

传感器网络中基于层次分析法的自适应路由算法

董 婷

(湖南科技职业学院电子信息工程与技术系, 长沙 410004)

摘要:为了均衡节点能耗、提高路由性能,提出了一种基于层次分析法的自适应路由算法。该算法借鉴建立梯度引导路由和分簇的思想,引入层次分析法建模以确定权值,利用若干权重因子的组合(该组合综合地反映了网络的当前状态)来选取簇头并形成簇;针对由每轮的簇头和 Sink 构建的当前轮虚拟骨干网络建立路由。理论分析和仿真实验表明,该算法支持低功率传感器,比基于周期性分簇的 LEACH(low-energy adaptive clustering hierarchy)更节能,从而更有效地均衡节点能耗、延长网络生命周期。

关键词:传感器网络;层次分析法;自适应;路由;能耗

Efficient Routing Algorithm Based on Self-adaptive Clustering for Sensor Networks

DONG Ting

(Department of Electronic Information Engineering and Technology, Hunan Vocational College of Science & Technology, Changsha 410004)

【Abstract】 For the sake of balancing energy expenditure of sensor nodes and improving the performance of routing, a self-adaptive routing algorithm based on analytic hierarchy process(AHP) is proposed. The new algorithm induces AHP to cluster self-adaptively, i.e. it selects cluster-heads by considering the working order synthetically instead of periodically. And then it makes virtual backbone network by clusters and sinks. Furthermore data is forwarded via routes built among virtual backbone networks instead of being sent directly to Sinks which may be faraway. Theoretic analysis and simulation results prove it's more effective than LEACH, which supports lower-class sensors and can balance the energy expenditure.

【Key words】 sensor networks; AHP; self-adaptive; routing; energy expenditure

1 概述

集传感器、微机电系统和网络 3 大技术于一体的传感器网络在军事国防、环境监测等方面具有十分广阔的应用前景。但外界环境的不确定性经常导致需要布置成百上千的传感器协同工作,因此,对由大规模无线集成网络传感器节点构成的传感器网络的研究正逐渐引起关注,并被认为是本世纪的一项挑战性的研究课题^[1]。

与传统 Ad hoc 网络相比,传感器网络中节点具有如下特性^[1]:分布稠密,易失效,能量、存储及计算能力等有限;数目较大,节点不一定具有全局信息。因此,Ad hoc 网络中常用的反应式或预路由协议如 DSR (dynamic source routing protocol)^[2]、DSDV(high dynamic destination sequenced distance-vector)^[3]等不能直接应用于传感器网络,必须针对其特性研究新算法。

目前提出的传感器网络路由协议主要有平面和层次路由协议 2 类。典型的平面路由有 SAR(sequential assignment routing)^[4]、DD(directed diffusion)^[6]等。上述算法均属于集中式算法,要求每个传感器节点维护全局性的网络状态信息,因此,不具备良好的可扩展性和可维护性^[5]。由于平面路由协议要求所有传感器节点均具有路由功能,导致了节点因能量消耗过快而失效,使得网络拓扑结构经常发生变化,路由性能较低。为了延长节点生存期限,提高网络的稳定性与路由性能,研究人员提出了层次路由的思想。典型的层次化协议包括 LEACH^[7]、DDCH(层次路由算法)^[8]等,但通常该类

协议从一轮到另一轮的切换是周期性进行的,与网络本身的工作状态关联性不大。

在结合考虑网络当前状态的基础上,本文提出了一种基于 AHP 的自适应路由算法(self-adaptive clustering routing based on AHP, SCRA), SCRA 具有如下良好性质:(1)是一种分布式的层次路由算法,节点只需知道 1 跳内的邻居信息;(2)具有自适应性,无需周期性地选择簇头、分簇,而是在系统的观点下综合判断、决定何时分簇、选择哪些节点做簇头,通过合理选择簇头可以有效地均衡节点能耗;(3)簇内节点和簇头采用不同的传输范围通信且簇内节点通常情况下只传感,故占节点总数较多的簇内节点能耗低。

