

Anycast Routing Algorithm for Wireless Sensor Networks Based on Zone-Disjoint Scheme *

GU Yunli^{1,2}, QIAN Huanyan^{2*}, XU Xin¹, DU Jie¹

(1. Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China;
2. School of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Anycast technique can significantly balance data flow and energy consumption in Wireless Sensor Networks (WSN). Most previous research works adopt path-disjoint or node-disjoint scheme to search anycast paths, but it cannot solve the transmission collision problem caused by the hidden terminal problem, thus bring much extra retransmission energy consumption. For this problem, an anycast routing algorithm for WSN based on zone-disjoint scheme is proposed (ZDAR). In the algorithm, we select anycast paths one by one in order of their neighbor nodes' impact factors (the degree that the neighbor nodes participate in other anycast paths) and ensure that the paths will not collide with each other, in contrast to zone-disjoint routing algorithms based on shortest path first (SPF) scheme, ZDAR algorithm can find more zone-disjoint anycast paths. In comparison with node-disjoint scheme and zone-disjoint routing scheme based on SPF, simulation results show that the performance of ZDAR algorithm is better in term of the composite indicator about both total energy consumption and energy balance, thus improving the network lifetime.

Key words: wireless sensor networks; anycast; zone-disjoint; routing algorithm

EEACC: 6150P

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2012.011.025

基于区域不相交策略的无线传感器网络任播路由算法 *

顾云丽^{1,2}, 钱焕延^{2*}, 徐 昕¹, 杜 杰¹

(1. 南京信息工程大学, 江苏省网络监控中心, 南京 210044; 2. 南京理工大学计算机科学与技术学院, 南京 210094)

摘 要: 任播技术应用在无线传感器网络 (WSN) 中可以均衡数据流和能耗。以往算法在寻找任播路径时多采用路径或节点不相交路由策略, 该策略无法解决因隐终端问题造成的传递碰撞问题, 导致额外的大量重传能耗。针对以上问题, 提出一种基于区域不相交策略的 WSN 任播路由算法 (ZDAR), 该算法根据各路径的邻居节点影响因子 (邻居节点参与其他任播路径的度) 依次选择无传递碰撞问题的任播路径, 相比较最短路径优先选择策略, ZDAR 算法能够寻找到更多数量的区域不相交任播路径。仿真结果表明证明相比较节点不相交路由策略和最短路径优先区域不相交路由策略, ZDAR 算法的系统能耗和能耗均衡的综合指标具有较好的性能优势, 从而提高网络生存期。

关键词: 无线传感器网络; 任播; 区域不相交; 路由算法

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2012)11-1607-06

无线传感器网络 WSN (Wireless Sensor Networks) 节点的工作依赖于有限电源 (电池), 因此 WSN 的生存期是一个关键参数^[1]。随着 WSN 规模增大, 在单基站 (或称 Sink) WSN 中节点汇报其监测数据分组至基站的能耗越来越高, 解决办法之一是增加基站的数目并引入任播技术。任播是 IPv6 提供的一种新型网络服务, 指一个发送者和通信组中

的任意一个之间的通信。本文标记: A 为某任播地址; $G(A)$ 为共享 A 的任播组员集合 (即基站集合), 共有 N 个组员; A_i 为 $G(A)$ 中第 i 个组员; U 为传感器节点集合, 共有 M 个节点。

