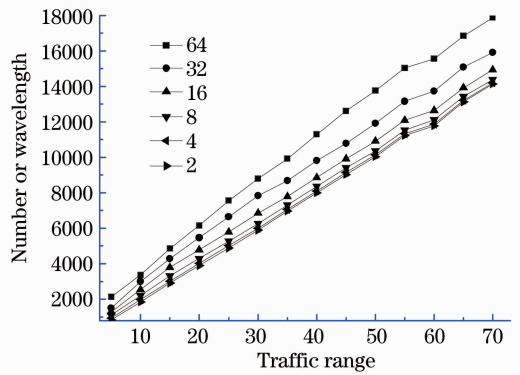


图9 使用不同粒度的波带消耗的波长数量比较
Fig. 9 Comparison of number of wavelengths used when different waveband granularities are adopted

图10给出了MWSW算法与采用单一粒度的波带算法所消耗的波带数量比较,由于仿真中使用的业务量分布范围小于70,因此MWSW算法中使用的最大波带粒度为64。从图中的仿真结果可以看出,MWSW算法所使用的波带数量,介于波带粒度取固定值时,32粒度波带的波带使用数量与64粒度波带的波带使用数量之间,几乎与64粒度波带使用的波带数量相当(图中二者的曲线很接近),因此MWSW算法使用的波带数量很少。而使用的波带数量少,带来的最大好处是可以有效地减少波带交换平面的端口数量,减少交换设备的成本及复杂度。图11给出了MWSW算法的波带利用率,从图中可以看出,MWSW算法中的波带利用率,在90%左右,基本和采用单一16粒度波带时的波带利用率相当,大大高于64粒度的波带利用率。因此MWSW算法采用多种波带粒度来承载业务,可以做到使用数量很少的波带,同时具有较高的波带利用率。相比与采用单一粒度的波带,具有很好的优势。

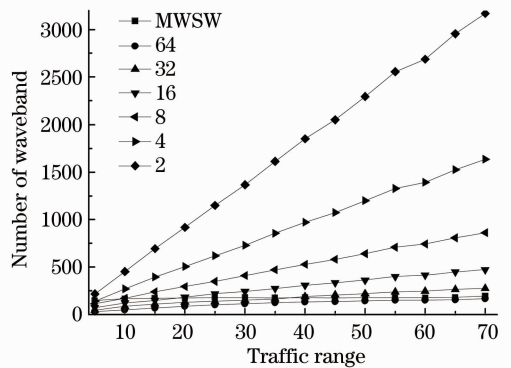


图10 MWSW算法与单一粒度波带策略消耗的波带数量
Fig. 10 Number of wavebands used by MWSW and single-granularity waveband scheme