2 预备知识

2.1 路由算法的相关定义

(1)节点检测到了预期要检测的一组数据称为一个事件;

(2)簇外传输范围 R 指节点的最大传输范围,用于簇头间及簇头与 Sink 间节点通信。簇内传输范围 r 指簇头与簇内节点间通信时的传输范围,且 $r < R$;

(3)每个节点都存储一个参考权重 $RWeight$,其初始值等于最佳情况下节点的权重值,此后第 $i+1$ 轮的 $RWeight = W_{oldi}$ (W_{oldi} 为第 i 轮要求重新分簇的簇头在本轮中的权重)。

作者简介:董 婷(1978 -),女,硕士研究生、助教,主研方向:传感器网络,手写体汉字识别

收稿日期:2006-09-19 **E-mail:** dongting11@hotmail.com

2.2 路由算法的相关假设

- (1)网络中有 n 个节点，每个节点的初始情况一致；
- (2)每个节点可通过交换消息知道其邻居节点的序列号等信息且每个节点都有唯一的序列号；
- (3)每个簇头能处理的簇内节点数最大为 M ；
- (4)每个节点都带有缓冲区存储最近发送的数据报文。

2.3 路由算法中用到的报文和表格

各阶段中用到的报文和各节点需要维护的表格分别如表 1、表 2 所示。报文和表格中各数据域的说明见表 3。

表 1 报文

报文名称	报文中包含的域	长度/bit
节点信息报文 NP	PT = 0, NT, SN, TS	33
簇头竞选报文 CEP	PT = 1, SN, W, TS	52
路由报文 RuP	PT = 2, NT = 0 or 1, SN, W, Lel, TS	57
数据报文 DP	PT = 3, NT, SN, Data, TS	2 000

表 2 各节点需要维护的表格

表格名称	表格中的域
邻居信息表 NIT	NT, SN, W, Lel, TS, Slot
报文缓存表 PBT	与缓存的 DP 一致

表 3 对报文及表格中各数据域的说明

域名	注解	长度/bit
PT	报文类型，PT = 0, ..., 3 分别表示 NP, CEP, RuP 和 DP 4 种报文	2
NT	节点类型，NT = 0, ..., 1 分别表示簇头和非簇头节点	2
SN	节点序列号	8
W	节点权重	20
W_{old}	发送 CEP 的簇头在当前轮开始时的权重	20
TS	报文时戳，记录报文产生的时刻	22
Lel	簇头级别	4
Data	数据，DP 均为 2 000bit	-

3 传感器网络中基于层次分析法的 SCRA

该算法包括建簇、建路由和数据转发 3 个阶段。

3.1 簇建立阶段

(1)若 $round = 1$ ($round$ 为当前的轮次)，则转(2)；否则转(3)。

(2)每个节点以簇内传输范围向其邻居节点广播节点信息报文 NP，接收节点将相关内容记录到邻居信息表 NIT 中并确定自己的度数。

(3)对网络中的任一节点 n_i (表示序列号为 i 的传感器)计算本地权重 W_i , $W_i = c_1 D_i + c_2 Energy_i + c_3 Num_i + c_4 ER_i$ ，其中，

- 1) $c_1 \dots c_4$ 为权重因子且 $c_1 + c_2 + c_3 + c_4 = 1$ ，计算方法见 4.2.1 节。
- 2)计算 d_i 与最大的度数 M 之差，记 $D_i = |d_i - M|$ ；
- 3) $Energy_i$ 为 n_i 已使用的能量；
- 4) Num_i 为 n_i 成为簇头的次数；
- 5) ER_i 为 n_i 的能耗率且 $ER_i = Energy_i / round$ 。

由上述易知，权重越小的节点越适合成为簇头。

(4) n_i 在计算完 W_i 后，

- 1)若 $W_i \geq RWeight$ ，则 n_i 放弃作簇头；否则， n_i 以 R 广播 CEP；
- 2)收到 CEP 的 n_j 比较自己和所有收到的 CEP 中的权重，若 W_j 最小，则它自主决定作簇头；否则 n_j 放弃作簇头。

