面向多径业务传输的快速故障定位机制

熊 余[1,2] 张 鸿[1] 王汝言[1] 王钦波[1]
(重庆邮电大学光互联网及光信息处理研究所 重庆 400065)[1]
(重庆大学计算机学院 重庆 400030)[2]

摘 要 为解决WDM光网络中快速准确定位故障的难题,提出一种面向多径业务传输的快速故障定位机制,即建立多径业务传输模型来寻找多条链路分离光通路,在此基础上,各网络节点分布式独立计算故障链路向量,以快速限制定位区域。通过理论分析和仿真表明,所提机制对业务分布依赖性更低,能够迅速实现故障完全定位,并能提升故障定位速度。

关键词 全光网络,故障定位,多径传输
中图法分类号 TN915.04 **文献标识码** A

Fast Fault Location Mechanism Based on Multipath Traffic Transmission

XIONG Yu[1,2] ZHANG Hong[1] WANG Ru-yan[1] WANG Qin-bo[1]
(Institute of Optical Internet and Optical information processing, Chongqing University of Posts and Telecom., Chongqing 400065, China)[1]
(School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)[2]

Abstract In order to solve the problem of expeditious and accurate fault localization, a fast fault location mechanism based on multipath traffic transmission was proposed. Through establishing the multipath traffic transmission model, a number of link disjoint lightpaths are founded. Meanwhile, each node computes independently the affected link vector in a distributed manner to restrict a small failure localization area rapidly. Theoretical analysis and simulation results demonstrate that the proposed mechanism can faster achieve the completely fault location and greatly increase the location speed.

Keywords All-optical networks, Fault location, Multipath transmission

1 引言

随着波分复用(WDM)技术在全光网络中的应用,光纤承载的业务量急剧增大[1]。全光网络中的网元特别是链路出现故障后,将导致大量数据丢失,因此快速准确的链路故障定位机制成为光网络中的研究重点[2]。

现有的光网络故障定位机制主要是基于网络覆盖的思想。目前主要的基于网络覆盖的机制包括:监测圈(m-cycle)[3]、监测迹(m-trials)[4]和监测树(m-tree)[5]。该类机制虽然能实现快速有效的光网络链路故障定位,但是需要占用大量的额外资源(监测器、监测波长),增加了定位的成本。

为此,文献[6]提出了一种分布式的有限周边矢量匹配(Limited perimeter Vector Matching, LVM)协议。LVM协议将故障限制到一个小的区域内,通过交换小区域内节点间的链路信息来定位链路故障。因此LVM协议无需额外的监测设备和监测波长。该协议相比基于网络覆盖的故障定位机制能节省大量的定位成本。但其仍然存在以下缺点:

(1)对业务依赖大。必须至少要两个光通道经过一条链路才能准确定位故障,且这两个光通道必须要有不同的源节点和目的节点,这使得LVM协议在稀疏业务情况下的故障定位度较低。

(2)定位时间长。LVM协议需要节点之间多次交换故障信息,导致该协议故障定位时间较长。

因此,利用优化业务分布来提升LVM协议性能是该类机制研究的重点。文献[7]使用整数线性规划来优化业务模型,该模型在较高负载时得到了较好的性能,但是仍存在故障定位时间较长,且在中低负载时故障定位度较低。

为此,以快速准确故障定位为目标,本文提出了一种面向多径业务传输模型的快速有限周边矢量匹配机制(Fast-Limited perimeter Vector Matching, F-LVM)。该机制在高负载时可得到良好的性能,同时在中低负载时也能得到较低的故障定位时间和较高的故障定位度。

2 多径业务传输模型

多径传输就是将一个业务请求的信息利用多个光通道传输到目的节点。多径业务传输模型可以迅速增加业务覆盖的

到稿日期:2012-02-18 返修日期:2012-07-21 本文受国家自然科学基金项目(60972096,61001105),重庆市自然科学基金重点项目(2011BA2041),重庆市教委科学技术研究项目(KJ110531)资助。

