

一种适合水下无线传感器网络的能量有效路由协议^{*})

张 剑 黄本雄 张 帆 涂 来
(华中科技大学电信系 武汉 430074)

摘 要 本文针对水下声信道高能耗和高延迟的特点,提出一种基于前向簇头与前向网关的无线路由协议(FFBR)。其思想是基于分簇结构,引入前向簇头和前向网关的概念,并在分簇初始化的过程中“捎带”选择前向簇头和前向网关,以形成朝向 sink 的方向性节能路由。它避免了路由建立的开销和时延,同时保证数据传输时网络能耗均衡,以减小水声高延迟、高能耗带来的不利影响。仿真结果表明,FFBR 协议比 DSR 协议能更好地适应水声高延迟、高能耗通信环境,不但有较高的连通率,而且能节省网络能量,提高数据传输的及时性。

关键词 水下传感器网络,前向簇头,前向网关,能量有效,路由协议

An Energy-efficient Routing Protocol Applied in Underwater Sensor Networks

ZHANG Jian HUANG Ben-Xiong ZHANG Fan TU Lai

(Department of Electronics and Information Engineering, Huazhong University of Sci. & Tech., Wuhan 430074)

Abstract In order to overcome long transmission delay and high energy consumption problems in under-water acoustic sensor network (UWASN), this paper proposes an efficient wireless routing protocol based on forward-clusterhead and forward-gateway (FFBR). It makes use of the concepts of forward-clusterhead (FC) and forward-gateway (FG), so the route from the source node to sink can be formed by the selection of FC and FG that are brought in during the initiation of clustering. FFBR is expected to balance energy consumption in data transmission without delay and spending of routing establishment. Experiments show that being compared with DSR protocol, FFBR achieves better performance on connectivity, energy consumption, transmission-delay. Therefore, it can be well applied in the under water acoustic sensor network.

Keywords Underwater sensor networks, Forward-clusterhead, Forward-gateway, Energy-efficient, Routing protocol

1 引言

随着陆基无线传感器网络的发展,水下无线传感器网络的研究也得到了越来越多的重视,并逐渐在海洋环境监测、水下军事防御、海洋灾难预警等众多领域得到应用。水下无线传感器网络结构与陆基传感器网络相似,节点感应数据,然后传递给 sink 节点。sink 是没有任何资源约束的浮标等物体,可直接与岸基或母船联系。水下传感网络同样需面临如何解决节点资源受限、如何及时将数据传递给 sink,同时尽可能地延长网络寿命等问题。

然而水下信道与陆基无线电信道大不相同^[1];其带宽严重受限,一般只有 30~300Hz,通常只能采用水声信号传输;声信号在水中的传播速度只有 1500m/s,因此传输延时大、系统吞吐量低;信道质量很差,衰减严重、干扰大、多径效应严重;节点能耗很高;频率越高、距离越长,信号衰减越严重。为此,需要设计新的通信协议来适应水声环境的通信要求。

研究者已经针对陆基无线传感器网络提出了一些实时路由协议^[2],但它们并不适合直接运用到水下传感器网络中来。这些协议一般仅仅考虑了节能问题而忽视了传输时延^[3],或者是提供了时延保证但忽视了能量消耗^[4]。有些协议虽然结合了能量和实时度量指标^[5],但引入了过多控制开销,也不适合大规模的水下传感器网络。位置信息是无线网络中的一个重要议题^[6],其思想对于水下传感器网络的路由协议设计有一定借鉴作用。但大多数基于位置的无线路由协议(GRS^[7]、

COMPASS^[8])却都没有仔细考虑能量消耗。

本文针对水下声信道高能耗和高延迟的特点,提出一种基于前向簇头与前向网关的无线路由协议(Forward-clusterhead and Forward-gateway Based Routing, FFBR)。其思想是基于分簇拓扑结构,引入前向簇头和前向网关的概念,充分利用节点的位置信息,使得网络在进行分簇结构初始化的过程中就能够“捎带”选择前向簇头和前向网关,为形成朝向 sink 的方向性节能路由奠定基础。该协议减小了路由形成的开销和时延,保证数据传输最趋于 sink 节点、网络能耗均衡,以减小水声通信高延迟和高能耗带来的不利影响。

