

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.01.011

应急情况下最少转发节点的传感器 网络组播路由树算法*

印敏 沈晔 蒋磊 冯径

(解放军理工大学 气象海洋学院 南京 211101)

摘要:在抢险救灾等应急情况下,传感器网络的节点能量更为有限。为减少无用转发的能量消耗,利用无线信道的广播特性,根据广播子树删除思想,提出一种基于最短路由树、具有最少转发节点的组播路由树生成算法。对该算法进行了证明和详细分析,并针对实际需要,给出使用范围更广泛的分布式实现方法。仿真分析说明,算法的分布式实现方法可减少 ODMRP 的转发节点数,大大降低数据发送次数,接收成员节点较多时尤为明显。最少转发节点的组播路由树的网络总开销最小,是延长网络生存时间的有效方法。

关键词:传感器网络;组播路由树;最少转发;节省能量;应急

中图分类号: TP393; TN915.02 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.5030

Minimum forwarding routing tree algorithm in emergency sensor network

Yin Min Shen Ye Jiang Lei Feng Jing

(College of Meteorology and Oceanography, PLA University of Science and Technology, Nanjing 211101, China)

Abstract: In disaster rescue and emergency situations, node energy in sensor network is especially limited. In order to reduce unnecessary forwarding consumption, this paper presents a MANET multicast routing tree algorithm with least forwarding nodes, which is based on shortest routing tree and sub-tree deletion. The algorithm is proved and analyzed in detail. Its practical distributed version is also presented. The simulation comparison shows that this distributed algorithm reduces the forwarding transmission in improved ODMRP, especially there are much more receivers in MANET. Minimum forwarding routing tree has the minimum network overhead. It is an effective way to extend the network lifetime.

Keywords: sensor network; multicast routing tree; minimum forwarding; energy limited; emergency

1 引言

随着日益多样化的需求与不断进步的科技水平,无线传感器网络技术一直受到学术界与工业界的广泛关注,从最初出现的 Wireless Sensor Network^[1]到现在迅速发展的 Vehicular Ad Hoc Networks^[2]和 Internet of Things^[3],甚至是军用 Ad Hoc 网络,传感器网络技术已经与人类的生产和生活密不可分。

传感器网络中的基本节点是一个便携式设备终端,它可以为人们提供网络游戏、视频点播、视频会议、信息共享群发等应用,而终端节点服务质量的保证则依赖于底层无线自组网的组播路由等网络技术。组播路由协议除需具备单播协议基本的路由功能外,要能更有效地节约带宽、减少通信开销,在无法预知节点移动的情况下提供较高的分组递交率,支持不可靠无线链路的动态变化。

目前文献中已提出多种组播方案,总体来说可分为泛洪组播、基于转发树组播、基于转发网组播、混合组播(或

收稿日期:2016-07 Received Date: 2016-07

* 基金项目:国家自然科学基金(61371119)、“快速响应卫星动态组网与数据传输控制技术研究”项目、江苏省自然科学基金(BK20130070)、“应对多种节点行为状态的 ad hoc 网络信任模型研究”项目资助

应用层组播)、无状态组播^[4]。从性能上看,泛洪组播简单、可靠,无需建立和维护组播转发结构,分组递交率高,但可扩展性和安全性不好,仅适于小规模、动态网络^[5];应用层组播虽然不受物理网络拓扑变化的影响,却需要较大带宽,而且分组递交率低,时延较大,还有待改进^[6];无状态组播不需维护转发路由和组播转发状态,但该类协议的性能目前还比不上传统组播路由协议^[7]。基于转发网的协议比基于转发树的协议更符合 MANET 网络特点^[8]。

由于无线节点能量有限,节点的无用转发也是一种能量的消耗。尤其是在抢险、救灾等特殊场合临时组建的无线自组织网络中,每个终端节点的能量更是十分有限。文献[9-13]研究了无线传感器网络中节点的能量消耗问题,采用蚁群算法、链首节点轮换的方法等降低节点的能量消耗。本文则从全局角度考虑带宽开销的优化问题,选择合适的路由、构建组播树,以便节省节点能量,延长整网运行寿命。

