

基于光通路状态感知的分簇式故障定位机制

熊余^{①②} 张鸿^{*①} 王汝言^① 吴大鹏^①

^①(重庆邮电大学光纤通信技术重点实验室 重庆 400065)

^②(重庆大学计算机学院 重庆 400030)

摘要: 针对现有故障定位机制定位时间长和对业务分布依赖高等问题, 该文提出基于光通路状态感知的分簇式故障定位机制。该机制根据网络分簇约束条件, 以最小支配集理论为基础, 建立两级网络模型。并且根据算法特点, 定义了适用于该算法的“矩阵与”运算。故障后簇头节点以及汇聚节点通过对各节点发送的矩阵进行“矩阵与”运算实现快速准确的故障定位。仿真表明, 该机制以较低的复杂度和资源开销, 有效地降低了对业务分布的依赖, 极大地提升了故障定位率, 减少了故障定位时间。

关键词: 光网络; 故障定位; 分簇; 最小支配集

中图分类号: TN915.07

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2014)01-0041-07

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00214

Fault Location Mechanism Based on Lightpath Status Aware Using Cluster Allocation

Xiong Yu^{①②} Zhang Hong^① Wang Ru-yan^① Wu Da-peng^①

^①(Key Laboratory of Optical Fiber Communication, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

^②(School of Computer Science, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: A fault location mechanism is proposed based on lightpath status aware using cluster allocation to solve the issues of long fault location time and high service dependence. According to the constraints of network clustering, two-layer network model is established through the minimum dominating set theory. In addition, a new operation called “matrix and” is defined in the proposed mechanism. When a link failure occurs, the cluster head and sink node will achieve fast and accurate fault location via the operation of “matrix and”. The simulation shows that the fault location rate and fault location time are significantly improved with lower complexity and resource cost.

Key words: Optical network; Fault location; Cluster; Minimum dominating set

1 引言

波分复用(Wavelength Division Multiplexing, WDM)技术的发展使得光网络的带宽得到了极大提升。但这也使网络发生故障时将导致大量的业务中断。因此, 网络的抗毁设计至关重要, 而快速准确地找出故障发生的位置是构建高抗毁光网络的前提^[1,2]。

为此, 文献[3-5]中提出了监测圈(monitored-cycle, m-cycle)故障定位机制。它利用圈形的监测通路覆盖全网链路并构造告警代码表。故障后通过查

告警代码表来实现故障定位。虽然监测圈能快速地找出故障, 但其不能达到 100% 的故障定位率。为此文献 [6-8] 提出监测迹 (monitoring-trails, m-trails), 其和监测圈不同的是, 它可以任意形状的监测通路。为进一步减少开销, 文献[9]又提出监测树(monitored-tree, m-tree)故障定位机制, 同时文献[10,11]提出了监测树的启发式算法, 有效降低了算法的复杂度。但是监测树机制要求节点具有多播能力, 存在一定局限性。上述机制虽然故障定位性能都较好, 但每条监测通路都要配置监测器, 占用了较多的波长资源, 定位的成本较高。

为实现低开销的故障定位, 文献[12]利用贝叶斯网络定位通信网故障, 然而其不能达到较高的故障定位率且计算复杂度较高。文献[13]提出一种分布式的有限周边矢量匹配(Limited perimeter Vector

2013-02-20 收到, 2013-07-02 改回

国家自然科学基金(60972069, 61001105), 重庆市自然科学基金(2011BA2041), 重庆市教委科学技术研究项目(KJ110531)和重庆市高校优秀人才支持计划(2011-29)资助课题

*通信作者: 张鸿 zhanghong1987824@qq.com

Matching, LVM)协议。该协议通过节点感知的信息,将故障限制在一个小区域(Limited-Perimeter, LP)内,然后通过所限区域内的节点交换通路的状态信息,并巧妙地利用节点间信息的关联性实现准确的故障定位。LVM无需在网络中配置监测器及监测波长,节省了大量成本,显然业务分布的情况对该协议的性能有重要影响。为此,文献[14,15]以最大化故障定位率和最小化故障定位时间为目标建立整数线性规划(Integer Linear Programming, ILP)模型来优化业务分布,同时提出了启发式算法,减少了计算复杂度。虽然LVM解决了故障定位成本高的问题,但其存在对业务分布依赖大的缺陷。必须至少要有两条光通路经过同一条链路,且这两条通路必须要有不同的源宿节点才能实现故障的准确定位。同时LVM包括广播、竞争、多播、匹配、故障定位等多个环节,节点之间需要多次交换信息,因此其故障定位时间也较长。