在多基站 WSN 采用任播技术, 节点可以将分组传递给任一任播组员 (即基站) 处, 从而避免部分节点能量消耗过快导致网络生存期过短。由于任播技

术具有能够均衡数据流和能耗的特点,可以较好地应用在 WSN 路由中,如 Wang^[2]采用一种编码任播数据分组传输机制,分析 WSN 中节点睡眠概率和链路失效概率对数据分组传递的影响,有效地提高数据传输可靠性并减少时延;Kim 等^[3-4]学者讨论在 MAC 层如何最优控制候选的下一站节点的睡眠和唤醒时间以及任播的优先策略,优化端对端任播时延。Hou^[5]等人将 WSN 体系结构分为两层,各节点选择相应最优基站并按照给定的一连串的操作程序任播数据流。以上文献的一个核心思想是采用多路径任播路由来均衡能耗。为了真正能够均衡能耗,有学者在选择各任播路径时采用节点不相交(Node-Disjoint)策略^[6],但由于无线传递的 WBA(wireless broadcast advantage)特性,节点不相交路由策略仍然不能避免传递碰撞问题,导致额外的大量重传能耗。针对上述问题,本文提出一种基于邻居节点影响因子的区域不相交 WSN 任播路由算法,该算法能避免任播路径之间传递碰撞问题,从而减少重传能耗,而且由于任播技术的应用,系统能耗可以更均衡。

1 问题的提出与解决

不相交路径通常分为链路不相交路径和节点不相交路径两种。链路不相交路径是指路径中不存在一条共用的路径。如图 1 中路径 $P_1 = S - n_{11} - n_{12} - n_{18} - n_{19} - n_{20} - A_4$ 和路径 $P_2 = S - n_6 - n_{12} - n_{18} - n_{25} - A_5$ 即彼此链路不相交路径。链路不相交路径可以将数据流分布在多条独立路径上,达到均衡负载的目的,但该策略仍然不能保证好的性能,如 P_1 和 P_2 在共同的节点 n_{18} 处会出现拥塞现象,而且在 WSN 中,节点 n_{18} 承担两条路径的数据接收与传递任务,能耗较快,不能达到均衡能耗的目的,导致网络生存期过短(本文定义网络生存期为到第一个节点失效的时间)。

节点不相交路径是指除源节点与目标节点以往路径中不存在共同的节点,如路径 $P_3 = S - n_1 - n_2 - n_3 - n_4 - n_5 - A_1$ 和路径 $P_4 = S - n_6 - n_7 - n_8 - n_9 - n_{10} - A_2$ 就是彼此节点不相交路径。无线传递多采用 CSMA/CD(Carrier Sense Multiple Access/Collision Detect)协议,该方法可以协调相邻节点的传递,但却不能解决隐终端问题造成的碰撞问题。如图 1 中,节点 n_2 的覆盖范围不包括节点 n_6 ,因此 n_2 无法察觉到 n_6 的分组发送行为 $n_6 \rightarrow n_7$,一旦 n_2 向 n_3 发送分组,就会在节点 n_7 处传递碰撞。由此可知, P_3 的 $n_2 \rightarrow n_3$ 与 P_4 的 $n_6 \rightarrow n_7$ 会彼此传递碰撞。因此,即使彼此节点不相交的路径也可能会出现严重的传递碰撞现象,导致能耗和时延增加。