目前,组播路由的选路依据主要是有线网的最短路径、稳定度等度量准则。有线网中,寻找最小开销树为著名的基于最小边开销的 Steiner 树求解问题。但是该结论有一定前提,即某节点向周围 k 个邻节点发送分组需要 k 次发送。Pedro 等人^[14]指出,无线网中的最小开销树并非基于最小边开销的 Steiner 树,而是总发送次数最少的树,他同时指出,求解无线网中的最小开销树同样是一个 NP-完全问题。

图1所示为有线网和无线网中最小开销树的比较。节点 S 为源节点,节点 D 、 E 为目的节点, SA 、 AC 、 CD 、 CE 、 BD 、 BE 的边开销均为 1, SB 的边开销为 3, 节点 A 和 B 均在节点 S 的一跳范围之内, 节点 D 和 E 也均在节点 B 的一跳范围之内。假如在有线网中,选择的转发节点是边开销总和最小的路径上的节点,如图所示应为 S - A - C - DE , 总的边开销为 3。假如在无线网中,节点是广播方式发送分组,只要在通信范围的节点均可接收,由于节点 B 在节点 S 的一跳范围之内, 节点 D 和节点 E 的一跳范围之内, 因此, 尽管从边开销距离上来说, S - B - DE 更远, 但是因为其总的转发次数最少, 所以是无线网中的最小开销树。

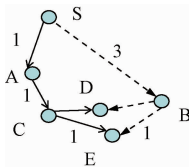


图1 有线网和无线网中最小开销树的比较

Fig.1 Comparison of minimum cost tree in wired and wireless networks

本文充分考虑了节点本身具有广播特性,采用启发

式方法提出具有最少转发节点的组播路由树算法 (minimum forwarding nodes routing tree algorithm, MFRTA),并结合实际给出了更具实用价值的分布式实现方法,最后在基于转发网的 ODMRP^[15] 中采用 MFRTA 进行了仿真比较。在能量资源特别紧缺的应急状况下,最小转发次数的组播路由树算法将能大大延长网络总体工作时间。

2 问题的数学描述

假设 Ad Hoc 网络为一个无向图 $G(V, E)$, V 表示所有顶点的集合, E 表示所有边的集合;网络是一个二维网络(每个节点 $v \in V$ 都在平面内),移动节点用图中顶点表示,节点的发送范围为 r ;两顶点 $v_1, v_2 \in V$ 之间的距离为 $dist(v_1, v_2)$,若 $dist(v_1, v_2) \leq r$,则两顶点 $v_1, v_2 \in V$ 间的边存在, v_1 和 v_2 可直接通信;信道是双向信道,若有 $v_1, v_2 \in E$,则有 $v_2, v_1 \in E$ 。

定义1 对于给定的无向图 $G(V, E)$,源节点 $s \in V$,接收机集合 $R \subset V$,定义 T 是 G 中所有连接源节点 s 和每个接收机 $r_i \in R$ 的可能组播树的集合。假设组播树 $t \in T$ 里所有中继节点(包含每个非叶节点)的集合用 F_t 表示,对于每个树 $t \in T$,定义函数 $C_t: T \rightarrow \mathbb{Z}^+$, $C_t(t)$ 是该树的源节点向每个接收机交付消息时需要的总发送次数。

定理1 对于上述定义的组播树 $t \in T$, $C_t(t) = 1 + |F_t|$ 。

证明:根据定义,对于源节点 s 发送的消息,中继节点只转发 1 次,此外,叶节点不转发消息,因此总发送次数应该是源节点与中继节点发送次数的总和,即 $1 + |F_t|$ 。

问题的数学描述:对于给定的无向图 $G(V, E)$,源节点 $s \in V$,接收机集合 $R \subset V$,假设 $V' = R \cup \{s\}$,且 $V' \subseteq V$,希望能找到满足以下两个条件的组播树 $T^* \subset G; T^* \supseteq V'$,且 $C_t(T^*)$ 最小。

由此可以看出,为了使 $C_t(t)$ 最小化,必须减少转发节点的个数 $|F_t|$,尽量使得叶节点的个数最大。

3 最少转发节点的组播路由树算法

为了尽量使叶节点个数最大, MFRTA 首先根据所有相关节点与源节点之间的跳数,将最短路由树分成 N 层,从距离源节点为 $N-1$ 的节点层开始选举,选取覆盖第 N 层节点数最多的节点作为转发节点,以此类推,一直找到源节点一跳范围内的转发节点。最短路由树指源节点与所有目的节点之间的所有最短路由边组成的拓扑矩阵。