熊 余(1982-),男,博士生,讲师,主要研究方向为宽带网络可靠性理论及抗毁技术;张 鸿(1987-),男,硕士生,主要研究方向为光通信与网络;王汝言(1969-),男,博士,教授,主要研究方向为全光网络理论与技术、下一代光网络故障管理机制、多媒体信息处理等;王钦波(1982-),男,硕士生,主要研究方向为光通信与网络。

链路，使链路在故障后被准确定位的条件迅速得到满足，即必须要至少有两个不同源目的节点的光通道经过该链路才能准确地定位出该链路故障。多径业务传输模型的示意图如图 1 所示。

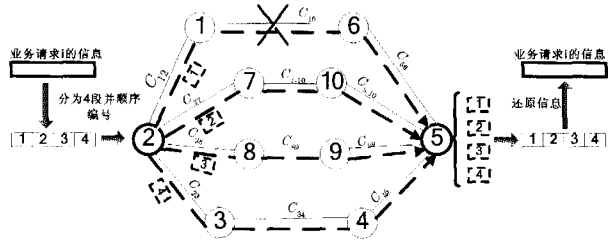

图 1　多径传输示意图

假设有业务请求 i 从节点 2 到节点 5。通过链路权值函数调整链路权值后，查找到源节点到目的节点的 4 条最短路径。在源节点处将信息分为 4 段，并顺序编号。随后将信息分别通过查找到的 4 条最短路径发送到目的节点。在目的节点处将接收到的信息按编号排序，并还原原始信息。

如果链路 1-6 发生故障，光通路 2-1-6-5 中断，信息亦可通过其他 3 条路径传输，不会导致业务中断；同时节点 5 也能探知光通路 2-7-10-5、2-8-9-5、2-3-4-5 经过的链路都正常，而光通路 2-1-6-5 经过的链路发生故障。相比单径，此模型目的节点能探知到更多的链路信息，因此使用多径业务传输模型，可以更快速地定位故障链路，也使各条链路在发生故障后在负载更低的情况下就可以被定位，提升了故障定位度。

2.1　链路权值函数

本文的多径业务传输模型使用链路权值函数动态地调节链路权值，链路权值反映链路的资源使用情况和链路长度。

链路权值函数中变量声明如下：

W：每条链路上的最大波长数；

λ_{ij}^{F}：链路 i-j 中空闲的波长数；

λ_{ij}^{O}：链路 i-j 中被占用的波长数；

α：用来调节链路长短和资源消耗占链路权值函数中的比重；

O_{ij}^{SD}：具有相同源节点 S 和目的节点 D，且经过链路 i-j 的波长数；

C_{ij}：链路 i-j 的权值；

D：代表链路的长度；

β：$\beta=0.4$，调节链路权值，使算法优先选取被占用一个波长的链路。

使用以下权值函数动态调整链路的权值。

$$C_{ij}=\begin{cases}\left[\alpha D+(1-\alpha)*\dfrac{\lambda_{ij}^{F}}{W}\right]*\beta & \\ \quad(\lambda_{ij}^{O}=1)\vee[(O_{ij}^{SD}=n)\wedge(\lambda_{ij}^{O}=n)], & n<W \\ \left[\alpha D+(1-\alpha)*\dfrac{\lambda_{ij}^{F}}{W}\right]*(1-\beta), & \lambda_{ij}^{O}=0 \\ \alpha D+(1-\alpha)*\dfrac{\lambda_{ij}^{F}}{W}, & \text{otherwise} \\ \infty, & \lambda_{ij}^{O}=W\end{cases}\tag{1}$$

如式(1)所示，算法将优先选取链路中被占用的波长数为 1 或者链路中被占用的波长都是同一源节点和目的节点间的工作波长的链路，如权值函数中的第一种情况。其次是链路中被占用的波长数为 0 的链路，如权值函数中的第二种情况。最后选取的是链路中被占用的波长数大于 1 的链路，如权值函数中的第三种情况。如果链路中被占用的波长数达到链路的最大波长数，该链路权值将会被设为无穷大。