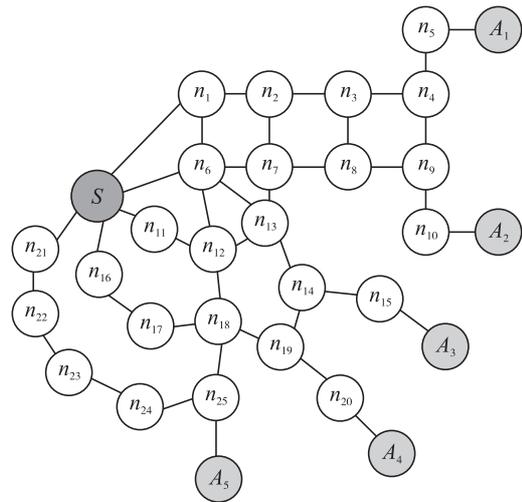


图 1 链路不相交和节点不相交路径示意图

解决隐终端问题的一个常见方法是 RTS/CTS 握手技术,但 RTS/CTS 机制仍然无法彻底消除碰撞的可能性(RTS 帧导致的碰撞),而且响应报文 CTS 甚至会扩大传递碰撞范围。如图 1 中, n_6 为响应 P_3 中 n_1 的 RTS,需返回 CTS,但由于广播机制该 CTS 也会到达 n_{12} 和 n_{13} ,由此导致 P_3 与 $P_5 = S - n_{11} - n_{12} - n_{13} - n_{14} - n_{15} - A_3$ 等任播路径传递碰撞。还有,RTS/CTS 机制给 WSN 带来的额外开销很大,其在 WSN 的适用性并不是太好^[7],Bicket^[8]等人证明 RTS/CTS 机制增加 WSN 的代价,却没有明显增加网络效率。基于以上原因,本文没有采用 RTS/CTS 机制。

由此可见,为避免传递碰撞及其导致的重传能耗,在选择任播路径时,除需满足各任播路径节点不相交以外,还需保证传递过程中各任播路径彼此之间不会因隐终端问题出现传递碰撞现象,称之为区域不相交(Zone-Disjoint)路径^[9-10]。区域不相交概念在文献[9-10]中虽提出但没有给出严格的定义,在文献[11]中也采用类似概念但却取名为 radio-disjoint,结合本文的设定(不采用 RTS/CTS 机制,采用无 Hello 消息机制^[12]),本文给出一个数学定义,如下所示。

定义 1 区域不相交路径

设任播路径 $P = S - n_1 - n_2 - \dots - n_k - A_h$;任播路径 $Q = S - m_1 - m_2 - \dots - m_l - A_r$; P 的中间节点集合(包括目标节点即基站)表示为 $M(P)$;节点 n_1 的邻居节点集合表示为 $N(n_1)$,路径 P 的邻居节点集合 $N(P) = \{N(n_i) \mid n_i \in P\}$ 。本文没有采用 RTS/CTS 机制,采用无 Hello 消息机制,则 P 和 Q 彼此区域不相交需满足以下条件:

- (1) $M(P) \cap M(Q) = \phi$;
- (2) $(N(P) \cap M(Q) = \phi) \&\& (N(Q) \cap M(P) = \phi)$ 。

也有学者采用定向天线(directional antenna)来处理区域相交问题^[13],但由于定向天线的安装和调整难度比较大,在 WSN 中多采用全向天线(omnidirectional antenna)技术。关于全向天线区域不相交路径的研究文献目前还比较少,在文献[14]中,作者的算法思想是每次通过 Dijkstra 算法找到当前全局最短路径作为目标,在拓扑结构图中删除该路径所有中间节点及其邻居节点,再继续寻找最短路径作为目标,该算法简单易于操作,但用来寻找区域不相交路径可能并不理想(本文优化目标为区域不相交任播路径数目最大化)。在图 1 中,该算法首先选择的最短任播路径为 $S-n_6-n_{12}-n_{18}-n_{25}-A_5$,去除该路径及其所有邻居节点,此时已无其他区域不相交任播路径到达 $G(A)$ 。Wang^[15]针对区域不相交路径问题提出一种最外围最短路径优先算法,该算法每次寻找拓扑结构图中最外围最短路径作为目标,算法思想相比较前者有所改进,但是效果有时也并不理想。在图 2 中,一旦首先选择最外围最短路径 $S-n_1-n_2-n_3-n_4-A_1$,此时已无其他区域不相交任播路径到达 $G(A)$ 。由此可知,最短路径优先(Shortest Path First, SPF)和最外围最短路径优先策略在寻找区域不相交路径时算法效果有时并不太理想。究其原因这是由于采取区域不相交策略,每选取一条路径作为目标路径后,该路径所有目标节点、中间节点及其邻居节点都不能再被使用,需从拓扑结构图中删去,从而大量的候选任播路径消失,之后的选择面将大大降低,甚至很快就会出现无候选路径的情况。因此较好的算法思想是每一次选择都尽可能降低该选择对拓扑结构的破坏,尽量保留更多的节点留在拓扑结构图中,增加随后的选择面,从而最终增加区域不相交路径的最大数量。上述两种算法虽然简便易操作,但最短路径或最外围最短路径优先策略并不一定意味着其对拓扑结构的破坏是最小,所以算法效果如前文所述并不一定理想。