3.1 构建最短路由树

传统的 Dijkstra 算法可在已知全网拓扑时获得某节点到所有节点的最短路径,但只能获取一条最短路径,因此,需要对其进行修改,以得到源节点与所有目的节点之间的所有最短路径。

定义2 距离源节点 s 跳数为 i 的节点集合为 H_i , 目的节点 d 集合为 D , $d \in D$, d 与 s 之间的最小跳数为 h_{dmin} 。第 $i+1$ 跳的临时节点集合为 T_{i+1} , 记录 T_i 中某节点 x 的下一跳节点集合, $T_{i+1} = N_D^+(x_i) \cap H_{i+1}$ 。最短路由树形图序列为 P , 每一目的节点的最短路由树图序列为 P_d , 临时树形图序列 Q 、 X 。

构建最短路由树的算法如下。

1) 利用 Dijkstra 算法求出每个 d 与 s 之间的最小跳数 h_{dmin} , 根据跳数 i 将 D 划分为不同子集 H_i 。

2) 依次寻找到每个目的节点的所有最短路由树 P_d 。

对每个 $d \in D$, 循环如下进程。

初始化: $P_d = s$, $Q = s$, $T_1 = H_1$;

执行循环进程 $C(s, Q, T_1)$:

$C(x, Q, T_i)$:

if $T_i \neq \emptyset$

$y \in T_i$; if $y = d$, $Q = Q + (x, y)$; $P_d = P_d + Q$; return;

if $(y \neq d) \& (i = h_{dmin})$, $T_i = T_i - \{y\}$;

if $(y \neq d) \& (i \leq h_{dmin})$,

$X = Q + (x, y)$; $T_{i+1} = N_D^+(y) \cap H_{i+1}$;

if $T_{i+1} \neq \emptyset$, execute $C(y, X, T_{i+1})$;

$T_i = T_i - \{y\}$;

else

return;

3) 所有目的节点的 P_d 之和即为最短路由树 P , $P = \bigcup_d P_d$ 。

上述最短路由树生成算法中, Q 表示源节点 s 与节点 x 之间已记录的最短路由树, $C(s, Q, T_i)$ 完成从节点 x 到其下一跳节点集合 T_i 的搜索, 若 T_i 中有目的节点, 则将经过路由记录在 P_d 中, 否则, 将继续逐跳搜索直到满足最小跳数。

3.2 最少转发节点路由树算法 (MFRTA)

定义3 转发节点集合 MF , 节点 v 覆盖的接收机集合为 $Cov(v)$, 距离源节点跳数为 i 的节点组成的集合为 V_i , \max 表示距离源节点的最大跳数, T 表示临时集合。

为使得叶节点个数最多, MFRTA 从距离源节点最远的叶节点开始选择转发节点。首先从 $V_{\max-1}$ 中找出覆盖 V_{\max} 最多的节点 v , $v \leftarrow \operatorname{argmax}_{v \in V} (|Cov(v)|)$, 将该节点放入转发集合 MF , $MF \leftarrow MF + \{v\}$, 将已覆盖的节点从 V_{\max} 中删除, $V_{\max} \leftarrow V_{\max} - Cov(v)$; 然后查看 V_{\max} 中其余未被覆盖的叶节点, 继续选择它们的上游转发节点。为

便于查找, 避免重复计算覆盖节点数, 查看其余叶节点之前, 需要对原有最短路由树进行调整, 从 $V_{\max-1}$ 的未处理节点集合 T 中删除其中每个节点 k 与节点 v 重复覆盖的部分, $Cov(k) \leftarrow Cov(k) - (Cov(v) \cap Cov(k))$, 并删除集合 T 中既非组播接收节点又非转发节点的中间节点 k , $V_{\max-1} \leftarrow V_{\max-1} - \{k\}$ 。该过程重复进行, 直到找出 V_{\max} 中所有节点的上游转发节点, $V_{\max} \neq \emptyset$ 。依此过程, 继续从 $V_{\max-2}$ 中寻找 $V_{\max-1}$ 所有节点的上游转发节点, 直至源节点的一跳范围。

具体算法如下:

1) 以组播源节点为根, 目的节点为叶, 根据最短路由树中节点与源节点之间的最小跳数, 将树中节点分成若干个集合, $V_1, V_2, \dots, V_{\max}$;