2 模型描述

2.1 水声信道传输损耗模型

为了量化水下节点之间通信时的传输功率损耗,引用文[9]给出的水声通信能量损耗模型。设数据包大小为 T_p ,接收端正确接收信号的最小功率为 P_0 ,则发送端发射功率 E 可用下式表示:

$$E = P_0 T_p A(d) = P_0 T_p d^k 10^{d \cdot \alpha(f)} \quad (1)$$

其中 d 为发射节点与接收节点间的距离; k 为波面扩展损失因子,一般可取 $k = 1.5$; f 为水声传播频率; $\alpha(f)$ 是 Throp^[9] 频率吸收系数 (dB/km);

$$\alpha(f) = \frac{0.1f^2}{1+f^2} + \frac{44f^2}{4100+f^2} + 2.75 \times 10^{-4} f^2 + 0.03 \quad (2)$$

从式(1)、(2)可以看出,如果所有节点都直接跟 sink 通信,则

^{*})国家自然科学基金(No. 60572047);湖北省光电子优秀创新人才资助项目。张 剑 博士研究生,研究方向为无线传感器网络;黄本雄 博士生导师。

能量消耗对于离 sink 较远的节点来说将会是巨大的。若对多跳路由的建立和维护过于频繁,也将急剧增加网络能量开销。

2.2 前向传输候选模型

记 $d(AB)$ 为节点 A 到节点 B 的距离, sink 节点为 D , 节点通信半径为 R , 给出如下定义。

定义 1 节点 V_i 的邻居定义为

$$\{N(V_i) = V_j \mid d(V_i V_j) \leq R, j \neq i\}$$

定义 2 前向传输(FT)原则确保每一个中继节点与节点 D 的距离比其前驱节点与节点 D 的距离更小,同时确保该中继节点与源节点的距离比其前驱节点与源节点的距离更大。

定义 3 节点 V_i 的邻居中,遵循 FT 原则的节点组成 V_i 的前向候选节点集(FCNS)。

定义 4 节点 G_i 在分簇初始化阶段除了接收到本簇簇头的广播消息之外,还可能会接收到其他簇头的广播消息。如果这些簇头满足 FT 要求,则它们组成节点 G_i 的前向候选簇头集(FCHS)。

定义 5 簇内属于簇头 CH_i 的 FCNS 集合中,拥有前向簇头 CH_i 的节点组成簇头的前向候选网关集(FCGS)。FCGS 中的节点除了可以与其本簇簇头通信外,还可以与其前向簇头直接通信。

给定源节点 S 和目标节点 D , 则 V_i 的 FCNS 为

$$FCNS(V_i) = \{K_j \mid d(K_j, S) > d(V_i, S), d(K_j, D) < d(V_i, D), K_j \in N(V_i)\} \quad (3)$$

若簇头 CH_i 的“管辖”半径为 D_i , 则其 FCGS 为

$$FCGS(CH_i) = \{G_j \mid d(G_j, CH_i) < D_i \text{ 且 } \exists CH_j \in FCNS(G_j), d(G_j, CH_j) < D_j\} \quad (4)$$

节点 G_i 的 FCHS 为

$$FCHS(G_i) = \{CH_j \mid d(G_i, CH_j) < D_j, CH_j \in FCNS(G_i)\} \quad (5)$$

从式(3)~(5)可以看出,前向候选网关集(FCGS)和前向候选簇头集(FCHS)中的节点一定也为 FCNS。如图 1, 节点 A 是从源节点 S 到目标节点 D 的路径上的一个节点, 其中, 弧 $L A J H M$ 为以 S 为中心、 $d(SA)$ 为半径的一段弧, $G C A K$ 为以点 D 为中心、 $d(DA)$ 为半径的一段弧, 节点 L, G, I, H 位于以节点 A 为中心、 R 为半径的圆周上, 三段弧 \widehat{ACG} 、 \widehat{GIH} 、 \widehat{HJA} 围成的部分(图中阴影部分)构成节点 A 的 FCNS 区域。若 A 为簇头节点, 则 A 的前向候选网关集(FCGS)应处于图中阴影部分, 同时 A 的前向候选簇头集(FCHS)也应处于图中阴影部分。