2.2　业务传输模型建立

模型的建立旨在多次运行 Dijkstra 最短路径算法来为各个业务请求查找可用的多条链路分离的光通路。

当业务请求到达时，利用 C_{ij} 函数调整链路权值后第一次运行 Dijkstra 最短路径算法。如果无法找到最短路径，则该业务阻塞；如果找到一条最短路径，则在网络中删除该最短路径经过的链路，继续运行 Dijkstra 最短路径算法，重复删除最短路径经过的链路以及运行 Dijkstra 算法，直到无法找到最短路径为止。假设找到 n 条最短路径，则将业务请求发送的信息分为 n 份，并以顺序编号发送到目的节点，且在目的节点重新组合原始信息。

多径传输模型建立的主要伪代码如图 2 所示。

```
1. connection requests i arrives do
2. use C_ij update weight of links
3. Flag←0,n← 0
4. run Dijkstra algorithm
5. while there is a shortest path
6.    Flag←1,n←n+1
7.    delete links of shortest path in the topology
8.    run Dijkstra algorithm
9. end while
10. If Flag=1
11.    record these n paths and establish the n paths
12.    the information is divide into n slice
13. send the n slice information to n paths
14. Else Flag=0
15.    connection requests i blocked
16. End if
17. Wait for next connection request
```

图 2　业务模型伪代码

3　F-LVM 故障定位机制

3.1　机制描述

骨干传输网中，节点的信息处理时间(ns-us)远小于信息传播时间(ms)[7]。因此，使节点独立计算所需信息，减少信息传播时间，可以大幅减少故障定位时间。为此，在建立了多径业务传输模型的基础上，提出一种新的快速 LVM 故障定位机制(F-LVM)。其描述如下。

Step1　当网络故障时，每条光通道的目的节点将发送 ALARM 信息，其包括该节点的节点 ID、中断的最短业务经过的路径以及该路径的长度。其中，发送 ALARM 信息的节点叫做备选中控节点(Potential Executive Sink，PES)。ALARM 信息如表 1 所列。

表 1　ALARM 信息

Node ID	Link			Length
10	a-b	b-c	c-d	3

Step2　当每一个 PES 节点接收到其他 PES 节点发送的 ALARM 信息后，将比较每个 ALARM 信息中的 Length 字段，Length 字段值最小的 ALARM 信息将被提取出来，该信息中的 Node ID 将被设为中控节点(Executive Sink，ES)，该信息中的 Link 字段将用来生成一个链路的向量 ALV_{ES}(Af-

fected Link Vector, ALV)。同时每一个 PES 节点将根据 ALV_{ES} 定义一个限制性区域(Limited-Perimeter, LP),该区域包括 ALV_{ES} 上的节点以及与 ALV_{ES} 上的节点相邻接的节点。F-LVM 将故障链路缩小到 ALV_{ES} 上的链路上,并通过限制性区域内的节点收集链路信息来判断故障链路。ALV_{ES} 如表 2 所列。

表 2 ALV_{ES} 结构表

ALV_{ES}	a-b	b-c	c-d

Step3 当计算出 ES 节点和 ALV_{ES} 后,每一个 PES 节点将生成 ALV_{PESi} (i 为节点 ID),它包括所有以该 PES 节点为目的节点的业务的光通路以及该通路的状态,如表 3 所列。

表 3 ALV_{PESi} 结构表

Link				Status
a-b	b-c	c-f	Null	0
a-c	c-d	d-e	e-f	1
a-b	b-f	Null	Null	0

Step4 每一个 PES 节点将 ALV_{ES} 与 ALV_{PESi} 匹配,并生成一个二进制向量 BV_{PESi} (Binary Vector, BV)。如果该 PES 节点与 ALV_{ES} 中的路径经过的节点邻接,则该 PES 节点在 LP 区域内,该 PES 节点将 BV_{PESi} 发动到 ES 节点。否则,PES 节点将等待 ES 节点发送索取 BV 的信息。