2) 初始化, $i = \max - 1$, $MF = \emptyset$, $T = \emptyset$;

3) $T \leftarrow V_i$;

if $V_{i+1} \neq \emptyset$, repeat

$(v \leftarrow \operatorname{argmax}_{v \in T} (|Cov(v)|); MF \leftarrow MF + \{v\}$;

$V_{i+1} \leftarrow V_{i+1} - Cov(v); T \leftarrow T - (v)$;

if $T \neq \emptyset$, repeat

(for $k \in T$

$(Cov(k) \leftarrow Cov(k) - (Cov(v) \cap Cov(k)))$;

if $(Cov(k) = \emptyset) \& (k \notin R)$

$(V_i \leftarrow V_i - (k); T \leftarrow T - (k))$;

}

}

}

4) $i \leftarrow i - 1$, 如果 $i \neq 0$, 重复过程3);

5) S 如果 $i = 0$, 则直接读取源节点到 V_1 中的路由, 完成查找。

证明: 组播源节点和组播接收节点构建的是最短路由树, 每个叶节点代表一个组播接收节点, 中间节点可能是接收节点, 也可能不是。算法从最底层的叶节点开始, 每次在同一层中选取覆盖叶节点最多的节点作为转发节点, 同时删除其它不必要的中间节点, 这保证进行各层覆盖选举时, 被覆盖的节点全部由组播接收节点或者必要转发节点(指已选举出的覆盖其它组播接收节点的节点)组成。因此, 各层都将选取覆盖叶节点个数最多的节点作为转发节点, 最终转发集合的节点总数最少。根据定理1, 该算法的转发次数最少, 带宽开销最少。

3.3 举例分析

MFRTA 算法分析1和2如图2、3所示。图2(a)为某网络组播源节点和接收节点组成的最短路由树, 源节点为S, 目的节点为A、F、G、H、L、M、N, 求具有最少转发节点的组播路由树。

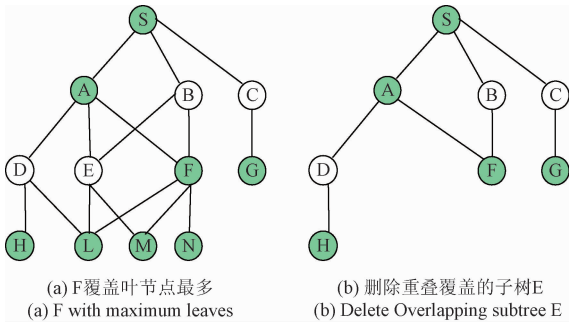


图2 MFRTA 算法举例分析 1
Fig. 2 Example analysis of MFRTA 1

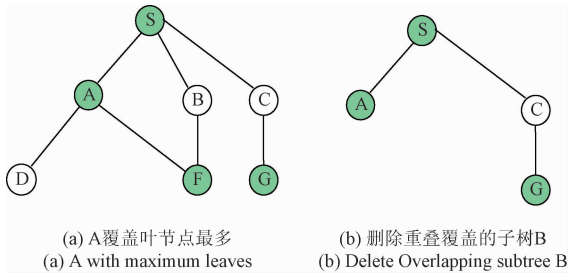


图3 MFRTA 算法举例分析 2
Fig. 3 Example analysis of MFRTA 2

由图2可知,组播接收机和中间的节点可分为3类, $V_1 = \{A, B, C\}$, $V_2 = \{D, E, F, G\}$, $V_3 = \{H, L, M, N\}$ 。初始化 $MF = \emptyset$, $T = \emptyset$ 。

1) $T = V_2 = \{D, E, F, G\}$, 从 T 里面寻找覆盖最多 V_3 节点数的节点 $Cov(F) = 3$, 因此 $MF = \{F\}$, $V_3 = V_3 - Cov(F) = \{H\}$, $T = T - \{F\} = \{D, E, G\}$ 。

2) 调整最短路由树结构, 删除 $Cov(D)$ 、 $Cov(E)$ 、 $Cov(G)$ 与 $Cov(F)$ 重叠覆盖的部分。删除后 $Cov(D) = \{H\}$, $Cov(E) = \emptyset$, $Cov(G) = \emptyset$, 因此需要对节点 E, G 进行判断, 由于节点 E 不是组播接收机, 故要从 V_2 中删除, $V_2 = V_2 - \{F\} = \{D, E, G\}$, 同时 $T = T - \{E\} = \{D, G\}$, 如图2(b)所示。