为进一步降低对业务分布的依赖性及减少故障定位时间,本文提出了一种基于光通路状态感知的分簇式(lightpath Status Aware using Cluster Allocation, SACA)故障定位机制。该机制分为基于最小支配集的网络分簇算法(Cluster Allocation Algorithm, CAA)和基于光通路状态感知的分布式故障定位算法(Fault Location Algorithm, FLA)。CAA引入最小支配集理论对网络进行最优化分簇,建立两层的网络结构。第1层结构包括簇头(Cluster Head, CH)节点和簇内成员(Cluster Member, CM)节点,第2层结构包括CH节点和汇聚节点(Sink Node, SN)。FLA通过在各个簇内感知光通路的通断状态构建矩阵,并通过“矩阵与”运算实现分布式故障定位。

2 基于最小支配集的网络分簇算法(CAA)

分簇方法已经被广泛运用于无线传感器网络中^[16,17],在光网络的故障恢复及业务量疏导中也有相应研究^[18,19]。本文在光网络故障定位研究中引入分簇,利用多个CH节点实现分布式的快速故障定位。既消除了只有一个节点才能定位故障的约束,同时也缩小了节点发送信息的区域,极大降低了故障定位的时间。

2.1 分簇约束条件

在故障定位过程中,各个CH节点收集本簇CM节点感知的故障信息后,通过计算各个节点间信息的关联性完成分布式的故障定位。如果各个CH节点无法独立完成故障定位,将由SN节点统一进行故障定位。为了快速定位故障,要求CH节点和SN

节点能快速收集信息;同时由于SN节点定位需要较长时间,应尽量使故障能够在CH节点被定位。可见,对网络分簇时应遵循以下约束。

$$\min D(v_{CM}, v_{CH_i}), \forall v_{CM}, v_{CH_i} \in B_i \quad (1)$$

$$\min D(v_{CH_i}, v_{SN}), \forall v_{CH_i} \in H \quad (2)$$

$$\min \text{NUM}_{CH} \quad (3)$$

$$\max \text{NUM}_{\text{link}}^{\text{in}} \quad (4)$$

其中 $D(v_{CM}, v_{CH_i})$ 和 $D(v_{CH_i}, v_{SN})$ 表示相应节点间的最短距离。 NUM_{CH} 和 $\text{NUM}_{\text{link}}^{\text{in}}$ 分别表示簇头节点和簇内链路的数量。 H 表示CH节点的集合。 B_i 代表簇*i*的节点集合。式(1)表示最小化每个簇中CM节点到CH节点的最大距离。式(2)表示最小化各个CH节点到SN节点间的最大距离。在式(1)和式(2)的约束下,CH节点和SN节点可以更快速地收集到光通路状态信息。式(3)表示最小化簇头数。式(4)表示最大化簇内链路数。在式(3)和式(4)的约束下,故障尽可能在CH节点就能定位,也就是说让更多的链路成为簇内链路,因为簇内链路可以被CH节点快速定位。

2.2 算法步骤

根据上述思想,CAA算法步骤如下所述。设网络 $G=(E, V)$,其中 E 为网络的链路集, V 代表网络中的节点集。CAA使用离线计算,即该算法运行在故障发生前。

步骤1 求最小支配集。求取网络 G 的最小支配集的集合 $P=\{\psi_1^{\min}, \psi_2^{\min}, \dots, \psi_i^{\min}, \dots\}$,其中 ψ_i^{\min} 表示一个最小支配集的节点集合。如果 P 中的元素唯一,则该唯一的最小支配集为最优最小支配集,并转到步骤3;如果 P 中的元素不唯一,则转到步骤2。

步骤2 求最优的最小支配集。设每一个最小支配集中有 K 个节点。最小支配集 ψ_i^{\min} 的直径定义为在最小支配集中任意两个节点间的最大距离,用 Dia_{ψ}^i 表示。 Dia_{ψ}^i 可通过式(5)计算。

$$\text{Dia}_{\psi}^i = \max_{v_k \in \psi_i^{\min}, k \neq j} D(v_j, v_k), \forall v_j \in \psi_i^{\min} \quad (5)$$

其中 $D(v_j, v_k)$ 表示 v_j 和 v_k 间的最短距离。式(5)使CH节点间的最大延迟最小化。则直径 Dia_{ψ}^i 最小的最小支配集就是最优的最小支配集。

步骤3 网络分簇。将最优支配集中的节点设为CH节点,并在网络中遍历所有节点。如果节点与某个CH节点邻接,则将该节点加入该CH节点所在簇;如果节点与多个CH节点邻接,则将该节点同时加入多个CH节点所在簇。如果有两个CH节点邻接,则将两个CH节点分别加入与其邻接的