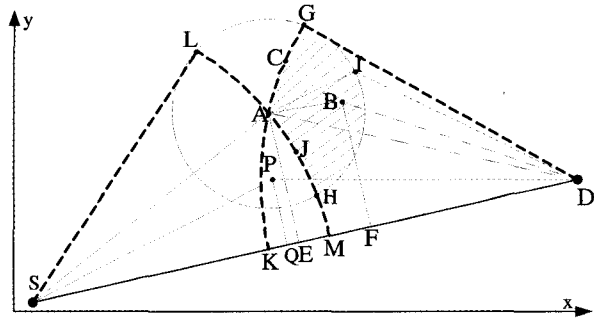


图 1 FCGS 和 FCHS 模型

3 基于前向簇头和前向网关的路由算法

针对水声通信的高延迟和高能耗特点,我们基于分簇拓

扑结构,簇头节点间采用多跳方式向 sink 传输数据,以避免长距离传输带来的高额能量开销,同时结合上述传输模型,提出了一种基于前向簇头和前向网关的路由算法(Forward-gateway and Forward-clusterhead Based Routing, FFBR)。图 2 是其示意图,下面具体介绍其算法细节。

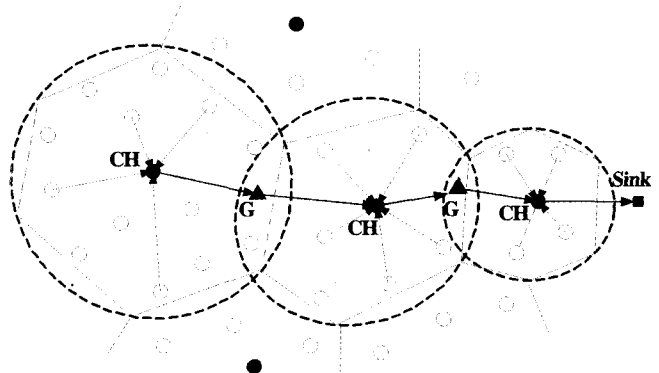


图 2 FFBR 算法示意图

3.1 前向簇头的选择策略

3.1.1 最短路径原则

节点 V_i 遵循最短路径原则选取前向簇头:(1)节点 V_i 已经形成了自己的 FCHS;(2)选取的前向簇头是 V_i 的 FCHS 集合中与 V_i 和 sink 节点路径之和最短的节点。具体解释如图 3, 图中, S 标识簇头 CH_i , D 标识 sink。以节点 V_i 为圆心做半径为 R 的圆弧, 同时以 D 为圆心做半径为 $d(D, V_i)$ 的圆弧, 两段圆弧所围区域为 V_i 的前向候选簇头节点出现的区域。若以图中虚线椭圆框表示节点朝向 sink 的前向候选簇头集 FCHS, 其内部有 H_1, H_2 等若干前向候选簇头。最短路径原则即是选取虚线椭圆框中某个节点 H_i , 使得其到节点 G 和节点 D 的距离之和最短。以 H_1, H_2 为例, 因为 $H_1G + H_1D < H_2G + H_2D$, 因此节点 G 会选择 H_1 为其前向簇头。

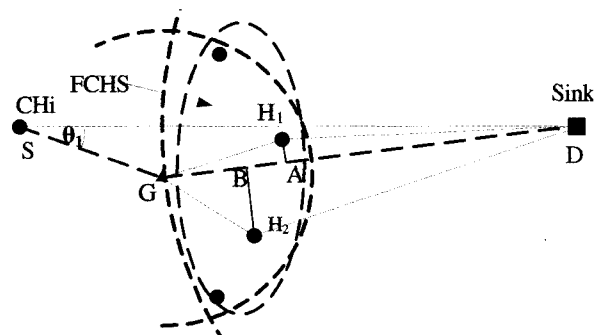


图 3 最短路径原则

3.1.2 前向簇头的选取

由于 FFBR 路由协议基于分簇结构,其前向簇头的选择需借助分簇的初始化过程。因此,为了叙述方便,我们借助 LEACH 分簇算法来说明前向簇头的选取。网络初始化之前, sink 向全网发送广播,使每个节点可以估测其自身位置,即与 sink 节点的距离(d_i)。设普通节点都有一个候选簇头节点集,记为 S_H 。具体选择步骤如下:

① 分簇算法选择簇头,成为簇头的节点发送广播(HEAD_MSG),宣称其成为簇头。此广播消息中包含有簇头的位置信息(d_i)和剩余能量(E_i);

② 普通节点 j 接收簇头 CH_i 的 HEAD_MSG 消息,并将

该簇头 ID 加入到其 S_H 中,记录下 CH_i 的 d_i, E_i ;

③ 节点测算自己到 S_H 中所有簇头节点的距离,选择一个距离最小的簇头作为其将要申请加入的簇的簇头,记为 CH_0 ;

④ 节点比较 S_H 中的除 CH_0 以外其他簇头节点的 d_i , 并选择满足 $d_i < d_j$ 的簇头为其前向候选簇头,加入到 $FCHS$ 集合中,记为 S_{FCH} ;

⑤ 根据最短路径原则,节点 j 对其 S_{FCH} 中取 $\min\{d_i + d_{ij}\}$ 为其前向候选簇头,记为 CH_F 。若 CH_F 等于 CH_0 或者 S_{FCH} 为空,则记节点 j 无前向簇头。

3.2 前向网关的选择策略

3.2.1 最小方向角原则

簇头 CH_i 遵循最优方向角原则选取前向网关:(1) CH_i 已经形成了自己的 FCGS;(2)选取的前向网关节点是簇头 CH_i 的 FCGS 集合中与其夹角最小的节点,其具体解释如图 4,图中,以椭圆虚线框表示节点 CH_i 对于 sink 的前向候选网关集 FCGS,其内有 G_1, G_2 等若干前向候选网关。定义 θ_1, θ_2 分别为 G_1, G_2 在数据传输方向上的方向角。最优方向角原则即是从 FCGS 中选择某个节点 G_i ,使其方向角 θ_i 在所有节点的方向角中最小。在图中可以看出节点 G_1 的方向角最小,因此 CH_i 将选择 G_1 为其前向网关。

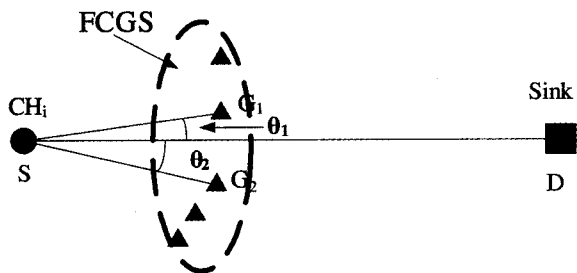


图 4 最小方向角原则

3.2.2 前向网关的选择

前向网关的选择是紧接着前向簇头的选择的。把簇头节点 CH_i 的前向候选网关集合 FCGS 记为 S_G 。具体步骤如下:

① 成员节点 j 选择完前向簇头 CH_0 后,向其簇头发送申请加入消息 (JOIN_MSG),该消息包含 CH_0 的 ID、节点 j 的 ID 以及其前向簇头 CH_F 信息和剩余能量 E_j ;

② 当簇头接收到节点 j 的 JOIN_MSG 消息后,若节点 j 有 CH_F ,则该簇头将节点 j 的 ID 加入 S_G ,并记录节点 j 的方向角 θ_j ;

③ 经过一段时间 T 后,簇头 CH_i 接收完所有簇成员的 JOIN_MSG,然后它对 S_G 中的所有候选网关节点按照最优方向角原则选择前向网关,记为 G_i 。最后簇头 CH_i 将发送簇内广播 REPLY_MSG,确认簇成员节点加入成功,并通知节点 G_i 为其前向网关。

3.3 路由建立与维护

经过了以上分簇结构初始化之后,初步形成了簇头的前向网关 G_i 和前向网关的前向簇头 CH_F 。这样,在簇间进行数据传输时,簇头间不需要专门进行路由查找,簇头直接把数据传递给它前向网关,前向网关则把中继数据直接传给其前向簇头,依此下去在簇头间形成了朝向 sink 的路由。

由于分簇结构需要周期性地初始化,因此对于路由由中断等错误可以在下一次重新分簇初始化过程中得到恢复。

3.4 协议分析

3.4.1 FFBR 路由算法具有如下显著优点

(1)路由选择、建立、初始化过程在网络拓扑初始化时完成,避免了发送数据前的路由建立过程,减小了数据传输延迟,使得水下高延迟环境中的监控数据能够及时快速地传送给监控中心。