3) 由于 $V_3 = \{H\} \neq \emptyset$, 故需要继续在 T 寻找覆盖最多 V_3 节点数的节点, $Cov(D) = 1$ 最大, 故 $MF = MF + \{F\} = \{D, F\}$, $V_3 = \emptyset$, $T = \{G\}$ 。

4) 因为 $V_3 = \emptyset$, 重新执行算法的步骤4)。令 $T = V_1 = \{A, B, C\}$, 从 T 里寻找覆盖最多 V_2 节点数的节点, 如图3(a)所示。由于 $Cov(A) = 2$ 最大, 因此, $MF = MF + \{A\} = \{A, D, F\}$, $V_2 = V_2 - Cov(A) = \{G\}$, $T = T - \{A\} = \{B, C\}$ 。

5) 调整最短路由树的结构, 删除 $Cov(B)$ 、 $Cov(C)$ 与 $Cov(A)$ 重叠覆盖的部分。删除后 $Cov(B) = \emptyset$, $Cov(C) = \{G\}$, 因为节点 B 不是组播接收机, 故从

V_1 中删除, $V_1 = V_1 - \{B\} = \{A, C\}$, $T = T - \{B\} = \{A, C\}$, 如图3(b)所示。

6) 由于 $V_2 = \{G\} \neq \emptyset$, 故需要继续在 T 寻找覆盖最多 V_2 节点数的节点。由于 $Cov(C) = 1$ 最大, 因此 $MF = MF + \{C\} = \{A, C, D, F\}$, $V_2 = \emptyset$, $T = \{B\}$ 。

7) 因为 $V_2 = \emptyset$, $V_1 = \{A, C\}$ 都在源节点 S 一跳范围内, 停止搜索, 最终转发节点 $MF = \{A, C, D, F\}$ 。

根据 MFRTA 算法构建的具有最小开销的组播路由树如图4所示, 源节点发送后, 由节点 A、C 分别转发, 再由节点 D、F 分别转发, 总共只需要发送4次。网络中的节点也被分成4类, 分别是组播源节点、组播接收机、单纯转发节点、既是转发节点又是组播接收机的节点。

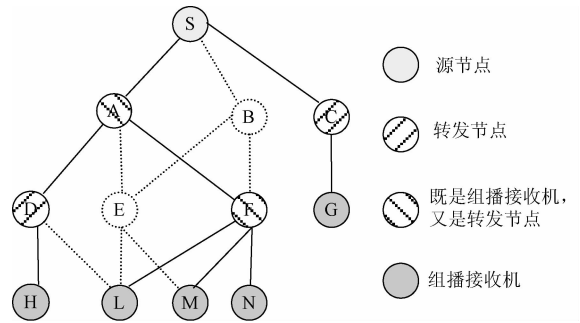


图4 根据 MFRTA 构建的最小开销组播路由树
Fig. 4 Construction of minimum cost multicast tree by MFRTA

在已知网络拓扑或者最短路由组播树的情况下, 此算法能很快找出适用于无线网特点的具有最小开销的组播树。

4 分布式实现方法

上述算法需要事先了解全网拓扑, 有些情况下无法满足这一前提条件, 因此研究此算法的分布式实现方法更有现实意义。分布式算法主要包括两个过程: 源节点向全网泛洪加入询问、组播接收机选择最优组播树进行应答。

定义4 源节点为 s , 目的接收机集合 D , 转发节点集合 MF , 一跳邻节点集合 N , 节点 x 覆盖的接收机个数为 $n_{cov(x)}$ 。

MFRTA 的具体分布式实现步骤如下:

- 1) s 全网泛洪加入询问 (join query, JQUE) 分组;
- 2) 节点 d 若希望加入 D 或者 $d \in MF$, 则向 N 发送加入请求 (join request, JREQ) 分组, 分组中包含希望加入的组播组 ID;
- 3) 每个 $x \in N, x \neq s$ 向 d 返回加入应答 (join reply, JREP) 分组, 分组中包含 $n_{cov(x)}$, 若 $x = s$, 则在分组中指示停止查找, d 停止执行程序;