CH 节点所在簇,这时这两个 CH 节点同时有两个身份:一个是本簇的 CH 节点和其它簇的成员节点。

步骤 4 选取 SN 节点。设网络 $G = \{B_1, B_2, \dots, B_K\}$ 被分为 K 个簇,其中 B_i 为簇 i 的节点集合(包括 CH 节点和 CM 节点),簇 B_i 的 CH 节点为 v_{CH_i} 。而 CH 节点集合为 $H = \{v_{CH_1}, v_{CH_2}, \dots, v_{CH_K}\}$ 。MAXdist_{CH} 表示一个簇头节点到其它任意一个簇头节点的最大距离,SN 节点定义为 MAXdist_{CH} 最小的 CH 节点。CH 节点 v_{CH_i} 的 MAXdist_{CH} 可通过式(6)计算。

$$\text{MAXdist}_{CH} = \max D(v_{CH_i}, v_{CH_k}),$$

$$v_{CH_i} \neq v_{CH_k}, \forall v_{CH_k} \in H \quad (6)$$

依次对每个 CH 节点通过式(6)计算,其中 MAXdist_{CH} 最小的簇头节点为 SN 节点。利用该 SN 节点,可以用最短的时间从各个 CH 节点收集信息。到此网络分簇完成。如图 1 所示是分簇的实例,灰色节点为 CH 节点或者 SN 节点。分簇后形成了由 CH 节点和 CM 节点组成的第 1 层网络以及由 CH 节点和 SN 节点形成的第 2 层网络。

3 基于光通路状态感知的分布式故障定位算法(FLA)

3.1 “矩阵与”运算

根据本算法特点,提出一种新的适用于本算法的运算式“矩阵与”。

定义 1 设有 i 行 j 列的矩阵 M 和 N ,且 M 与 N 中元素取值只能为 -1, 0 和 1。定义“矩阵与”运算,用符号“&”表示。则矩阵 M 与 N 的“矩阵与”运算可表示为 $Q = M \& N$,其运算规则如式(7)所示。其中 $Q_{i,j}$, $M_{i,j}$ 和 $N_{i,j}$ 分别表示矩阵 Q , M 和 N 中第 i 行第 j 列的元素。

$$Q_{i,j} = \begin{cases} 0, & M_{i,j} = 0 \text{ 或 } N_{i,j} = 0 \\ 1, & (M_{i,j} = 1, N_{i,j} \neq 0) \text{ 或 } (M_{i,j} \neq 0, N_{i,j} = 1) \\ -1, & M_{i,j} = -1, N_{i,j} = -1 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 算法步骤

当网络发生故障后,各个 CH 节点同时进行分布式的故障定位,如果 CH 节点没有定位出故障,则各个 CH 节点将信息发送给 SN 节点,由 SN 节点进行统一的故障定位。FLA 算法的具体步骤如下:

步骤 1 构造链路信息表(Link Information Table, LIT)。为实现端到端的光通路状态感知,节点需要保存经过本节点的所有业务光通路信息。当链路发生故障后,各个节点利用保存的业务光通路信息和业务光通路的实时状态构造 LIT,其中包括 CH 节点构造的 LIT_{CH} 和 CM 节点构造的 LIT_{CM}。LIT 中有多条链路信息(Link Information, LI),每条 LI 包含了一条通过该节点的光通路信息,则一个 LIT 包含了所有通过该节点的光通路信息。针对不同光通路,LI 分以下两种情况。

(1)当节点为光通路的目的节点时,LI 中包括光通路经过的链路以及光通路的状态。

(2)当节点为光通路的中间节点时,LI 中包括光通路从源节点到本节点所经过的链路以及从源节点到本节点这部分光通路的状态。

当光通路状态位为 1 时,表示光通路断开;当光通路状态位为 0 时,表示光通路正常。下面给出一个构造 LIT 的实例。图 2 中链路 6-7 发生故障后。节点 6 产生的 LIT 如表 1 所示,其中 NULL 为填充字段。此时有两个光通路经过节点 6,因此 LIT 中包括两个 LI。

