

无线传感器网络中一种具有稳定链路的鲁棒可调拓扑算法

刘浩然 尹荣荣 郝晓辰 窦晶晶 毕卫红

(燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

摘要: 该文针对传感器网络中无线链路的不稳定性问题, 基于 r 邻居图模型提出一种具有稳定链路的鲁棒可调拓扑控制算法 RAWSL (Robust Adjustable with Steady Links)。算法以接收信号强度阈值作为链路判断条件, 有效地避免了网络中不稳定链路存在的可能性, 并能够通过调整参数 r 取值满足不同网络的需求。实验结果表明, RAWSL 算法不仅能够确保网络的连通, 还具有鲁棒性高和时延较低的特点。

关键词: 无线传感器网络; RAWSL 拓扑算法; 链路质量; r 邻近图模型

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2009)11-2751-06

A Robust Adjustable Topology Algorithm with Steady Links in Wireless Sensor Network

Liu Hao-ran Yin Rong-rong Hao Xiao-chen Dou Jing-jing Bi Wei-hong

(Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: In order to solve the problem of wireless link instability in sensor network, based on the r -neighborhood graph model, this paper puts forward a robust adjustable topology control algorithm with steady links, named RAWSL. RAWSL algorithm sets the receive signal strength threshold as the limit of topology, which to avoided effectively the instability links, and by adjusting the value of parameters r to fit a variety of network robustness requirements. The experiment results show that, RAWSL algorithm not only ensures the entire connectivity, it also has higher robustness and lower delay characteristics.

Key words: Wireless sensor networks; RAWSL topology algorithm; Link quality; r -neighborhood model

1 引言

无线传感器网络 (Wireless Sensor Network, WSN) 由随机布撒在监测区域内大量的廉价小功率传感器节点组成, 这些节点协作地感知和采集监测对象的信息, 并将所感知信息以多跳中继方式传送到用户终端, 使用户对监测区域的变化及时地做出响应^[1,2]。它在军事、环境、医疗和交通等诸多领域都潜在着巨大的应用价值, 是当前国际上备受关注的多学科高度交叉的新型研究技术之一。

拓扑控制是 WSN 中的一个基本问题^[3], 对上层路由协议和 MAC 协议的设计都会产生重要影响。考虑大多数拓扑控制算法以地理位置信息进行网络构建不够实际, 微软亚洲研究院的 Wattenhofer 等人^[4]提出一种基于链路通信质量的 XTC 拓扑控制算法, 但其仅以节点间的距离定性度量链路质量, 忽略了无线链路不稳定的问题。Lillis^[5]等人采用令节点随机产生链路权值的方法进行拓扑构建, 并结合距离估计误差形成了 ϵ -RTC 算法, 但其由于复杂性过高而不易实现。针对 XTC 构建拓扑鲁棒性低的不足, 文献^[6]以构建 k 连通拓扑思想提出了 k -XTC 算法, 文

献^[7]以平均链路权值函数搭建双向通信链路思想提出了 S-XTC, 均能够有效提高网络鲁棒性和能量利用效率, 却无法解决不稳定链路的局限。文献^[8,9]中考虑链路不稳定性对路由的影响, 从 XTC 算法构建的网络拓扑中剔除掉不可靠的通信链路, 然而不能保证整个网络的连通性。

考虑到上述算法的种种局限, 从实际的通信链路特性出发, 本文提出一种鲁棒的分布式拓扑算法 RAWSL。算法以接收信号强度为链路判断条件, 基于 r 邻居图模型进行网络拓扑搭建, 通过调整参数 r 的取值能够实现不同性能网络对鲁棒性的要求。实验结果表明, 在无需考虑节点位置信息的前提下, RAWSL 算法构建的拓扑能够确保链路的稳定性与网络的连通, 与 XTC 算法相比还具有鲁棒性高和时延较低的特点。

2 理论基础

2.1 r 邻居图模型

WSN 的监测区域可以抽象为一个以传感器节点为顶点, 任意两节点间通信链路为边的二维平面图, 从而网络拓扑结构可由邻近图表述, 定义其为一个包含点集 V 和边集 E 的图 $G(V, E)$ 。某有向边