4) 发送 JREQ 分组的节点若同时收到其他节点发送的关于该组的 JREQ 分组, 表示自己并非叶节点, 将等待足够长的时间 T , 否则表示自己是叶节点, 选取满足 $\max\{n_{cov(x)}\}$ 的 x , 向其发送加入激活 (join activation, JACT) 分组;

5) x 收到 JACT 分组后, $MF \leftarrow MF + \{x\}$, 重复步骤 2)。

以图 3 为例, 通过分布式方法找出源节点 S 和各组组播接收机之间具有最少转发节点的组播路由树。首先源节点 S 向全网泛洪发送包含组播组 ID 的 JQUE, 分组将经过所有可能路径到达各接收节点。组播接收节点 $\{A, F, G, H, L, M, N\}$ 收到 JQUE 后, 向一跳之内的邻节点发送 JREQ 分组。节点 A、F 同时收到 JREQ, 知道自己不是叶节点, 将等待一段时间重新寻找。邻节点记录请求接收机的个数, 并封装在 JREP 分组中发送给请求的组播接收节点。图 3 中 $n_{cov(D)} = 2, n_{cov(E)} = 2, n_{cov(F)} = 3, n_{cov(C)} = 1$, 因此, 接收节点 L、M、N 将选择节点 F 作为自己的转发节点, 而接收节点 H、G 将分别选择节点 D、C 作为转发节点。收到多个 JACT 分组的节点 F 只要设置一次转发功能即可。节点 D、F 继续向一跳之内的邻节点 A、B 发送 JQUE 分组, 重复上述过程, 一直找到源节点完成整个转发节点的指定过程。需要说明的是, 虽然节点 E 也是组播路由树的一部分, 但它并没有被指定为转发节点, 在第一次查找中被淘汰, 因此它无权向节点 A、B 发送 JQUE, 节点 A 只能收到节点 D、F 的 JQUE, 节点 B 只能收到节点 F 的 JQUE。

利用该实现方式, 节点不需要知道全网的拓扑信息, 通过简单的路由请求和应答就能得到具有最少转发节点的组播路由树, 减少组播发送次数, 节约带宽资源。但由于某些节点既是组播接收机, 又是转发节点, 若跳数相差太远, 可能会出现接收机覆盖数目不准确的情况, 因此, 该实现方法仅是 MFRTA 的一种简化逼近方法。

5 数值结果

为验证分布式算法的性能, 借鉴 NIST 路由协议仿真模型, 使用 OPNET 比较该算法对 ODMRP 性能的改进, 主要研究转发节点个数及总发送开销随接收成员个数变化的情况, 此外研究该算法在节点不同移动速度下的分组递交率。

在目前已提出的组播路由协议中, ODMRP 的综合性能更优秀。图 5 所示是 ODMRP 按需入网、路由发现的过程。由于无线节点的广播特性, 转发节点之间可以形成转发网, 转发网可在组播源与组成员之间提供多条冗余路径, 即使在两次维护期间某条链路断裂, 分组也可通过其他路径发送。该协议的组播源节点周期性建立、维

护转发网, 保证较高的分组递交率, 节点移动时协议稳健性好, 简单易行。但是从网络总开销的角度考虑, 冗余的转发网将导致过多的发送次数。

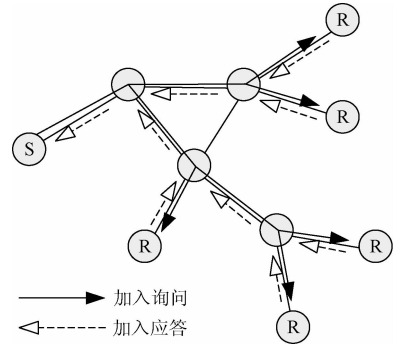


图 5 组成员按需建立和维护过程
Fig. 5 Process of on-demand group establishing and group maintaining

无线信道的仿真不考虑地形因素影响, 采用全向天线, 自由空间传输模型和随机移动模型, MAC 层采用带确认的 CSMA/CA 协议。仿真场景大小为 $1\ 000\text{ m} \times 1\ 000\text{ m}$, 组播源个数为 1, 接收成员个数为 2、5、10、15、20、30, 节点移动速度为 2 m/s 。节点通信范围 250 m , 通信链路容量 2 Mbps , 组播源节点的以 10 pkt/s 产生 CBR 组播业务大小为 512 byte , 仿真时间 600 s 。