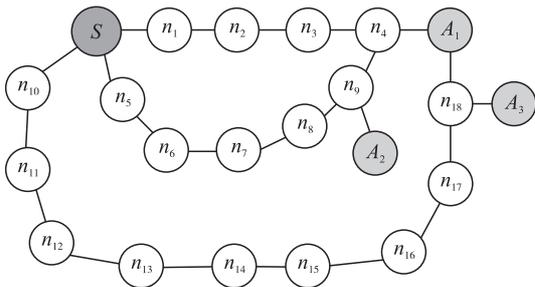


图 2 最外围最短路径优先选择算法示意图

基于上述分析思想,本文提出一种基于邻居节点影响因子的区域不相交 WSN 任播路由算法(ZDAR)。

定义 2 邻居节点影响因子 F

设任播路径 $P=S-n_1-n_2-\dots-n_s-A_h$,除 P 外拓扑结构图中还存在 P_1, P_2, \dots, P_k 共 k 条任播路径。设节点 n_i 的邻居节点集合 $N(n_i)=\{m_1, m_2, \dots, m_l\}$,则节点 n_i 的邻居节点影响因子 $F(n_i)$ 计算如下:

$$F(n_i) = \sum_{j=1}^k \sum_{i=1}^l f(m_i, P_j) \quad (1)$$

其中, $f(m_i, P_j)$ 是一个布尔变量。当 $m_i \in P_j$, 其值为 1; 反之, 其值为 0。

P 的邻居节点影响因子表示为 $F(P)$, 计算如下:

$$F(P) = F(A_h) + \sum_{i=1}^s F(n_i) \quad (2)$$

由邻居节点影响因子的定义可知, 有两方面因素会影响其值, 一方面是路径的跳数(跳数越大, 中间节点越多, 路径周围邻居节点数越多), 另外一方面是路径周围邻居节点参与其他任播路径的度。

ZDAR 算法思想为: 每次选择邻居节点影响因子最小的路径作为目标路径, 选择后在拓扑结构图中删除该路径目标节点、中间节点及其所有邻居节点, 再进行下一轮的选择, 直至无任何备选路径可供选择。显然, 选择 F 值为 0 的任播路径作为目标, 对拓扑结构毫无破坏; 而选择 F 值较小的任播路径作为目标, 可减少其对拓扑结构的破坏。

ZDAR 算法的本质是在路径选择时既考虑路径跳数又考虑路径中间节点的周围邻居节点的参与其他任播路径的情况, 相比较 SPF 算法只考虑路径跳数, ZDAR 算法考虑相比较全面, 优化结果则相对更好。如图 1 中, 设路由查找共找到 10 条备选任播路径, 分别如下所示:

$$\begin{aligned} P_1 &= S-n_1-n_2-n_3-n_4-n_5-A_1; \\ P_2 &= S-n_6-n_7-n_8-n_9-n_{10}-A_2; \\ P_3 &= S-n_{11}-n_{12}-n_{13}-n_{14}-n_{15}-A_3; \\ P_4 &= S-n_6-n_{13}-n_{14}-n_{15}-A_3; \\ P_5 &= S-n_{11}-n_{12}-n_{18}-n_{19}-n_{20}-A_4; \\ P_6 &= S-n_{16}-n_{17}-n_{18}-n_{19}-n_{20}-A_4; \\ P_7 &= S-n_{16}-n_{17}-n_{18}-n_{25}-A_5; \\ P_8 &= S-n_6-n_{12}-n_{18}-n_{25}-A_5; \\ P_9 &= S-n_{21}-n_{22}-n_{23}-n_{24}-n_{25}-A_5. \end{aligned}$$