在匹配的过程中,ALV_{ES} 分别与 ALV_{PESi} 中的每一行进行匹配,并生成一个临时的二进制向量(Temporary Binary Vector, TBV),最后 PES 节点将所有的 TBV 进行与操作,得出 BV_{PESi}。其过程如表 4 所列。

表 4 BV_{PESi} 生成表

ALV_{ES}	a-b	b-c	c-d
	1	1	0
TBV	1	0	1
	1	0	0
BV_{PESi}	1	0	0

匹配规则如下:

(1)对于状态为 0 的 ALV_{PESi},如果 ALV_{ES} 与 ALV_{PESi} 有相同的链路,则将 BV_{PESi} 中对应的二进制值置 1,反之为 0。

(2)对于状态为 1 的 ALV_{PESi},如果 ALV_{ES} 和 ALV_{PES} 有相同的链路,则将其对应的二进制值置 0,反之为 1。

Step5 ES 节点收集来自各个 PES 节点发送的 BV_{PESi} 信息,并进行逻辑与操作。如果值为 1 的链路不唯一,则扩展 LP 区域,ES 节点向新加入的节点发送索取 BV 信息,进行新一轮的与操作;如果在 BV_{ES} 中值为 1 的链路唯一,则故障定位结束。

F-LVM 中每一个 PES 节点都独立计算出 ES 节点以及 ALV_{ES}。相比经典的 LVM, F-LVM 减少了 ES 节点将 ALV_{ES} 广播给所有 PES 节点的时间,减少了信息传播的次数;同时在 F-LVM 中 BV_{PESi} 含有全部以该 PES 节点为目的节点的光通道的信息,相比只包含一条最短光通路信息的经典 LVM, F-LVM 具有更多用于判断链路是否故障的信息,这在一定程度上也可以减少故障定位的时间。

3.2 时间分析

F-LVM 定位过程主要分为以下几个时间段。

PES 节点广播 ALARM 信息,此时 PES 节点将等待一个固定的时间,以保证所有 PES 节点都收到来自其他 PES 节点的 ALARM 信息。

$$T_1 = E[d_{sd}]\alpha \tag{2}$$

式中,$E[d_{sd}]$为网络的平均跳数,a 为任意两个节点间的平均传播延时。

每一个 PES 节点同时计算 ES 节点,生成 ALV_{ES} 和 ALV_{PESi}。然后将 ALV_{ES} 与 ALV_{PESi} 进行匹配,并进行与操作生成 BV_{PESi}。

$$T_2 = \beta + E[d_{sd}]^2\beta + \beta = (2 + E[d_{sd}]^2)\beta \tag{3}$$

式中,β 为节点的计算周期。

PES 节点计算 ES 节点和进行与操作的时间为节点的计算周期 β。在 ALV_{ES} 与 ALV_{PESi} 匹配的过程中,其计算复杂度为 $O(E[d_{sd1}] \cdot E[d_{sd2}])$,它的最大值为 $O(E[d_{sd}]^2)$,因此匹配的时间为 $E[d_{sd}]^2\beta$。

处于 LP 区域内的节点发送 BV_{PESi} 到 ES 节点。

$$T_3 = E[LP_{sd}]\alpha \tag{4}$$

式中,$E[LP_{sd}]$为 LP 区域内的平均跳数,并且 $E[LP_{sd}] \leqslant E[d_{sd}]$。

ES 节点将接收到的各个 PES 节点发送来的 BV_{PESi} 进行逻辑与操作。此时 ES 节点需要一个计算周期 β 的时间。

$$T_4 = \beta \tag{5}$$

因此总的定位时间为:

$$T_{F\text{-}LVM}^{total} = \sum_{i=1}^{4} T_i = (E[d_{sd}] + E[LP_{sd}])\alpha + (3 + E[d_{sd}]^2)\beta \tag{6}$$