ODMRP 采用 MFRTA 前后的转发节点个数比较, 如图 6 所示。ODMRP 选择源节点与各接收成员之间的最短路径作为转发路径, 转发路径间没有直接联系, 因此会指定较多的转发节点。采用 MFRTA 后, 协议的转发节点数减少, 尤其接收成员较多时, 减少量更为明显, 带宽效率更高。

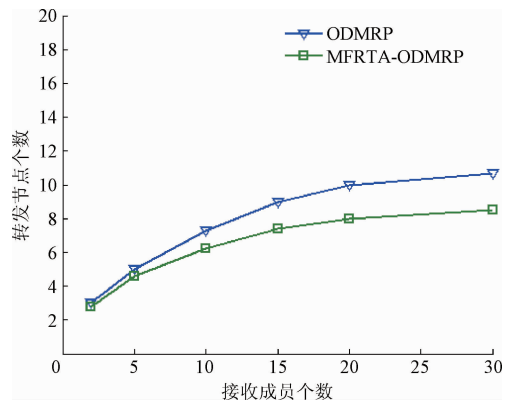


图 6 转发节点个数-接收成员个数
Fig. 6 Numbers of forwarding nodes and numbers of receivers

ODMRP 采用 MFRTA 前后总发送次数的比较, 如图 7 所示, 具体为每个更新周期内的总发送次数, 包括数据分组与控制分组发送次数之和。接收成员数较少时, 转

发节点数基本未减少,却增加了控制分组,因此总发送次数还高于未使用算法的情况。但随着接收成员个数的增加,转发节点数减少将大大降低数据发送次数,而且,业务发送速率越大,发送的数据包个数越多,总发送次数减少的越多。

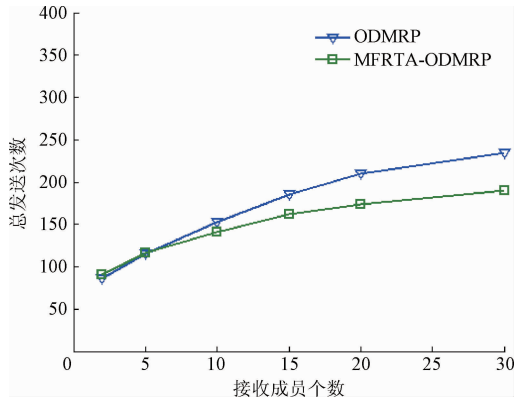


图 7 总发送次数-接收成员个数

Fig.7 Numbers of total transmission and numbers of receiver

ODMRP 采用 MFRTA 前后分组递交率随节点移动速度的变化,如图 8 所示。调整节点的移动速度分别为 2、5、8、16 m/s 分组递交率,成员数为 20 个。从图中可以看出,无论是否采用 MFRTA 算法,ODMRP 均保持较高的分组递交率,可达 90% 以上。但是,由于采用了 MFRTA 算法,原有 ODMRP 带有冗余节点的转发网变成了基于最小开销的转发树,因此,在节点移动速度较低时,可以保持较高的分组递交率。当节点移动速度提高时,不如转发网稳健,分组递交率下降,需要加大树建立的频率。

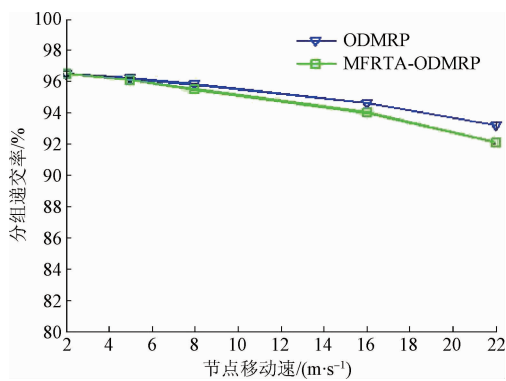


图 8 分组递交率-节点移动速度

Fig.8 Packet delivery rate and node mobility speed

6 结 论

由于无线信道具有广播特性,无线网中的最小开销

树并非基于最小边开销的 Steiner 树,而是具有最少发送次数的路由树。为了能在节点能量资源十分紧缺的应急情况下,尽量减少组播发送占用的无线带宽,论文提出一种基于网络拓扑信息的、具有最少转发节点的组播路由树生成算法,该算法利用广播子树删除思想,基于最短路由树生成网络的最小开销树。论文对该算法进行了证明和详细分析,并针对实际需要,给出使用范围更广泛的分布式实现方法。仿真分析说明,算法的分布式实现方法可减少 ODMRP 的转发节点数,大大降低数据发送次数,接收成员节点较多时尤为明显。