根据 ZDAR 算法, 求得各路径邻居节点影响因子为: $F(P_1, P_2, \dots, P_9) = (6, 11, 19, 14, 18, 12, 8, 20, 2)$ 。任播路径 P_9 拥有最小 F 值, 因此选择 P_9 并从拓扑图中删除 P_9 及其邻居节点, 即节点 $n_{18}, n_{21}, n_{22}, n_{23}, n_{24}, n_{25}$ 和 A_5 。第二轮的拓扑图中只剩下备选任播路径 P_1, P_2, P_3 和 P_4 , 重新计算各路径邻居节点影响因子, 得 $F(P_1, P_2, \dots, P_4) = (4, 8, 7,$

8),选择 P_1 ,以此类推,最终算法结果为 $\{P_9, P_1, P_3\}$ 。相比较 SPF 区域不相交任播路由算法结果 $\{P_8\}$,ZDAR 算法能够寻找到更多数目区域不相交任播路径。ZDAR 算法求解图 2 结果为 $\{S-n_{11}-n_{12}-n_{13}-n_{14}-n_{15}-n_{16}-n_{17}-n_{18}-A_3, S-n_5-n_6-n_7-n_8-n_{15}-n_9-A_2\}$,相比较(最外围)SPF 算法的结果 $\{S-n_1-n_2-n_3-n_4-A_1\}$,ZDAR 算法结果仍然占优。

2 区域不相交任播路由协议

本节具体描述 ZDAR 算法的数据结构、路由发现和区域不相交任播路径计算。

2.1 数据结构

ZDAR 算法以 DSR(Dynamic Source Routing)协议为基础。DSR 协议是基于单路径路由协议的,对此本文进行相应改进以满足多路径路由的需要。ZDAR 算法要求源节点需维护 1 张本地任播路由表,表内保存源节点至基站(即任播组员集合)的多条区域不相交任播路径信息,当表内所有任播路径都不能工作或能工作的路径数目低于系统阈值时,需泛洪发送 RREQ(Route Request)重新寻找任播路径。在 WSN 中,相比较传感器节点数目而言,基站数目较少,因此维护 1 张至各基站的任播路由表的开销也比较少。任播路由表需包含以下信息:目标任播地址、目标单播地址、度量值、下一跳地址及路径域等。其中,度量值是基于路径的多个特征,包括时延长短、跳数、路径中节点剩余能量比率和路径负载等而生成的数值;路径域是一个数据栈,用来存放该路径所经过所有节点的 ID。任播路由表的结构如图 3 所示。

Destination (Anycast)	Destination (Unicast)	Next Hop	Path	Metric
--------------------------	--------------------------	----------	------	-------	--------

图3 任播路由表数据结构图

2.2 路由发现

源节点通过泛洪 RREQ 查找任播路径,其 RREQ 中包括源地址、目标单播地址、目标任播地址、RREQ 识别号(PID)、跳数、TTL(Time to Live)和路径信息栈等信息。

当中间节点 u 收到源节点的 RREQ,先检查其源地址和 PID 是否已存在其 Cache 中。①如果不存在,说明是一个新的 RREQ,将其存入 Cache 中并将其广播至 $N(u)$ 处;②若已存在同一源地址同一 PID 的 RREQ,且路径信息栈中出现节点 u 的 ID,说明出现路由环现象,丢弃该 RREQ。若不存在路由环现