节点 6 为光通路 1-4-5-6 的目的节点,该光通路正常工作,状态位置 0。由于节点 6 为光通路 1-3-6-7 的中间节点,虽然对节点 7 来说该光通路

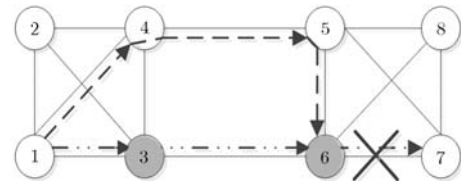
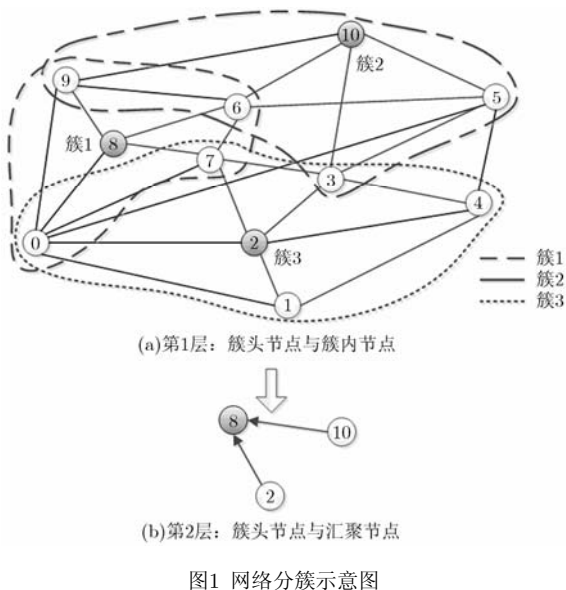


图2 构造LIT示例图

表 1 节点 6 构造的 LIT 示意表

链路			状态
1-4	4-5	5-6	0
1-3	3-6	NULL	0

已中断, 但是对节点 6 来说, 部分光通路 1-3-6 是正常的, 所以其状态位置仍为 0。

步骤 2 生成故障链路向量(Fault Link Vector, FLV)。若某节点的 LIT 中所有 LI 状态位都是 0, 则表示该节点感知到的所有链路都正常, 那无需产生 FLV, 跳过步骤 2 转到步骤 3。当构造 LIT 后, 各个节点(CH 节点和 CM 节点)将 LIT 中的所有 LI 逐一与匹配对象(Matching Object, MO)进行匹配, 得到二进制向量表(Binary Vector Table, BVT)并生成 FLV。

首先, 各个节点在 LIT 中查找状态为 1 且经过的链路数最少的 LI, 即搜索中断的最短光通路并将该 LI 保存的光通路作为本节点的 MO。显然, 故障链路必在 MO 中。然后将 MO 逐一与 LIT 中的每一个 LI(除了 MO)匹配。每次匹配的结果都是一个二进制向量(Binary Vector, BV)。所有的匹配结果都保存在一个 BVT 中, 如表 2 所示, 是一个 BVT 的示例。每个 BV 包含了 MO 中的链路以及对应链路的链路状态。若该链路状态为 0, 则表示该链路正常; 若该链路状态为 1, 则表示该链路有可能发生故障。匹配规则如下。

表 2 BVT 结构示意图

MO	链路	
	1-3	3-6
BV	1	0
	1	1

(1)当需要匹配的 LI 状态位为 0 时, 表示该 LI 中的链路都正常。则如果 MO 与该 LI 中有相同的链路, 则将 BV 中该链路对应的值设为 0, 反之为 1。

(2)当需要匹配的 LI 状态位为 1 时, 表示该故障链路必然在该 LI 中且该 LI 中的链路都有可能是故障链路。则如果 MO 与该 LI 中有相同的链路, 则将 BV 中该链路对应的值设为 1, 反之为 0。

当匹配完成之后, 将 BVT 中所有 BV 进行逻辑与操作, 生成 FLV。该 FLV 中含有本节点处理后的故障链路信息。FLV 的生成实例如表 3。

步骤 3 建立簇内矩阵(Intra-cluster Matrix, IM)。各节点构建 IM。IM 的行和列都表示网络中

表 3 FLV 生成实例

MO	链路	
	1-3	3-6
BV	1	0
	1	1
FLV	1	0

的节点, 如 $IM_{i,j}$ 即 IM 中的第 i 行第 j 列的元素, 其表示节点 i 和节点 j 之间的链路状态。同时 IM 为上三角矩阵, 因为矩阵的下三角和上三角的内容重复, 所以将下三角全部置 0。如果两个节点间没有链路, 则将 IM 中对应的元素置 0。分为式(8), 式(9)两种类型构造 IM。公式中链路的状态为 0, 则表示该链路正常; 如果链路状态为 1, 则该链路可能发生故障; 如果链路状态为 -1, 则无法判定该链路是否发生故障或者是否异常。

(1)如果该节点已经产生 FLV, 采用式(8)构造。

$$IM_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{链路 } i-j \text{ 在 FLV 中值为 } 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

(2)如果该节点没有产生 FLV, 即该 CH 节点接收到的所有 LI 的状态位都是 0。采用式(9)构造。

$$IM_{i,j} = \begin{cases} 0, & \text{LIT 中有该链路的信息} \\ -1, & \text{LIT 中无该链路的信息} \end{cases} \quad (9)$$

若该节点已经产生 FLV 即 IM 中存在值为 1 的链路, 此时节点已经将故障链路范围缩小到 IM 中值为 1 的链路中; 若节点没有产生 FLV 即 IM 中只有 0 和 -1 的链路, 则 IM 中保存了正常链路的信息以及无法判别链路的信息。