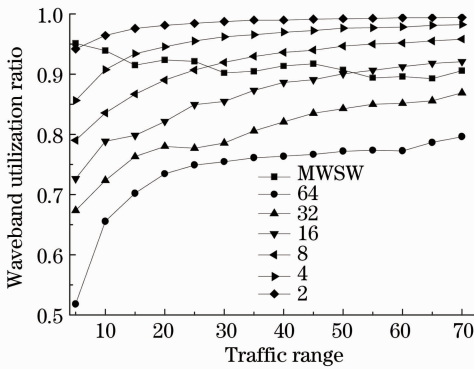


图 11 MWSW 算法与单一粒度波带策略的波带利用率比较

Fig. 11 Waveband utilization ratio of MWSW versus single-granularity waveband

5 算法复杂度分析

定理: MWSW 算法的计算复杂度小于 $O(N^5W)$, 其中 W 为一根光纤中包含的波长数量, N 为网络中节点的个数。

证明: 在光网络中, 采用波长一致性原则, 两个节点之间计算最短路由, 计算复杂度为 $O(N^2W)$ 。在 MWSW 算法中, 以业务矩阵中的某个目的节点 n 为根, 设需要构造 m 个疏导树。这是因为各个节点到达目的节点 n 的业务总量, 可能超过了最大粒度波带的容量, 需要多个波带才能容纳下, 所以需要构造多个疏导树才能容纳下这些业务。设疏导树 i 中的节点个数为 k_i , 则这 k_i 节点构造疏导树的计算复杂度为 $O(k_i^2N^2W)$ 。这是因为构造这样一棵疏导树, 要进行 k_i 次叠代, 每次叠代选择一个距疏导树的源节点距离最近的点加入疏导树。第 j 次叠代中, 要从剩余不在疏导树中的 $k_i - j + 1$ 个节点中选择一个加入疏导树, 计算复杂度为 $O[(k_i - j + 1)N^2W]$ (MWSW 算法中, 每次计算最短路由时, 都需要重新计算, 不能利用以前的计算结果。这是因为每当有节点加入疏导树后, 这些新节点可能会新建波带, 从而导致辅助图中新的逻辑路径的建立, 因此需要对辅助图进行更新, 下一次计算最短路由时, 辅助图的拓扑结构已经发生了变化, 需要重新计算)。因此这 k_i 个节点构造疏导树的计算复杂度为

$$O\left\{\sum_{j=1}^{k_i} [(k_i - j + 1)]N^2W\right\} = O(k_i^2N^2W). \quad (1)$$

设节点 n 作为根节点的疏导树为 T_1, T_2, \dots, T_m , 每个树中分别包含 k_1, k_2, \dots, k_m 个节点。 $\sum_{i=1}^m k_i = N - 1$ 。因此从节点 n 出发的业务全部建完疏导树, 计算

复杂度为

$$O\left(\sum_{i=1}^m k_i^2 N^2 W\right) < O\left[\left(\sum_{i=1}^m k_i\right)^2 N^2 W\right] = O[(N-1)^2 N^2 W] \leq O(N^4 W). \quad (2)$$

因此建立完以网络中所有 N 个点为根节点的疏导树, 计算复杂度小于 $O(N^5W)$ 。(2)式在数学上引入了较大的余量, 所以实际上 MWSW 算法的复杂度可能比 $O(N^5W)$ 小很多。

从文献[15]中不难得出, 在没有波长变化的情况下, LCF 算法的计算复杂度为 $O(N^6W)$, 因此 MWSW 算法的计算复杂度要低于 LCF 算法。

6 结 论

针对同目的地的疏导策略, 提出了一种新的波带疏导辅助图, 该辅助图有利于使用已建波带, 并能够统计出波带复用器的使用情况。提出了一种多粒度的波带粒度使用策略, 用多个波带粒度来承载业务。为了提高波带的利用率, 采用了波带平面分裂的方法, 使得业务可以选择使用适合的波带粒度来承载, 减小了波带中空闲波长的数量, 有利于波带利用率的提高。由于静态疏导算法与组播路由的相似性, 为了提高使用业务汇聚的效率, 采用了基于组播树的疏导算法。多粒度波带静态疏导算法获得了与使用单一最大粒度波带时相近似的波带数量, 同时波带利用率也比较高。这说明使用多波带粒度, 比使用单一的波带粒度具有更大的优势。

参 考 文 献

- Zhao Zisen. Past, present and future of optical fiber communications[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900109
赵梓森. 光纤通信的过去、现在和未来[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900109
- Hu Zongfu, Chen Yu. 48 optical millimeter wave generated by phase modulation with an active fiber ring resonator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(12): 3419~3424
胡宗福, 陈 昱. 采用腔内相位调制产生 48 个 40 GHz 光载毫米波[J]. *光学学报*, 2010, **30**(12): 3419~3424
- Xia Minmin, Dong Ze, Cao Zizheng *et al.*. Performance comparison of 40 GHz optical millimeter wave with OFDM signal generated by an optical phase modulator and an optical intensity modulator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(6): 1586~1591
夏敏敏, 董 泽, 曹子峥等. 光相位调制器和光强度调制器产生 40 GHz 光载 OFDM 毫米波信号的传输性能比较[J]. *光学学报*, 2010, **30**(6): 1586~1591
- XiaoJun Cao, V. Anand, Chunming Qiao. Waveband switching for dynamic traffic demands in multigranular optical networks[J]. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2007, **15**(4): 957~968
- Yang Fan, Xu Zhanqi, Qiu Zhiliang *et al.*. The same destination grouping based on traffic prediction for waveband switching[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2011, **10**(22): 1499~1506
杨 帆, 徐展琦, 邱智亮等. 基于业务预测的同目的汇聚波带疏