(5)簇头确定簇

- 1)簇头广播自己成为簇头的消息；
- 2)非簇头节点根据收到信号的强弱决定要加入的簇(可认为离它最近的簇头发给它的信号最强)，并向该簇头发送 NP，告知其自己的相关信息。

(6)若有节点未加入任何簇，则它自成 1 个簇头。

由此建立簇。

3.2 路由建立阶段

(1)建簇后，Sink 以 R 在当前轮虚拟骨干网络内传播路由

报文 Rup ，Sink 的级别为 0，其下一跳邻居簇头级别为 1，依此类推，直到所有的簇头节点都有级别为止。若簇头 n_i 收到多个邻居簇头发来的路由报文 Rup ，转(2)。

(2) n_i 比较收到报文的 Lel 值，取最小的那个，并将自己的级别赋值为 $Lel + 1$ 。

3.3 数据转发阶段(data forwarding phase, DFP)

(1)Source 将收集到的数据传送给本簇簇头 n_i ；

(2) n_i 在数据融合后，

1)选择 NIT 中 $NT = 1$ 且 Lel 最小的邻居簇头转发数据；

2)若有多个邻居簇头 $Level$ 值相等且均为最小，则取其中权重最小的那个邻居转发数据；

3)若满足上述条件的记录有多个，则随机地选择一个转发。

依此类推，直到数据到达 Sink。

(3)若有簇头检测到其剩余能量 \leq 本轮开始时能量的一定百分比，则它向簇头邻居广播 CEP，收到 CEP 的簇头再在簇内广播 CEP 以重新分簇。

4 SCRA 算法分析与仿真实验

4.1 SCRA 算法分析

(1)SCRA 的时间复杂度、消息域和 LEACH 相同。

证明 LEACH 和 SCRA 在每轮中都只需执行 1 次簇头选取动作 \Rightarrow 二者时间复杂度均为 $O(n)$

LEACH 和 SCRA 都满足分布式特性 \Rightarrow 二者均只需 1 跳信息即可建簇。

综上，SCRA 在时间复杂度和消息域上和 LEACH 相同。

(2)SCRA 的能耗较 LEACH 更均衡。

证明 实验采用文献[8]提出的能耗模型，使用该模型将长度为 K bit 的报文传送到距离为 d 处的能耗和接收 K bit 报文的能耗分别为

$$E_{Tx}(k, d) = E_{Tx - elec}(k) + E_{Tx - amp}(k, d) = E_{elec} \times k + \varepsilon_{amp} \times k \times d^2 \quad (1)$$

$$E_{Rx}(k) = E_{Rx - elec}(k) = E_{elec} \times k \quad (2)$$

LEACH 的簇头直接向 Sink 传输数据报文，当簇头与 Sink 间距离较远时直接发送数据报文的能耗较大，簇头可能很快死亡。而 SCRA 中当簇头与 Sink 间距离大于簇外传输范围 R 时，簇头以较小的传输范围通过邻居簇头向 Sink 转发数据报文，在转发的跳数不大的情况下能有效地将能耗分摊在不同的节点间。故 SCRA 的能耗较 LEACH 更均衡。由此可知，SCRA 的吞吐量较 LEACH 大。

(3)SCRA 能有效地控制簇头数占存活节点总数的比例。

证明 由文献[3]中描述的簇头竞选机制可知，SCRA 能有效地控制簇头数占存活节点总数的比例。

(4)在建簇阶段 SCRA 的能耗较 LEACH 小。

证明 设 LEACH 中节点的传输范围为 D ；SCRA 中节点的簇外、簇内传输范围分别为 R 、 r ，显然 $D > R > r$ 。

LEACH 中簇头以 D 向所有节点广播自己成为簇头的广告信息，SCRA 中簇头向 r 范围内的节点广播簇头信息报文，此时 2 种报文的长度相等，设为 k_1 。