步骤 4 发送 IM。各个 CM 节点向本簇的 CH 节点发送各自的 IM。而 CH 节点的 IM 不会发送给任何节点, 只用于在本节点进行“矩阵与”运算。

步骤 5 进行“矩阵与”运算。当 CH 节点接收到 CM 节点发送的 IM 后, 对所有的 IM 进行“矩阵与”运算。生成簇头矩阵(Hub Matrix, HM), 如式(10):

$$HM = IM^{CH} \& IM^1 \& IM^2 \& \dots \& IM^i \& \dots \quad (10)$$

其中 IM^{CH} 为簇头节点建立的簇内矩阵, IM^1, IM^2 和 IM^i 等为本簇的 CM 节点建立的簇内矩阵。

步骤 6 判断是否定位出故障。当完成“矩阵与”运算后, 各个 CH 节点判断自己是否已经定位出故障。在 HM 中, 若存在值为 1 的链路, 则故障链路必然在值为 1 的链路中。因此, 如果某个 CH 节点的 HM 中值为 1 的元素唯一, 则该 CH 节点已经定位出故障, 并转到步骤 9; 否则转到步骤 7。

步骤 7 各个 CH 节点将 HM 发送给 SN 节点。同时作为 SN 节点的 CH 节点则不会发送 HM。

步骤 8 SN 节点进行“矩阵与”运算。当 SN 节点接收到来自各个 CH 节点的 HM 后, 对所有的 HM 进行“矩阵与”运算, 生成定位矩阵(Location Matrix, LM)。如式(11)所示:

$$LM = HM^1 \& HM^2 \& \dots \& HM^K \quad (11)$$

步骤 9 节点向全网广播故障定位信息, 通知

全网节点已经定位出故障链路，且故障链路是 **HM** 或者 **LM** 中值为 1 的链路。到此 FLA 算法结束。

在 FLA 算法中，CH 节点可以定位出簇内链路故障，因为簇头节点能收集到该故障链路两个端节点的 LIT。如图 2 所示，当 CH 节点收集到链路 6-7 两个端节点的 **IM** 后，通过“矩阵与”运算就可以定位出故障链路。相反，CH 节点无法收集到簇间链路两个端节点的 **IM**，所以簇间链路故障须由 SN 节点进行定位。

但是业务分布如图 3 所示的情况时，簇间链路可以被 CH 节点定位。图 3 中，光通路 $i-f-g-d-b-a$ 与光通路 $j-h-g-d-b-c$ 同时经过簇间链路 $d-g$ 。当簇间链路 $d-g$ 发生故障后，簇间链路的端节点 d 会感知到光通路 $i-f-g-d$ 与光通路 $j-h-g-d$ 发生中断且这两条中断的光通路必然同时经过故障链路，而这两条中断的光通路只有簇间链路 $d-g$ 重合。因此根据故障的唯一性，通过“矩阵与”运算后即可定位故障链路 $d-g$ 。

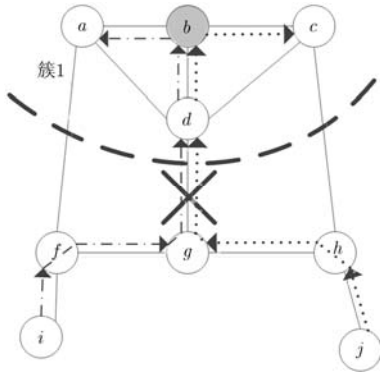


图3 簇间链路故障示意图

总的来看，FLA 算法包括感知业务光通路信息、建立矩阵、收集矩阵、“矩阵与”运算等步骤，光通路的中间节点只向本簇 CH 节点发送一次消息，CH 节点对故障链路两个端节点的 **IM** 执行“矩阵与”运算，就可以定位故障。可见，所提机制只需要一条光通路通过故障链路就能定位出该故障，相比 LVM 的故障定位条件，所提机制极大降低了对业务分布的依赖性。同时如果不对网络进行分簇，所有信息都在一个节点进行处理，则该节点需要处理 N 个信息，而处理每个信息的复杂度为 $O(N^2)$ ，因此其时间复杂度为 $O(N^3)$ 。而本机制将信息在多个 CH 节点进行分布式处理减小了复杂度，其复杂度为 $O(N^2)$ ，其中 N 为网络中的节点数。

4 仿真分析

本文在 VC++6.0 平台对 COST239, NSF 和

USNET 3 个经典网络拓扑仿真，业务请求到达服从参数为 λ 的泊松分布，业务的源-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。网络负载定义为 λ/μ 。如果业务连接建立失败则立即丢弃，无等待队列^[20]。