- 导算法[J]. 光电子·激光, 2011, **10**(22): 1499~1506
- 6 Mengke Li, Yao Wang, B. Ramamurthy. A novel cost-efficient on-line intermediate waveband-switching scheme in WDM mesh networks[C]. Proc. IEEE GLOBECOM 2005, St. Louis, USA, 2005, 4: 2019~2023
- 7 Mengke Li, Wang Yao, B. Ramamurthy. Same-destination-intermediate grouping versus end-to-end grouping for waveband switching in WDM mesh networks [C]. Proc. 2005 IEEE International Conference on Communications, Seoul, Korea, 2005, 3: 1807~1812
- 8 Yang Fan, Xu Zhanqi, Qiu Zhiliang *et al.*. A static traffic grooming algorithm based on multicast tree in optical networks [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2011, **22**(3): 372~376
杨帆, 徐展琦, 邱智亮等. 光网络中基于组播树的静态业务疏导算法[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(3): 372~376
- 9 Xingwei Wang, Chengcheng Tong, Min Huang. An intelligent static traffic grooming scheme in IP over DWDM Internet[C]. Proc. Fourth International Conference on Innovative Computing, Information and Control, Gaoxiong, Taiwan, 2009. 1131~1134
- 10 Lei Guo, Xingwei Wang, Weigang Hou *et al.*. A novel waveband switching routing algorithm based on integrated auxiliary graph in WDM optical networks [C]. The 11th IEEE International Conference on Communication Technology, Hangzhou, China, 2008. 383~386
- 11 Bensong Chen, G. N. Rouskas, R. Dutta. Clustering methods for hierarchical traffic grooming in large scale mesh WDM networks[J]. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. & Networking*, 2010, **2**(8): 502~514
- 12 J. D. Santi, A. C. Drummond, N. L. S. Fonseca *et al.*. Load balancing for holding-time-aware dynamic traffic grooming[C]. Proc. IEEE GLOBECOM 2010, Texas, USA, 2010. 1~5
- 13 Weigang Hou, Lei Guo, Xuetao Wei. Robust and integrated grooming for power and port-cost-efficient design in IP over WDM networks [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2011, **29**(20): 3035~3047
- 14 Keyao Zhu, Hui Zang, B. Mukherjee. A comprehensive study on next-generation optical grooming switches[J]. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 2003, **21**(7): 1173~1186
- 15 H. Y. Zhu, H. Zang, K. Y. Zhu *et al.*. A novel generic graph modal for traffic grooming in heterogeneous WDM mesh networks [J]. *IEEE/ACM Trans. Networking*, 2003, **11**(2): 285~299
- 16 Huaxiong Yao, Zongkai Yang, Liang Ou *et al.*. A transceiver saving auxiliary graph model for dynamic traffic grooming in WDM mesh networks[C]. Proc. IEEE 31st Conference on Local Computer Networks, Tampa, USA, 2006. 319~326
- 17 W. Yao, B. Ramamurthy. A link bundled auxiliary graph model for constrained dynamic traffic grooming in WDM mesh networks [J]. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 2005, **23**(8): 1542~1555
- 18 H. C. Le, H. Hasegawa, K. Sato. Hierarchical optical path network design algorithm considering waveband add/drop ratio constraint[J]. *IEEE/OSA J. Opt. Commun. & Networking*, 2010, **2**(10): 872~882
- 19 Yang Xiufeng, Peng Lei, Tong Zhengrong *et al.*. Design of tunable bandpass photonic microwave filter based on multi-wavelength fiber laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(2): 0206004
杨秀峰, 彭磊, 童峥嵘等. 基于多波长激光器的带通微波光子滤波器设计[J]. 光学学报, 2012, **32**(2): 0206004
- 20 P. Winter. Steiner problem in networks; a survey [J]. *Networks*, 1987, **17**(2): 129~167

栏目编辑: 王晓琰