由 $D > r$ (当网络区域较大是，可能有 $D \gg r$) 及式(1)、式(2) \Rightarrow

$$E_{LEACH} = E_{Tx}(k_1, D) + E_{Rx}(k_1) = E_{Tx - elec}(k_1) + E_{Tx - amp}(k_1, D) + E_{Rx - elec}(k_1) \quad (3)$$

$$E_{SCRA} = E_{Tx}(k_1, r) + E_{Rx}(k_1) = E_{Tx - elec}(k_1) + E_{Tx - amp}(k_1, r) + E_{Rx - elec}(k_1) \quad (4)$$

$$= 2E_{elec} \times k_1 + \varepsilon_{amp} \times k_1 \times r^2$$

显然式(3)>式(4)，故建簇阶段 SCRA 的能耗较 LEACH 小。

(5)SCRA中当级别大于 1 时，在任意连续的 $i, i-1, i-2$ 层中 3 个簇头 CH_i, CH_{i-1}, CH_{i-2} 构成的三角形中设 $\angle CH_i, CH_{i-1}, CH_{i-2} = \alpha_{i-1}$ ，则对 $i>1$ 都有 $\alpha_{i-1} > \pi/3$ 。

证明 反证法：若 $\alpha_{i-1} > \pi/3$ ，由三角形的性质易知 $L_{CH_{i-2}, CH_i} \leq L_{CH_i, CH_{i-1}}$

由算法中簇头级别的设立过程可知，对任意连续的 $i, i-1, i-2$ 层中 3 个簇头 CH_i, CH_{i-1}, CH_{i-2} 有 $L_{CH_{i-2}, CH_i} \leq L_{CH_i, CH_{i-1}}$ 。故反证不成立，即对 $i>1$ 都有 $\alpha_{i-1} > \pi/3$ 。

由性质 5 可知，在路由阶段簇头向 Sink 转发数据的路径不会产生回退现象。

(6)对 SCRA 数据转发阶段的能耗分析如下：

设数据报文的长度为 k_2 ，LEACH 中某簇头与 Sink 间的距离为 d ，SCRA 中收到 Source 信息的簇头为 CH_y ， CH_y 需要经过 y 跳到达 Sink，中间转发报文的簇头分别为 $CH_{y-1}, CH_{y-2}, \dots, CH_1$ ，每跳的距离分别为 d_y, d_{y-1}, \dots, d_1 ，由式(1)、式(2)⇒

$$\begin{aligned} E_{LEACH} &= E_{Tx}(k_2, d) + E_{Rx}(k_2) \\ &= E_{Tx-elec}(k_2) + E_{Tx-amp}(k_2, d) + E_{Rx-elec}(k_2) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} E_{SCRA} &= [E_{Tx}(k_2, d_y) + E_{Rx}(k_2)] + [E_{Tx}(k_2, d_{y-1}) + E_{Rx}(k_2)] + \dots \\ &+ [E_{Tx}(k_2, d_1) + E_{Rx}(k_2)] \\ &= [E_{Tx-elec}(k_2) + E_{Tx-amp}(k_2, d_y) + E_{Rx-elec}(k_2)] + \dots \end{aligned} \quad (6)$$

$$+ [E_{Tx-elec}(k_2) + E_{Tx-amp}(k_2, d_1) + E_{Rx-elec}(k_2)]$$

$$= 2yE_{elec} \times k_2 + \varepsilon_{amp} \times k_2 \times (d_y^2 + d_{y-1}^2 + \dots + d_1^2)$$

当 $y=0$ 或 1 时，显然式(5)=式(6)，

当 $y>1$ 时，

(1)当 d 较大， d_y, d_{y-1}, \dots, d_1 较小， y 较小时，其中的第 1 项与式(6)中的第 1 项差值较小，对结果影响较小，故仅考虑式(5)、式(6)中的第 2 项。