由于 SACA 通过光通路状态感知进行故障定位，因此业务光通路的分布模型在很大程度上影响着 SACA 的性能，使用以下业务分布模型与 SACA, LVM 两种算法结合仿真。

(1) 基于路径长度 Dijkstra 最短路径算法的经典业务分布模型，简称为 Dijkstra 业务分布模型。

(2) 基于文献[15]中启发式算法 Greedy 模式的业务分布模型，简称为 Greedy 业务分布模型。

仿真的性能指标如下所示。

定义 2 故障定位率 (Fault Location Rate, FLR) 为可被定位的链路数与总链路数之比。如式 (12)。

$$FLR = \text{Num}_{LO} / \text{Num}_{LI} \times 100\% \quad (12)$$

其中 Num_{LO} 表示故障后可被定位的链路数， Num_{LI} 表示总链路数。

定义 3 随机故障定位时间 (Random Fault Location Time, RFLT) 为故障链路随机的情况下，SACA 定位故障所用时间。

定义 4 簇间链路故障定位比 (Inter-cluster Link fault location Rate, ILR) 为可以被 CH 节点定位的簇间链路数与总的簇间链路数之比，如式 (13)。

$$ILR = \text{Num}_{LO}^{\text{IN}} / \text{Num}_{LI}^{\text{IN}} \times 100\% \quad (13)$$

其中 $\text{Num}_{LO}^{\text{IN}}$ 表示故障后可被 CH 节点定位的簇间链路数， $\text{Num}_{LI}^{\text{IN}}$ 表示总簇间链路数。

定义 5 簇间链路平均故障定位时间 (Inter-cluster link Average fault location Time, IAT) 为所有簇间链路故障定位时间之和与簇间链路数之比，如式 (14) 所示。

$$IAT = \frac{\sum_{i=1}^{\text{Num}_{LI}^{\text{IN}}} \text{Time}_{\text{IN}}^i}{\text{Num}_{LI}^{\text{IN}}} \times 100\% \quad (14)$$

其中 $\text{Time}_{\text{IN}}^i$ 表示第 i 条簇间链路的故障定位时间。

4.1 故障定位率

图 4~图 6 分别为 3 个网络的 FLR 仿真图。可以看出，当 SACA 与 LVM 同时使用 Dijkstra 业务分布模型时，SACA 在 FLR 上明显优于 LVM。这是因为 SACA 机制降低了对业务的依赖性，即只需要一条光通路经过一条链路，当该链路故障后即可快速定位故障。而 LVM 却需要两条不同源目的节点的光通路同时经过该链路才可定位故障。当 LVM 结

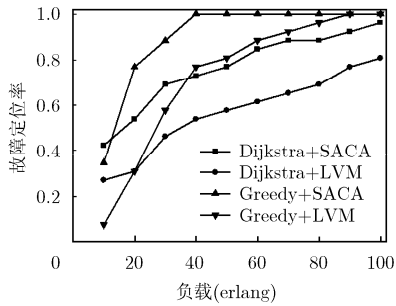


图 4 COST239 网络 FLR 仿真图

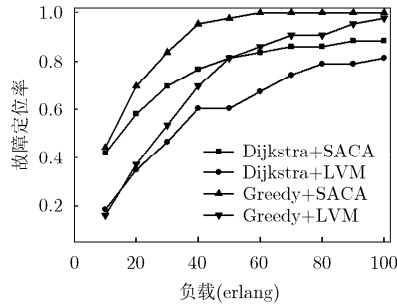


图 5 USNET 网络 FLR 仿真图



图 6 NSF 网络 FLR 仿真图

合 Greedy 业务分布模型之后,故障定位率得到了一定的提升,因为 Greedy 的目的是尽量让链路满足 LVM 故障定位的条件。同时当 SACA 结合 Greedy 业务分布模型后,FLR 也得到了明显的提升,因为 Greedy 在一定程度上使用了负载均衡的思想,优先使用只有一条光通路被占用或者空闲的链路。这在一定程度上也满足 SACA 的定位条件。

4.2 随机故障定位时间

图 7~图 9 分别为 3 个网络的 RFLT 仿真结果。可以看出 SACA 的 RFLT 远远小于 LVM 的 RFLT。这是因为 SACA 采用多个 CH 节点在网络中同时进行分布式定位,且 CH 节点只需通过单跳链路即可收集到 CM 节点的 IM。而 LVM 机制需要首先在网络中广播信息,且需要在 LP 区域中两次传输信息,而网络中却只有一个节点能够进行定位。造成了 LVM 有较长的传输时延。