由于 α 为毫秒级(ms),β 为纳秒级至微秒级(ns-us),即 $\beta \ll \alpha$,因此可以得出下式:

$$T_{F\text{-}LVM}^{total} \approx (E[d_{sd}] + E[LP_{sd}])\alpha \tag{7}$$

对于经典 LVM,总的故障定位时间为[8]:

$$T_{LVM}^{total} = (2E[d_{sd}] + E[LP_{sd}])\alpha + (2 + E[d_{sd}]^2)\beta \approx (2E[d_{sd}] + E[LP_{sd}])\alpha \tag{8}$$

由式(7)、式(8)所示,可以得出:

$$T_{F\text{-}LVM}^{total} < T_{LVM}^{total} \tag{9}$$

如式(9)所示,F-LVM 相比于 LVM 减少了故障定位时间。这是因为 F-LVM 机制在 ALARM 信息中加入了用于生成 ALV_{ES} 的 Link 字段,而不用 ES 节点再次向其他节点广播 ALV_{ES},每个节点可以独立计算 ES 节点以及 ALV_{ES},节省了 ES 节点向其他节点广播 ALV_{ES} 信息的时间,达到了减小故障定位时间的目的。

4 仿真与性能分析

本文在图 3 所示的 COST239 网络上进行仿真。仿真中业务请求的到达服从参数为 λ 的泊松分布。业务的源节点和目的节点服从均匀分布。业务的持续时间服从参数为 $1/\mu$ 的指数分布。如果业务请求被阻塞,则立即丢弃该业务,即不存在排队机制。

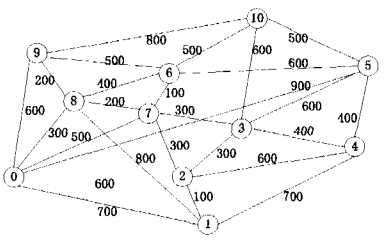

图 3 COST239 网络

业务量为1000个业务，网络的负载定义为 $\rho=\lambda/\mu$，其单位为爱尔兰(erlang)，ρ 值越大，代表负载越高。仿真对比以下情况：

(1)Singlepath+LVM：使用单径业务传输模型，工作光通路使用 Dijkstra 最短路径算法寻路，链路的权值为链路的长度。故障定位机制为经典的 LVM。

(2)Multipath+LVM：使用多径业务传输模型，故障定位机制为经典的 LVM。

(3)Singlepath+F-LVM：使用单径业务传输模型，工作光通路使用 Dijkstra 最短路径算法寻路，链路的权值为链路的长度。故障定位机制使用 F-LVM。

(4)Multipath+F-LVM：使用多径业务传输模型，故障定位机制使用 F-LVM。

故障定位度(FLR，Fault Location Rate)是指网络中发生链路故障时可以被定位的链路和总故障链路的比值，是故障定位研究中最重要的性能指标。其仿真结果如图4所示。从图4可以看到，使用相同的业务传输模型后的故障定位度是一致的，这是因为 LVM 与 F-LVM 的故障定位度依赖于业务分布，而业务分布主要由业务传输模型决定。使用多径业务传输模型使网络中的链路快速地达到该链路故障可以被定位的条件。图4显示出，当使用单径业务传输模型的故障定位度仅为25%时，多径业务传输模型的故障定位度就能达到100%，并且单径业务传输模型故障定位度较低。

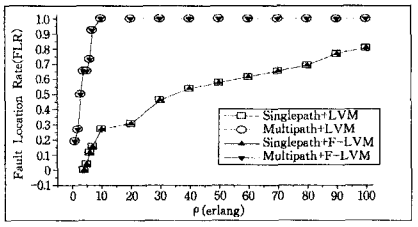

图4 故障定位度仿真图

故障定位时间(FLT，Fault Location Time)是指网络发生链路故障到定位出故障所经历的时间。其仿真结果如图5所示。结合多径业务传输模型后，故障定位时间有较少提升。这是因为使用多径业务传输模型后，每个 PES 节点能够通过多路径得到更多的链路信息提供给 ES 节点，ES 节点能在较短的时间内得到大量的链路信息，因此故障定位时间有少部分提升。当网络中负载比较高时，多径业务传输模型的优势将会减弱。而 F-LVM 比 LVM 的故障定位时间有较大的提升，这是因为 F-LVM 机制减少了广播信息的次数，而且 PES 节点收集的链路信息增多，所以 ES 节点能在更短的时间内判断出故障链路。从图5可以看出，F-LVM 的故障定位时间减少了40%左右。