(2)协议基于分簇结构,簇头的周期选择机制会使得路由链路中断等错误在每个周期重新选择簇头的过程中得到更正,减少了维护信令开销。

(3)路由建立所需所有交互信令全部是在网络拓扑初始化过程中以捎带的形式进行,不增加分簇算法的消息复杂度。

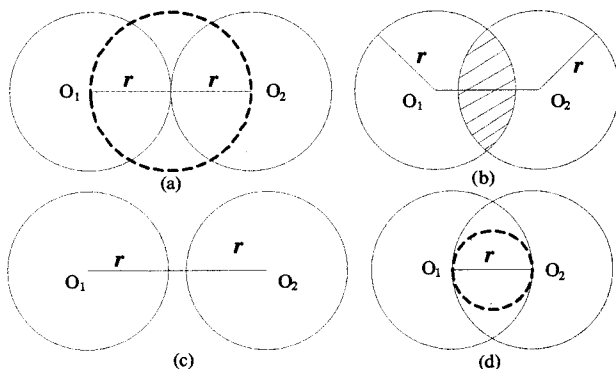


图 5 相邻簇头的广播范围关系

3.4.2 前向网关存在的条件

根据前向网关的形成机制,可知前向网关必定可以接收到 2 个及 2 个以上的簇头广播信息。考察如图 5 所示两个相邻的簇头广播范围。若要使两个簇头 O_1, O_2 之前有可能存在前向网关,则必须满足 $|O_1 O_2| \leq 2r$ 。换句话说,即是 O_1, O_2 这个两个簇头节点落在图 5(a)中的虚线圆内,即这个直径为 $2r$ 的圆内存在两个以上的簇头节点。设整个网络是一个半径为 R 的圆形区域,每个簇头的广播半径为 r 。整个网络中存在 k 个簇头,因此簇头在网络中的分布密度为 $k/\pi R^2$ 。于是有

$$\frac{k}{\pi R^2} g \pi r^2 \geq 2$$

$$\text{即 } \frac{r}{R} \geq \sqrt{\frac{2}{k}} \quad (6)$$

式(6)是两个簇之间存在前向网关的基本条件。若网络中节点以密度为 ρ 均匀随机分布,节点成为簇头的概率为 P ,则(6)式可变为

$$r \geq \sqrt{\frac{2}{\pi \rho \cdot P}} \quad (7)$$

为了防止一个簇头落入另外一个簇内,根据图 5(d)可知,必须使直径为 r 的虚线圆内的簇头数目不超过 1 个,于是有

$$\frac{k}{\pi R^2} g \frac{1}{4} \pi r^2 \leq 1$$

$$\text{即 } \frac{r}{R} \leq \sqrt{\frac{4}{k}} \quad (8)$$

$$\text{同理可得: } r \leq \sqrt{\frac{4}{\pi \rho \cdot P}} \quad (9)$$

结合式(7),可得:

$$\sqrt{\frac{2}{\pi \rho \cdot P}} \leq r \leq \sqrt{\frac{4}{\pi \rho \cdot P}} \quad (10)$$

式(10)即是保证两个簇间存在前向网关,又可以避免簇头落入另外一个簇内的必要条件。

4 仿真结果与性能分析

在仿真实验中,我们把 FFBR 协议与 DSR 协议^[10](只在簇头间运用)进行比较。实验场景配置为:节点以随机方式布放在 4000m×4000m 区域内,节点数目为可调参数,初始值为 $N=500$ 。簇半径初始值为 $r=450m$,设 sink 位于区域中心。节点正确接收数据的能量门限值为 0.001J。忽略节点之间的物理链路错误,并且假设网络中每个数据发送周期内只有 25% 的节点产生数据发送。我们从如下三个方面来验证 FFBR 的性能:

4.1 网络能量消耗

仿真过程中,只统计分簇结构形成之后一个稳定的数据传输阶段内网络能量开销。设此阶段包含 K 个数据发送周期,其值对路由协议的能量消耗影响不大。每个节点每次发送一个单位长度数据。简化 DSR 协议的路由初始化与维护过程,假定其只需在每次分簇后,首次发送数据时进行路由初始化。DSR 协议路由控制包设为一个单位长度数据。如图 6 所示,可以看出当 r 为初始值不变时,DSR 协议下网络消耗的能量要比 FFBR 协议下网络消耗的能量大得多。特别是在数据传输的开始阶段,DSR 协议需要建立路由,因此其网络的能耗要远远超出 FFBR 协议下网络能耗。