在图 8,图 9 中 LVM 的 RFLT 较大,已经达到 50 ms 左右。这是因为 USNET 网络较大和 NSF 网络连通度较小,而 LVM 需要向网络中每个节点广播消息,同时业务通路较长,导致 LP 区域也增大,且 LVM 需要在 LP 区域中交换两次信息,导致 LVM 需要较长的故障定位时间。因此 LVM 并不适合在大中型网络和连通度较小的网络中应用。SACA 机制利用多个 CH 节点在网络中进行定位,每个 CM 节点都可以通过单跳链路将信息传输到 CH 节点。因此 SACA 机制在大中型网络中亦可应用,且性能较

好。但是当 CH 节点无法独立进行定位时,需要将信息传输到 SN 节点进行统一定位,此时则需要较长的时间,然而此时较长的定位时间仍然远远小于 LVM 的故障定位时间。而不同的业务分布模型下的故障定位时间大致相当,这是因为 Greedy 的主要目的是优化故障定位率。

4.3 簇间链路的故障定位比与平均故障定位时间

簇间链路发生故障后的定位性能对整个机制性能有重要影响,这可以通过 ILR 和 IAT 的仿真来评估。图 10 和图 11 为 ILR, IAT 在不同网络中的性能情况,其业务分布模型为分布较均匀的 Greedy 业务分布模型。可以看出随着业务的增多,ILR 逐渐上升,这是因为业务较多后,有较大的概率使业务通路满足如图 3 所示的定位条件。同样可以看出随着负载的增大, IAT 逐渐减小,这是由于当负载增大后,较多的簇间链路可以被 CH 节点定位,而 CH 节点定位时间较少,从而导致 IAT 逐渐减小。

5 结束语

为了解决现有故障定位机制资源开销大、对业务依赖性高、定位速度低等缺陷,本文提出基于光通路状态感知的分簇式故障定位机制(SACA)。首先将网络进行最优化分簇,当故障发生后,各个簇头节点接收成员节点的簇内矩阵,并进行“矩阵与”运算生成簇头矩阵。若簇头矩阵中没有准确显示故障,则将簇头矩阵发送给汇聚节点并计算出定位矩

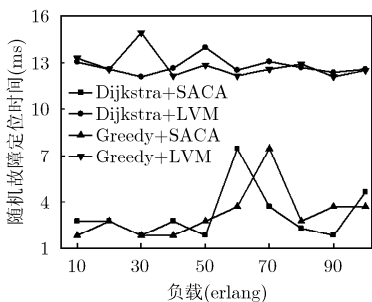


图 7 COST239 网络 RFLT 仿真图

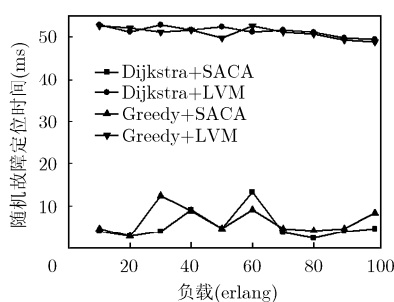


图 8 USNET 网络 RFLT 仿真图

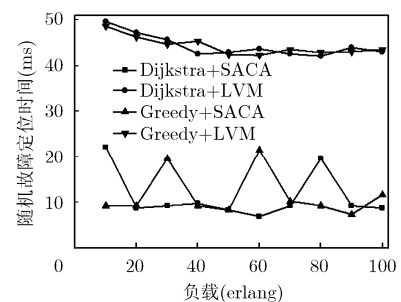


图 9 NSF 网络 RFLT 仿真图

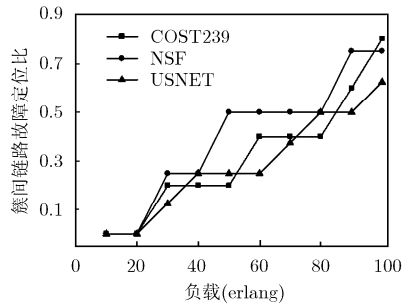


图 10 各网络 ILR 仿真图

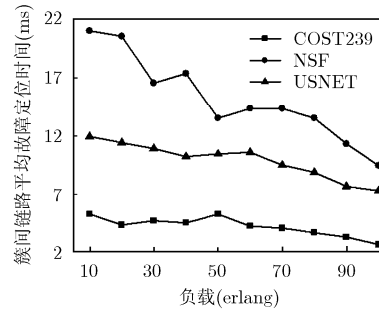


图 11 各网络 IAT 仿真图

阵，故障链路必为定位矩阵中值为 1 的链路。结果表明，SACA 能解决资源消耗问题、降低了机制对业务的依赖性，并且极大降低了故障定位时间。对于未来工作，可以通过优化网络分簇模型和业务分布模型，来进一步提升故障定位机制的性能。