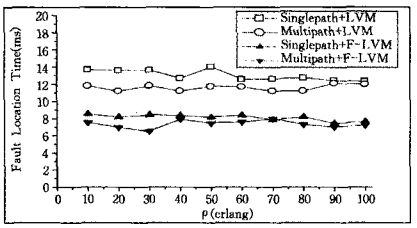

图5 故障定位时间仿真图

阻塞率(BR，Blocking Rate)是指阻塞的业务数与总业务数的比值，仿真结果如图6所示。由于阻塞率受业务分布的影响，使用相同的业务传输模型承载业务后，业务分布是一样的。使用多径业务传输模型后必然会导致阻塞率的升高，这是因为对于同一业务，多径业务传输模型将使用更多的资源来完成该业务的传输，所以只有较少的资源提供给其他业务使用，导致阻塞率升高。

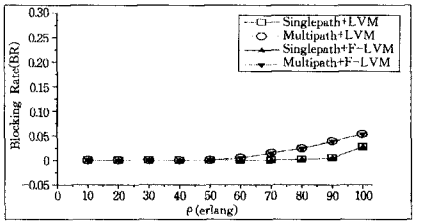

图6 阻塞率仿真图

结束语 利用多径业务传输模型的特点，弥补 LVM 的缺陷，能极大地提高故障定位度。同时针对节点信息处理时间远小于信息的传播时间的特点，减少传播时延，大幅减少了故障定位时间。仿真表明，面向多径业务传输模型的 F-LVM 机制的故障定位度有较大提升，并且能大幅度地降低故障定位时间。针对在高负载时使用多径导致阻塞率升高的缺陷，可以设置一个阈值，当负载达到这个阈值之后，新业务将不使用多径业务传输模型，同时保留未离开的业务的多径状态。后续的工作重点可以将 F-LVM 机制运用于多链路故障的故障定位。

参 考 文 献

[1] 任海兰，罗志会，刘德明. 基于 GMPLS 的光突发交换网络的仿真研究[J]. 计算机科学，2011，38(2)：114-118

[2] Mao Min-jing，Yeung K L. Super Monitor Design for Fast Link Failure Localization in All-Optical Networks[C]// 2011 IEEE International Conference on Communications (ICC). Kyoto：IEEE，2011：1-5

[3] Zeng Hong-qing，Huang Chang-cheng，Alex V. A novel fault detection and localization scheme for mesh all-optical networks based on monitoring-cycles[J]. Photonic Network Communications，2006，11(3)：277-286

[4] Wu B，Ho P H，Yeung K L. Monitoring trail：on fast link failure localization in all-optical WDM mesh networks[J]. Journal of Lightwave Technology，2009，27(18)：4175-4185

[5] Doumith E A，Zahr S A，Gagnaire M. Monitoring-tree：An innovative technique for failure localization in WDM translucent networks [C] // IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). Miami，USA：IEEE，2010：1-6

[6] Sichani A V，Mouftah H T. Limited-perimeter vector matching fault-localisation protocol for transparent all-optical communication networks[J]. Communications，IET，2007，1(3)：472-478

[7] Khair M，Kantarci B，Zheng J. Optimization for Fault Localization in All-Optical Networks[J]. Journal of Lightwave Technology，2009，27(21)：4832-4840

[8] Khair M，Kantarci B，Mouftah H T. Connection provisioning constrained to fault localization in all-optical networks[C]// 23rd International Symposium on Computer and Information Sciences(ISCIS). Istanbul：IEEE，2008：1-6