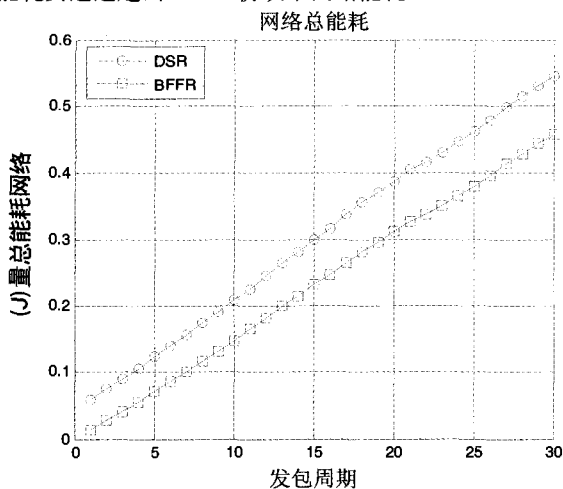


图 6 $N=500, r=450$ 时的网络耗能总量

4.2 网络端到端传输延迟

10种随机场景下的平均端到端延迟

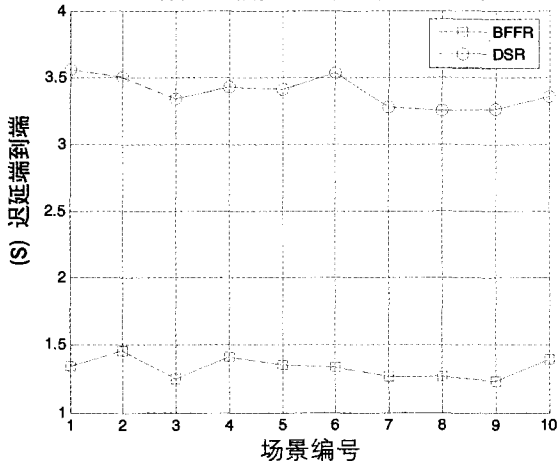


图 7 不同网络拓扑结构下的端到端平均时延

为了比较数据传输过程中端到端的时延,随机产生 10 个不同的网络拓扑结构,计算两种协议在不同网络拓扑中分簇结构初始化后,节点首次产生数据,从源节点传输到 sink 的平均时延。图 7 是仿真结果,从图中可以看出,FFBR 协议下,网络的端到端平均时延大致只有 DSR 协议下的三分之一。这说明 FFBR 在及时数据汇报上比 DSR 有着明显的优势。其原因正是由于 FFBR 在分簇过程中形成了前向网关和前向簇头,为建立路由提供了基础,减小了数据传输阶段的时延。

4.3 网络连通成功率

我们通过改变仿真设定区域内节点数目来比较两种协议下每个簇头节点能够最终建立一条朝向 sink 的路径的概率,即连通率问题。当节点数目一定时,测试两种协议在 20 种场景下建立路由的平均概率。图 8 中,节点数目从 200 增长到 800,步长为 100。可以看出,两种协议下,路由的连通率都随着节点数目的增加而增加,但 FFBR 的连通率却远远高于 DSR 协议。FFBR 协议下,当节点超过 500 时,连通率都维持在 90% 以上;在节点数为 600 时,连通率达到峰值。而 DSR 协议的连通率只维持在 20% 到 30% 之间,同样也是在节点数为 600 的时达到峰值。两种协议在节点数目超过 600 时,连通率都稍微有所下降,但对连通率比较的结论影响不大。造成该现象的原因与分簇策略的均衡性有关,这在文[11]有讨论。通过连通率的比较,我们可知 FFBR 的连通率远远高于 DSR,其更有利于数据正确传输。