参 考 文 献

- [1] Chao C S and Lu S P. Toward efficient multi-link failure diagnosis by using monitoring cycle for all-optical mesh networks[C]. International Conference on Information Networking (ICOIN), Indonesia, 2012: 228-233.
- [2] Xiong Yu, Xiong Zhong-yang, Wu Da-peng, et al.. Multi-fault aware parallel localization protocol for backbone network with many constraints[J]. *Photonic Network Communications*, 2012, 24(3): 210-218.
- [3] Wu Bin, Yeung K L, and Ho P H. Monitoring cycle design for fast link failure localization in all-optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(10): 1392-1401.
- [4] Wu Bin, Yeung K L, and Ho P H. M²-cycle: an optical layer algorithm for fast link failure detection in all-optical networks[J]. *Computer Network*, 2011, 55(3): 748-758.
- [5] Mao Min-jing and Yeung K L. Super monitor design for fast link failure localization in all-optical networks[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Communications (ICC), Kyoto, 2011: 1-5.
- [6] Tapolcai J, Wu Bin, Ho P H, et al.. A novel approach for failure localization in all-optical mesh networks[J]. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2011, 19(1): 275-285.
- [7] Wu Bin, Ho P H, Yeung K L, et al.. Optical layer monitoring schemes for fast link failure localization in all-optical networks[J]. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2011, 13(1): 114-125.
- [8] Tapolcai J, Ronyai L, and Ho P H. Link fault localization using bi-directional m-trails in all-optical mesh networks[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2012, 61(1): 1-10.
- [9] Doumith E A, Zahr S A, and Gagnaire M. Monitoring-tree: an innovative technique for failure localization in WDM translucent networks[C]. Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference(GLOBECOM), Miami, FL, 2010: 1-6.
- [10] Doumith E A, Zahr S A, and Gagnaire M. A novel meta-heuristic approach for optical monitoring-tree design in WDM networks[C]. Proceedings of 16th International Conference on Optical Network Design and Modeling (ONDM), Colchester, 2012: 1-6.
- [11] Huang Yi-fan, Huang Jun, and Li Xin. A heuristic for monitoring tree design[C]. Proceedings of the 2012 International Conference on Measurement, Information and Control (MIC), Harbin, 2012: 971-975.
- [12] 张成, 廖建新, 朱晓民. 一种基于增量贝叶斯疑似度的事件驱动故障定位算法[J]. *电子与信息学报*, 2009, 31(6): 1501-1504.
- [13] Zhang Cheng, Liao Jian-xin, and Zhu Xiao-min. An event-driven fault localization algorithm based on incremental bayesian suspected degree[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2009, 31(6): 1501-1504.
- [14] Sichani A V and Mouftah H T. Limited-perimeter vector matching fault-localisation protocol for transparent all-optical communication networks[J]. *IET Communications*, 2007, 1(3): 472-478.
- [15] Khair M G, Kantarci B, Zheng Jun, et al.. Optimization for minimizing fault localization time in all-optical networks[C]. Proceedings of 10th International Conference on Transparent Optical Networks(ICTON), Athens, 2008: 63-66.
- [16] Khair M G, Kantarci B, and Mouftah H T. Optimization for fault localization in all-optical networks[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(21): 4832-4840.
- [17] Chaudhary M H and Vandendorpe L. Performance of power-constrained estimation in hierarchical wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2013, 61(3): 724-739.
- [18] Lee Jin-shyan and Cheng Wei-liang. Fuzzy-logic-based clustering approach for wireless sensor networks using energy predication[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2012, 12(9): 2891-2897.
- [19] Hwang I S, Tu M Y, Tseng W D, et al.. A novel dynamic fault restoration mechanism using cluster allocation approach in WDM mesh networks[J]. *Computer Communications*, 2006, 29(18): 3921-3932.
- [20] Chen B, Rouskas G N, and Dutta R. Clustering methods for hierarchical traffic grooming in large-scale mesh WDM networks[J]. *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, 2010, 2(8): 502-514.
- [21] 吴大鹏, 李阳, 王汝言. 基于骑士巡游的 Mesh 光网络链路故障定位策略[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2011, 23(1): 1-5.
- [22] Wu Da-peng, Li Yang, and Wang Ru-yan. A link failure localization strategy based on knight's tour for mesh optical network[J]. *Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition)*, 2011, 23(1): 1-5.

熊 余： 男，1982 年生，副研究员，博士生，研究方向为宽带网络可靠性理论及抗毁技术。

张 鸿： 男，1987 年生，硕士生，研究方向为光网络故障管理。

王汝言： 男，1969 年生，教授，研究方向为空间光通信、光网络理论与技术、光信息处理、通信网络可靠性与故障管理。