(2)由 $CH_y, CH_{y-1}, \dots, CH_2$ ($i = y, y-1, \dots, 2$) 3 个点构造三角形，设 $L_{CH_y, CH_{y-1}} = D_y, L_{CH_{y-1}, CH_{y-2}} = d_{y-1}, L_{CH_y, CH_{y-2}} = D_{y-1}, \angle CH_y, CH_{y-1}, CH_{y-2} = \beta_{y-1}$ 。

显然 $D_y = d_y, L_{CH_y, Sink} = d$ 。

$$D_{y-1}^2 = D_y^2 + d_{y-1}^2 - 2d_y d_{y-1} \cos \beta_{y-1}$$

$$\Rightarrow \beta_{y-1} \geq \pi/2 \text{ 时, } D_{y-1}^2 \geq D_y^2 + d_{y-1}^2$$

$$\Rightarrow \text{若对 } i = y, y-1, \dots, 2 \text{ 都有 } \beta_{i-1} \geq \pi/2,$$

$$\text{则 } d^2 = D_1^2 \geq D_2^2 + d_1^2 \geq (D_3^2 + d_2^2) + d_1^2 \geq \dots \geq d_y^2 + d_{y-1}^2 + \dots + d_1^2$$

由于 β_{i-1} 可能大于等于 $\pi/2$ ，也可能小于 $\pi/2$ ，因此该阶段的总能耗 E_{LEACH} 可能大于等于 E_{SCRA} 也可能小于 E_{SCRA} 。而 β_{i-1} 是均匀分布的，故可认为 $E_{LEACH} \approx E_{SCRA}$

综上所述，SCRA 具有较低的时间复杂度、消息复杂度和较小的消息域，是节能且能耗均衡的算法。

4.2 模拟实验

4.2.1 实验参数

(1)分析系统中各因素间的关系，考虑系统中各个因素之间的相互影响、作用，用 c_1, \dots, c_4 来表示 $D_i, Energy_i, Num_i$ 和 RE_i 4 项指标相对的重要程度，建立系统的递阶层次结构引入AHP建模，对各元素关于上一层中某一准则的重要性的两两比较得到矩阵A。依据文献[10]计算得到权重因子 c_1, \dots, c_4 和随机一致性比率CR值，精确到小数点后面 2 位，有 $c_1 = 0.05, c_2 = 0.54, c_3 = 0.13, c_4 = 0.28, CR = 0.09 < 0.1$ 。故判断矩阵A具有可接收的一致性。

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 1/7 & 1/4 & 1/5 \\ 7 & 1 & 5 & 3 \\ 4 & 1/5 & 1 & 1/4 \\ 5 & 1/3 & 4 & 1 \end{pmatrix}$$

(2)SCRA的实验参数如表 4 所示：用 IE 表示节点的初始能量； RE_i 表示第 i 轮开始时簇头的剩余能量。

表 4 SCRA 的实验参数

初始能量	0.5J/node	传感范围	100×100
r	10	R	20
C_1, \dots, C_4	0.05, 0.54, 0.13, 0.28	网络中节点总数	分别取 10, 20, ..., 100
能量比例 Prop	$RE_i \geq IE \times 60\%$ 时, Prop = 60% $IE \times 50\% \leq RE_i \leq IE \times 60\%$ 时, Prop = 50% $IE \times 40\% \leq RE_i \leq IE \times 50\%$ 时, Prop = 40% $IE \times 20\% \leq RE_i \leq IE \times 40\%$ 时, Prop = 20%		

LEACH 的实验参数如表 5 所示。

表 5 LEACH 的实验参数

初始能量	0.5J/node	传感范围	100×100
传输范围	140	簇头比例	5%
网络中节点总数	分别取 10, 20, ..., 100		

4.2.2 实验结果

(1)性能比较尺度

网络检测到的事件总数(即从 source 传送到 Sink 的 DP 总数):TDE(total detected events),TDE 反映了系统的吞吐量。

第 1 个死亡节点出现的轮次与总轮次的百分比:ARR(appearance rate of the round which the first node dead)。