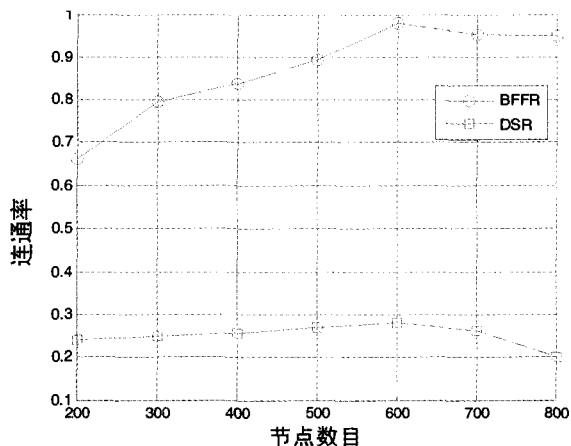


图 8 网络连通率变化

结论 本文提出了一种基于前向簇头与前向网关的适用于水下传感器网络的路由协议(FFBR),该协议主要有如下特点:(1)基于分簇结构,引入前向簇头和前向网关的概念;(2)充分利用节点位置信息,使得网络在拓扑结构初始化的过程中就能够形成朝向 sink 的方向性节能路由;(3)利用前向簇头和前向网关来建立路由,从而减小了路由建立的开销和时延。同时,前向簇头和前向网关的选择策略,可以保证数据传输时网络的能量消耗均衡,以利于减小水声高延迟和高能耗的不利影响。仿真实验结果表明,FFBR 协议比 DSR 为数据源路由协议能更好地适应水下高延迟、高能耗通信环境,在获得较高连通率的同时能很好的节省网络能量,提高信息传输的及时性。

参考文献

1 Akyildiz F, Pompili D, Melodia T. Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges. Ad Hoc Networks (Elsevier), May 2005, 3(3): 257~279

(下转第 195 页)

- (25) $M_i = I$; // M_i 用来存放全局最小频繁闭项目集 Y 所对应的全局最大频繁闭项目集, 初始为全集 I
- (26) for all transaction $t \in DB$ do
- (27) for all $Y \in GMinFCI$ do
- (28) if $t \supseteq Y$ then
- (29) $M_i = M_i \cap t$; // 根据定理 6
- (30) broadcast 所有 M_i ;
- (31) receive from 计算机 P_j 发来的所有 $M_j (j \neq i)$;
- (30) $GMaxFCI = \Phi$; // 赋初值
- (31) for all $Y \in GMinFCI$ do
- (32) $GMaxFCI_{UD} = GMaxFCI_{UD} \cup \bigcap_{i=1}^n M_i$;

3 算法实现与比较

为了测试算法的性能,我们在 100M 的局域网中,用两台 PC 机构成分布式系统,两台 PC 机的配置均相同,实验数据采用文[2]的合成数据方法,并将事务数据库均分到两台计算机上,其有关参数与文[2]相同。在本实验中, $N=1000$, $|L|=1000$, $|D_1|=10K$, $|T|=25$, $|I|=15$,实验结果如图 1 所示。图 1 表明算法 GFCIA 是有效可行的,其效率是全局频繁项目集挖掘算法 FPM 的 2~4 倍。

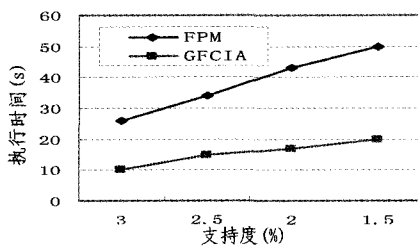


图 1 算法执行时间

结束语 本文提出了一种全局频繁闭项目集挖掘算法,并就其更新问题进行了研究,提出了一种全局频繁闭项目集更新算法,该算法可以有效地降低网络通信量,提高全局频繁闭项目集挖掘算法的效率。实验表明,本文所提算法是有效和可行的。下一步研究的主要目标是,在实际应用中对算法进行进一步的测试,并就其它更新问题进行深入研究,以推广其应用。

参考文献

- 1 Agrawal R, Imielinski T, Swami A. Mining association rules between sets of items in large databases. In: Proc. ACM SIGMOD Int Conf. Management of Date, Washington D C, 1993. 207~216