象,且路径信息栈与 Cache 中路径信息不同,说明是经过不同路径到达的 RREQ,以往区域不相交路由协议^[9-10]只转发最先到达的 RREQ 或最佳路径的 RREQ,但上述策略会导致大量候选路径的流失。如图 1 中,当节点 n_{25} 收到经过 $S-n_6-n_{12}-n_{18}$ 的 RREQ 和经过 $S-n_{21}-n_{22}-n_{23}-n_{24}$ 的 RREQ 时,以往协议会丢弃后者,最终导致任播路径 $P_9 = S-n_{21}-n_{22}-n_{23}-n_{24}-n_{25}-A_5$ 流失,与路径 $P_8 = S-n_6-n_{12}-n_{18}-n_{25}-A_5$ 相比 P_9 显然并不好,但 P_9 却不与路径 $P_3 = S-n_{11}-n_{12}-n_{13}-n_{14}-n_{15}-A_3$ 区域相交,因此, P_9 的保留可以增加区域不相交任播路径的数目。基于尽量多保留候选任播路径的目的,本文协议规定任意中间节点 u 收到某源地址的 RREQ 后,在 Δt_1 时间内到达的同一源地址同一 PID 但路径不同的 RREQ 都需转发至 $N(u)$ 处。很显然, Δt_1 设置的过大会导致系统开销过大; Δt_1 设置的过小又达不到多保留候选任播路径的目的。因此,在操作时应逐步调节 Δt_1 直至源节点能够寻找到足够数量的区域不相交任播路径。

当 RREQ 的 TTL 为 0 时,仍未寻找到基站,则丢弃该 RREQ。当基站收到同一源地址同一 PID 不同路径的 RREQ 时,需按其路径逆向一一返回 RREP(Route Reply)。

2.3 区域不相交路径计算

由于区域不相交路径计算的需要,本文协议规定,每隔时间间隔 Δt_2 各节点需广播汇报自己相邻节点集合。通常情况下,WSN 节点位置较固定,除耗尽能量情况外,节点的周围邻居节点情况相对稳定,因此可以设置 Δt_2 一个较大的值以减少额外的广播能耗。通过之前的路由查找,源节点已获得多条候选任播路径信息,从中计算出区域不相交路径的步骤如下:①根据式(2),源节点计算各路径的 F 值,取最小 F 值的路径 P 为目标路径(路径的删除会导致剩余候选路径的 F 值发生改变,因此每一次循环都需重新计算 F 值);②删除路径 P 及有目标节点、中间节点属于 $N(P)$ 的所有候选路径;③若剩余候选路径不为空,返回步骤①;反之,计算结束。

3 实验与分析

以下,本文以节点不相交任播路由算法和 SPF 区域不相交任播路由算法作为对照算法,来评价 ZDAR 算法的优劣(为方便描述,前两者算法分别表示为 ND, SZD)。以往算法常以系统能耗最小为优化目标,但如果路由路径某节点能量消耗过耗耗尽能量,就可能导致网络的分割被认定为网络失效。

因此,为了保证较长的网络生存期,合理的路由方法还要通过任播技术均衡地使用所有节点的能量。由于能耗均衡与系统能耗最小都会直接影响网络生存期,因此本文将能耗均衡与系统能耗最小这两者因素都引入评价体系。

本文以节点剩余能量率方差来反映 WSN 能耗均衡状况。节点剩余能量率方差 V 计算如下:

$$V = \sum_{(u \in U)} [R(u) - R_a]^2 / M \quad (3)$$

其中, M 为节点数目, $R(u)$ 为节点 u 的剩余能量率, R_a 为节点平均剩余能量率。

设在不同 λ 值(或时间值)下共统计这三种算法 K 次实验结果(剩余能量率方差 V 和系统总能耗 E , 第 i 次结果分别表示为 E_i 和 V_i)。采用最小最大规范化方法将这些实验值映射 $[0, 1]$ 区间, E 被映射为到 E' 的计算过程如下:

$$E' = \frac{E - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (4)$$

其中, E_{\min} 和 E_{\max} 分别是 K 次实验中三种算法中最小和最大的 E 值。 V 被映射为到 V' 的计算过程与此类似, 在此不赘述。

算法优劣的评价指数 W 本文设定如下:

$$W = \alpha E' + (1 - \alpha) V' \quad (5)$$

其中, α 为权重调节参数, 取值范围为 $[0, 1]$ 。当 $\alpha = 0$ 时, 为剩余能量率方差最小化选择方法; 当 $\alpha = 1$ 时, 为系统能耗最小化选择方法。本文设置 α 为 0.5。