参考文献

- [1] JENNIFER Y, BISWANATH M, DIPAK G. Wireless sensor network survey [J]. Computer Networks, 2008, 52(12):2292-2330.
- [2] YU W, FAN L. Vehicular Ad Hoc Networks. Guide to Wireless Ad Hoc Networks; Part of the Series Computer Communications and Networks [M]. Berlin: Springer, 2009; 503-525.
- [3] HERMANN K. Internet of Things. Real-Time Systems; Part of the series Real-Time Systems Series [M]. Berlin: Springer, 2011; 307-323.
- [4] PARIMALA G. Proactive, reactive and hybrid multicast routing protocols for wireless mesh networks [C]. Computational Intelligence and Computing Research (ICCIC), 2013; 1-7.
- [5] THOMAS K. Multicast Versus Broadcast in a MANET. Ad-Hoc, Mobile, and Wireless Networks Volume 3158 of the Series Lecture Notes in Computer Science [M]. Berlin: Springer, 2004; 14-27.
- [6] BOMMAIAH M, TALPADE B L. Ad Hoc multicast routing protocol [C]. Internet Draft, 1998; 1-23.
- [7] JI L S, CORSON M S. Differential destination multicast: A MANET multicast routing protocol for small groups [C]. Proceedings of INFOCOM, 2001; 1192-1202.
- [8] 段国建, 郝洁, 姚郑, 等. 基于自适应能量阈值的按需节能组播路由协议 [J]. 中国科学院大学学报, 2014, 31(2):276-283.
DUAN G J, HAO J, YAO ZH, et al. An adaptive-energy-threshold-based energy-efficient on-demand multicast routing protocol [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2014, 31(2):276-283.
- [9] 魏振春, 高超, 田一鸣, 等. 基于关键节点备份的多路径可靠路由协议 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(10):968-974.
WEI ZH CH, GAO CH, TIAN Y M, et al. Multi-path reliable routing protocol based on backup key nodes [J].

Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(10): 968-974.

[10] 陆亚芳, 易可夫, 冯绪, 等. 基于模糊理论的无线传感器网络多层分簇式路由算法[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7):933-938.

LU Y F, YU K F, FENG X, et al. Efficient multi-layer routing protocol for wireless sensor networks through fuzzy logic based clustering mechanism [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2014, 27(7):933-938.

[11] 马学森, 曹政. 改进蚁群算法的无线传感器网络路由优化与路径恢复算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(9): 1320-1327.

MA X S, CAO ZH. Routing optimization and path recovery algorithm in wireless sensor network based on improved ant colony algorithm [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29 (9): 1320-1327.

[12] 吕红芳, 张浩. 链首节点轮换的无线传感器网络路由算法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(7): 610-616.

LV H F, ZHANG H. Research on wireless sensor network routing algorithm based on leader-node alternation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2013, 27(7): 610-616.

[13] 刘春, 金哲媛. 环境监测中无线传感器网络路由算法的

改进[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(2):146-151.

LIU CH, JIN ZH Y. Improvement of routing algorithm for wireless sensor network in environmental monitoring [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2014, 28(2):146-151.

[14] PEDRO M R, ANTONIO F. Gomez-Skarmeta, Heuristic Algorithms for Minimum Bandwidth Consumption Multicast Routing in Wireless Mesh Networks, Ad-Hoc Networks and Wireless [M]. Berlin: Springer, 2005: 258-270.

[15] MOHAMMAD A K, HAMID S A, ALBERT Y Z. On-demand multicast routing protocol with efficient route discovery [J]. Journal of Network and Computer Applications, 2012, 35(3):942-950.

作者简介



印敏,1978 年出生,讲师。分别在 2000 年、2003 年和 2006 年于解放军理工大学获得学士学位、硕士学位和博士学位,主要研究方向为无线传感器网络。

E-mail:10290702@qq.com

Yin Min was born in 1978, lecturer. She received B. Sc. , M. Sc. and Ph. D. all from PLA University of Science and Technology (PLAUST) in 2000, 2003 and 2006, respectively. Her resent research interest includes wireless sensor network.