(2)实验结果

本文依据文献[8]进行仿真实验：算法先在 100×100 的区域内随机生成 1 个含有 n 个节点(坐标不同)的连通图，假设每个节点在网络形成前已知需要传感的数据类型，且能检测到出现在其检测范围内的事件。Sink 在网络区域内，不考虑其能耗。然后在改变 n 和其他参数的情况下通过 TDE 和 ARR 两项指标来比较算法性能，图 1、图 2 分别给出了实验结果。实验数据为算法执行 50 次后求得平均值。当网络规模较大时可以再针对簇头分簇即建立多级簇，本文实验中考虑的是分 2 层时的情况。

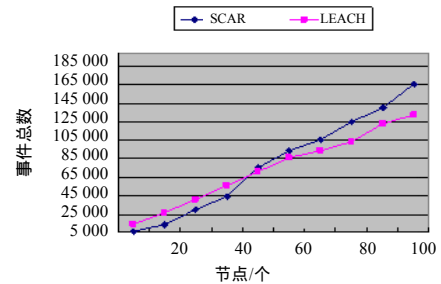


图 1 网络检测到的事件总数

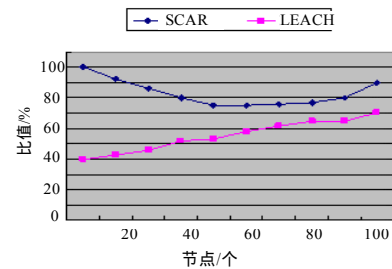


图 2 第 1 个死亡节点出现的轮次与总轮次的比值

由图 1、图 2 可知，在节点数较小($n < 50$)时，网络检测到的事件总数较 LEACH 小。这是因为 SCRA 中传感器传输范围较小，且此时网络内分布的节点数较少，故当某些关键节

点死亡后虽然网络的能量并没有耗尽,但是整个网络已经不可达了。随着 n 的增大, SCRA 检测到的事件总数多于 LEACH 检测到的事件总数。另一方面, SCRA 中第 1 个死亡节点出现的轮次与总轮次的比值也较 LEACH 大,如图 2 所示,当网络节点密度较小时,一旦关键节点死亡,整个网络就可能失效,故此时 SCRA 第 1 个死亡节点出现的轮次与总轮次的比值较 LEACH 大,随着 n 的增大,因为 SCRA 合理地选取簇头、自适应地分簇,故 SCRA 的能耗较 LEACH 更均衡,进而延长了节点寿命,增大了系统吞吐量,所以 SCRA 中第 1 个死亡节点出现的轮次较 LEACH 更靠后,并且检测到的事件总数也多于 LEACH。

总之,模拟实验表明,SCRA 在网络密度较大时实验结果更好,且 SCRA 简单、稳定,具有良好的可扩展性和可维护性,支持低功率传感器,能有效地延长网络寿命,进而增大网络吞吐量,是一种具有较好性能的适合传感器网络特性的路由算法。

5 结论

针对传感器节点能量和传输范围均有限的特点,本文提出了一种基于层次分析法的自适应路由算法,该算法引入 AHP 建模,用基于若干权重因子的组合来选取簇头并形成簇,簇头的选取无需周期性地,而是按需自适应地选取,在簇形成后再针对当前的虚拟骨干网络建立路由以传输数据。理论分析表明,该算法具有较低的复杂度;实验结果也表明,该算法能有效均衡节点能耗,具有良好的路由性能。作为一个新的研究领域,传感器网络在许多方面都需要做进一步的研究,如如何实现安全路由,如何进行有效的数据管