仿真模拟一个具有 800 个节点的网络, 节点随机分布在 $600 \text{ m} \times 600 \text{ m}$ 区域里。网络设置如下: 节点传输半径为 50 m; 5% 的节点作为任播组组长(基站), 基站具有无限能量; 指定源节点, 源节点以泊松分布产生分组(参数为 λ), 设某算法采用 L 条任播路径, 则每条任播路径承担泊松分布参数为 λ/L 的数据分组传输任务; 传感器节点初始能量为 4 J; 传输能耗为 24 mW/s, 接收能耗和空闲等待能耗为 6 mW/s; 传输速度为 160 kb/s; 数据分组大小为 4 kb。

各算法按照相同参数的泊松分布产生分组并任播至基站。不断调节泊松分布 λ 值的大小(4 ~ 32), 观察 80 s 后各算法的 W 值。结果如图 4 所示。

同一拓扑结构下, 节点不相交任播路径最大数目要多于区域不相交任播路径最大数目。在图 4 中, 当 λ 值较小时, 由于碰撞概率很低, 重传能耗也很低, ND 算法因为采用更多数目的任播路径传输分组, 节点能耗相对更均衡, 具有较好的 W 值。但当 λ 值增大, 碰撞概率也迅速增加, 重传能耗激增甚至超过正常传输能耗(无碰撞传输能耗), 导致

ND 算法性能迅速下降。SZD 算法与 ZDAR 算法都不存在碰撞问题, λ 值增大只会增加正常数据分组的传输能耗, 不存在重传能耗, 因此在 λ 值较高时相比较 ND 算法具有较优的表现。而 ZDAR 算法又相比较 SZD 算法能够寻找到更多数量的区域不相交任播路径, 在长时间工作下节点剩余能量率更均衡, 因此优于 SZD 算法。

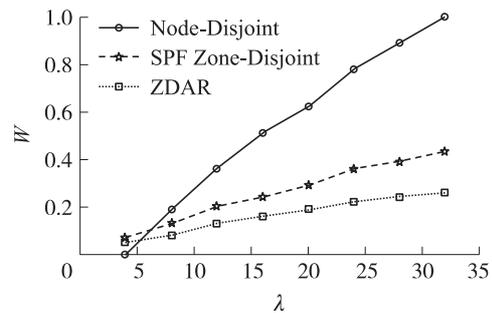


图 4 λ 值和 W 值

为了反映各算法对 WSN 生存期的影响, 我们观察不同时间段各算法的 W 值。各算法中源节点以 $\lambda = 32$ 的泊松分布产生分组并任播至基站, 观察各时间段(10 s ~ 80 s)各算法的 W 值, 结果如图 5 所示。

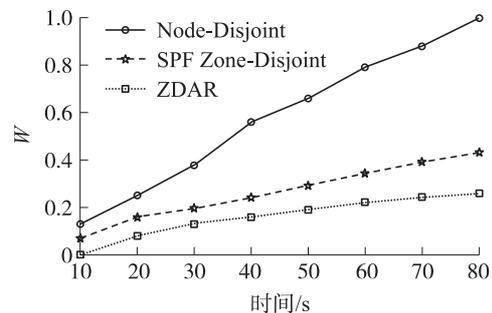


图 5 时间和 W 值

由图 5 可知, 由于 λ 值较大, ND 算法中某些节点重传能耗巨大, 而且随着时间流逝节点剩余能量越来越不均衡, ND 算法性能越来越低。而 ZDAR 算法又相比较 SZD 算法能够寻找到更多数量的区域不相交任播路径, 能耗均衡优于 SZD 算法, 因此 W 值表现较好。