- 2 Agrawal R, Srikant R. Fast algorithm for mining association rules. In: Proc. 20th Int. Conf. on VLDB, Santiago, Chile, 1994. 487~499
- 3 Houtsma M, Swami A. Set-oriented mining for association rules in relational databases. In: Yu P, Chen A, eds. Proc. of the Int. Conf. on Data Engineering, Los Alamitos, CA: IEEE Computer Society Press, 1995. 25~33
- 4 Han J, Fu Y. Discovery of multiple-level association rules from large databases. In: Proc. 21th Int. Conf. on VLDB, Zurich, Switzerland, 1995. 420~431
- 5 Han J, Kamber M. Data Mining: Concepts and Techniques. Beijing: High Education Press, 2001
- 6 Bayardo R. Efficiently mining long patterns from databases. In: Haas L M, Tiwary A, eds. In: Proc. of the ACM SIGMOD Int Conf. on Management of Data. New York: ACM Press, 1998. 85~93
- 7 Lin Dao-I, Kedem Z M. Pincer-Search: a new algorithm for discovering the maximum frequent set. In: Schek H J, Saltor F, Ramos I. et al., eds. Proc. of the 6th European Conf on Extending database Technology. Heidelberg: Springer_Verlag, 1998. 105~119
- 8 路松峰, 卢正鼎. 快速开采最大频繁项目集. 软件学报, 2001, 12(2): 293~297
- 9 Han J, Jian Pei, Yiwen Y. Mining Frequent Patterns Without Candidate Generation. In: Proceedings 2000 ACM-SIGMOD Int. Conf. Management of Data, Dallas, TX, 2000. 1~12
- 10 宋余庆, 朱玉全, 孙志挥, 等. 一种基于 FP-tree 的最大频繁项目集挖掘及其更新算法. 软件学报, 2003, 14(9): 1586~1592
- 11 Pasquier N, Bastide Y, Taouil R, et al. Discovering Frequent Closed Itemsets for Association Rules. In: Proc. of 7th Int. Conf. Database Theory, Jerusalem Israel, 1999, 1: 398~416
- 12 Pei J, Han J, Mao R. CLOSET: An efficient algorithm for mining frequent closed itemsets. In: DMKD'00, May 2000
- 13 Zaki Z, Hsiao C. CHARM: An efficient algorithm for closed itemset mining. In: SDM'02, April 2002
- 14 Wang J Y, Han J, Pei J. CLOSET+: Searching for the best strategies for mining frequent closed itemsets. In: SIGKDD'03, August 24-24, Washington, DC, USA
- 15 Cheung D W, Lee S D, Xiao Y Q. Effect of data skewness and workload balance in parallel data mining. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2002, 14(3): 498~514

(上接第 41 页)

- 2 Hughes B, Cahill V. Achieving Real-time Guarantees in Mobile Ad Hoc Wireless Networks. In: Proceedings of the Work-in-Progress session of the 24th IEEE Real-time Systems Symposium, December 2003
- 3 Al-karaki J N, Kamal A E. Routing Techniques in Wireless Sensor Networks: A Survey. Wireless Communications, IEEE [see also IEEE Personal Communications], 2004, 11(6): 6~28
- 4 He Tian, Stankovic J A, Lu Chenyang, et al. SPEED: A Stateless Protocol for Real-time Communication in Sensor Networks. In: Proceedings of the 23rd International Conference on Distributed Computing Systems (ICDCS 2003), May 2003. 46~55
- 5 Sohrabi K, Gao J, Ailawadhi V, et al. Protocols for Self-organization of a Wireless Sensor Network. In: IEEE Personal Communications, October 2000. 16~27
- 6 Giordano S, Stojmenovic I, Blazevic L. Position Based Routing

- Algorithms for Ad Hoc Networks: A Taxonomy. Ad Hoc Wireless Networks, 2003
- 7 Finn G G. Routing and Addressing Problem in Large Metropolitan-Scale Inter-networks. ISI res Rep ISU/RF-87-180. March 1987
- 8 Kranakis E, Singh H, Urrutia J. Compass Routing on Geometric Networks. In: Proceedings of the 11th Canadian Conference on Computational Geometry, Vancouver, Canada, August 1999. 51~54
- 9 Berkhovskikh L, Lysanov Y. Fundamentals of Ocean Acoustics. New York: Springer, 1982
- 10 Johnson D B, Maltz D A. Dynamic source routing in ad hoc wireless networks. In: Mobile Computing, edited by Tomasz Imielinski and Hank Korth, Kluwer Academic Publishers, 1996. 153~181