理、融合等。

参考文献

- 1 任丰原, 黄海宁, 林 闯. 无线传感器网络[J]. 软件学报, 2003, 14(7): 1282-1290.
- 2 王海涛, 郑少仁. 移动 Ad hoc 网络的路由协议及其性能比较[J]. 数据通信, 2003, 15(2): 193-197.
- 3 Perkins C, Bhagwat P. High Dynamic Destination Sequenced Sistance-Vector for Mobile Computer[C]//Proc. of the SIGCOMM'94 Conference on Communication Architectures, Protocols and Applications. 1994:234-244.
- 4 Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for Self-organization of a Wireless Sensor Network[J]. IEEE Personal Communications, 2000, 7(5): 16-27.
- 5 Hedetniemi S, Liestman A. A Survey of Gossiping and Broadcasting in Communication Networks[J]. Networks, 1988, 18(4): 319-349.
- 6 Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [C]//Proc. of the 6th ACM/ IEEE Annual International Conference on Mobile Computing and Networking, Boston, MA, USA. 2000: 56-67.
- 7 Heinzelman W, Chandrakasan A P, Balakrishnan H. Energy- Efficient Communication Protocols for Wireless Microsensor Networks[C]//Proceedings of Hawaiian International Conference on Systems Science. 2000.
- 8 林亚平, 王 雷, 陈 宇, 等. 传感器网络中一种分布式数据汇聚层次路由算法[J]. 电子学报, 2004, 32(11): 1801-1805.
- 9 刘来福, 曾文艺. 数学模型与数学建模[M]. 北京: 北京师范大学出版社, 1997: 74-87.

(上接第 138 页)

用标签聚合的机制,即对于有相同输入不同输出的转发等价体(FEC),为它们输入标签分配相同的标签值,从而形成与初始建立组播树的过程中类似的一对多的标签对应关系。将 PSL 固定在分支结点的上一跳还可以减少故障通知的时间,加快路径恢复的速度。

下面举例说明分支结点的保护过程,如图 2 中,实线表示预先建立的组播树,LSR1 为组播树的根结点。

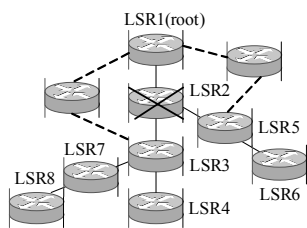


图 2 分支结点的保护

在图 2 中,为对分支结点 LSR2 提供保护,将 PSL 固定在 LSR1 即根结点处,虚线表示根据前述的备份路径计算方法选择的备份路径。在建立备份路径的过程中,为这两条备份路径分配相同的输出标签实行标签聚合。当 LSR2 发生故障时,LSR1 可立即将数据重定向到各备份路径上传输。

4 结束语

本文提出了一种基于资源共享且提供带宽保证的备份路

径计算方法,并在此基础上详细论述了 MPLS 组播网络中路径恢复的方案。本方案能够有效地利用网络资源,并具有节省标签数量和减少路径恢复时延的优点。

参考文献

- 1 Sharma V, Hellstrand F. Framework for MPLS-based Recovery[S]. RFC 3469, 2003.
- 2 Ooms D, Sales B. Framework for IP Multicast in MPLS[S]. RFC 3353, 2002.
- 3 Banimelhem O, Agarwal A. A Tree Division Approach to Support Local Failure Recovery for Multicasting in MPLS Networks[C] //Proceedings of 2005 Conference on Systems Communications. 2005.
- 4 Fei A. Aggregated Multicast: an Approach to Reduce Multicast State[C]//Proc. of the 6th Global Internet Symp. 2001.
- 5 Cui J, Faloutsos M. An Architecture for Scalable, Efficient, and Fast Fault-tolerant Multicast Provisioning[C]//Proc. of MNET Conference on Digital Object Identifier. 2004.
- 6 Aggarwal R, Papadimitriou D. Extensions to RSVP-TE for Point to Multipoint TE LSPs[Z]. (2005-09). draft-ietf-mpls-rsvp-te-p2mp-03.
- 7 Kompella K, Swallow G. Detecting MPLS Data Plane Failures[S]. RFC 4379, 2006.
- 8 Pointurier Y. Link Failure Recovery for MPLS Networks with Multicasting[D]. University of Virginia, 2002.