4 结语

相比较路径或节点不相交任播路由技术, 区域不相交策略可以更好地降低和均衡 WSN 能耗, 本文提出一种基于邻居节点影响因子的 WSN 区域不相交任播路由算法 ZDAR。ZDAR 算法在寻找任播路径时综合考量任播路径的跳数及路径周围邻居节点参与其他任播路径的度, 相比较(最外围)最短路径优先算法只关心路径的跳数, ZDAR 算法优化效果

更好,在系统能耗和能耗均衡的综合指标上具有较好的性能优势,从而提高网络生存期。

参考文献:

- [1] 魏伟,史浩山,刘明. 传感器网络分层多路径路由协议[J]. 传感技术学报,2007,20(6):1353-1361.
- [2] Wang X, Wu K, Wang J, et al. CAPF: Coded Anycast Packet Forwarding for Wireless Mesh Networks[J]. Wireless Networks, 2011,17(5):1273-1285.
- [3] Kim J, Lin X, Shroff N B. Optimal Anycast Technique for Delay-Sensitive Energy-Constrained Asynchronous Sensor Networks[J]. IEEE/ACM Trans Networking,2011,19(2):484-497.
- [4] Kim J, Lin X, Shroff N B, et al. Minimizing Delay and Maximizing Lifetime for Wireless Sensor Networks with Anycast[J]. IEEE/ACM Trans on Networking,2010,18(2):515-528.
- [5] Hou Y, Shi Y, Sherali H D. Optimal Base Station Selection for Anycast Routing in Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2006,55(3):813-821.
- [6] Kumar A, Varma S. Geographic Node-Disjoint Path Routing for Wireless Sensor Networks [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6):1138-1139.
- [7] Karl H, Willig A. Protocols and Architectures for Wireless Sensor Networks [M]. Hoboken: John Wiley Publishing House, April. 2005,128-157.
- [8] Bicket J, Aguayo D, Biswas S, et al. Architecture and Evaluation of an Unplanned 802.11b Mesh Network [C]//Proc of ACM MobiCom'05. 2005.
- [9] Aburada K, Eto M, Okazaki N, et al. Proposal of a Zone Disjoint Multi-Path Routing for Ad Hoc Networks [C]//Proc of 8th Asia-Pacific Symposium on Information and Telecommunication Technologies. 2010.
- [10] Vijay S, Sharma S C, Gupta V, et al. CZM-DSR: A New Cluster/Zone-Disjoint Multi-Path Routing Algorithm for Mobile Ad-Hoc Networks [C]//Proc of 2009 IEEE International Advance Computing Conference. 2009,480-485.
- [11] Lee J, Park H, Oh S, et al. Radio-Disjoint Geographic Multipath Routing in Wireless Sensor Networks [C]//Proc of 2012 IEEE 26th International Conference on AINA,2012,803-809.
- [12] 胡钢,钱文玲,陈世志,等. 基于无 Hello 消息的无线传感器网络路由技术的改进[J]. 传感技术学报,2008,21(1):109-112.
- [13] Roy S, Bandyopadhyay S, Ueda T, et al. Multipath Routing in Ad Hoc Wireless Networks with Omni Directional and Directional Antenna: A Comparative Study [J]. Lecture Notes in Computer Science,2002,2571/2002:184-191.
- [14] 杨俊丽,刘明,张兴艳. 基于相关因子的节点不相交的 Ad Hoc 多路径路由算法[J]. 小型微型计算机系统,2006,9:669-1672.
- [15] Wang Z, Bulut E, Szymanski B K. Energy Efficient Collision Aware Multipath Routing for Wireless Sensor Networks [C]//Proc of 2009 IEEE International Conference on Communications. 2009,1-5.



顾云丽(1978-),女,江苏省连云港人,南京理工大学博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络路由技术、网络应用技术,guyunlily@sina.com;



钱焕延(1950-),男,江苏省泰州人,南京理工大学计算机科学与技术学院教授、博士生导师,主要研究方向为网络技术及应用、IPv6,hyqian@mail.njust.edu.cn。