(u, v) 属于该图当且仅当点 v 位于点 u 的邻域内, 这个邻域是在某事先定义的邻近测度作用下产生的^[10]。

r 邻居图^[11](如图 1)由欧几里德平面内的点集 V' 与边集 E' 组成, 表示为 $G(V', E')$, 若边 $(u, v) \in E'$, 当且仅当图 1 中阴影区域内不存在任何点 w 。该阴影区域是分别以点 u, v 为圆心, u, v 间距离 $d(u, v)$ 为半径的圆域和以 u, v 中点 m 为圆心, l 长为半径的圆域共同形成的公共区域。其中, $l = (d(u, v)/2) \cdot \sqrt{1 + 2r^2}, 0 \leq r \leq 1$ 。

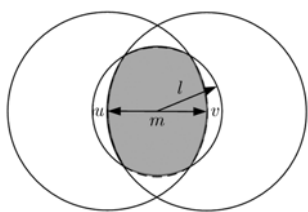


图 1 r 邻居图模型

2.2 链路度量标准的确定

合理的链路质量评估量度对于选择通信链路, 构建有效的网络拓扑尤为重要^[12]。目前较为广泛的链路质量评估量度包括包接收率 PRR (Packet Reception Rate)和信号强度指示值 RSSI (Received Signal Strength Indicator)^[13]。PRR 定义为一段时间内成功收到包的个数占发送器已发送包个数的比例, 它是最为直接的链路度量标准, 高 PRR 表明通信链路质量状况好, 低 PRR 则意味包丢失严重, 通信链路质量状况差。但 PRR 是一段时间数据包的接收情况, 对链路状况的反映不够灵敏, 并且直接以 PRR 作为链路质量估计量度构建拓扑, 网络需长期维持统计 PRR 所耗费的大量探测开销。RSSI 反映的是通信链路上的信噪比, 也就是平均接收信号功率的估计, 同信号的发送功率存在一致变化趋势, 所以通过 RSSI 的观察值来调整节点的发射功率能够实现网络性能的优化。并且, 一般的无线射频芯片如 CC1000, CC2420 以及 RF230^[14]在每个包到达时皆可以不同的表达形式提供信号强度测量值 RSSI。可见, RSSI 在获取方式上明显优于 PRR, 以其作为链路估计量度能够避免由 PRR 引入探测开销同时又可实现实时的网络检测。

另外, 通过对无线传感器网络链路的机理建模^[15]得出, 成功接收一个数据包的概率 PRR 表示为

$$PRR = (1 - P_e)^{sf} \quad (1)$$

其中, f 是数据帧(包括前导码、网络有效载荷和循环冗余码校验)的大小; P_e 表示比特误差率, 由调制

机制决定。对于频移键控机制, 可得 PRR 和接收信号强度值 RSSI 存在如下关系

$$PRR = \left[1 - \frac{1}{2} \exp \left(- \frac{RSSI - P_n}{2} \cdot \frac{R}{B_N} \right) \right]^{sf} \quad (2)$$

其中, P_n 表示固有噪声电平; R 是数据传输速率 (bit/s); B_N 为噪声带宽。由式(2)可见, 随 RSSI 值的增大, PRR 呈指数上升趋势, 两者一一对应且 RSSI 存在满足网络一定收包率的阈值, 以此阈值之上的通信链路搭建网络拓扑能够保证可靠的信息通信。基于上述分析, 本文以 RSSI 阈值为拓扑构建门限, 并结合 r 邻居图模型提出了一种具有稳定链路的鲁棒性可调拓扑算法 RAWSL。

3 RAWSL 算法

为了更好的理解后续算法的描述, 首先给出该算法涉及的一些基本概念。

定义 1 (链路权值) WSN 中考虑任意两个通信节点 u, v , 记 $\omega_{(u,v)}$ 为节点 u 对链路 (u, v) 的估计权值。RAWSL 算法中 $\omega_{(u,v)} = 1 / RSSI_{(u,v)}$ 。其中, $RSSI_{(u,v)}$ 代表节点 u 接收到来自节点 v 的信息的接收信号强度值, 因通信两节点间 RSSI 具有较好的对称性^[16], RAWSL 算法中 $\omega_{(u,v)} = \omega_{(v,u)}$ 。

定义 2 (邻居和公共邻居) WSN 中, 如果节点 u 以最大功率 $P_{\max}(u)$ 发送信息能被节点 v 正确接收, 则称 v 是 u 的邻居。节点 u 的所有邻居组成其邻居集合 $N(u)$ 。若节点 w 同时是节点 u 和节点 v 的邻居, 则称 w 为节点 u, v 的公共邻居。

定义 3 (链路双向性) 如果节点 u 包含在其邻居节点 v 的邻居集合 $N(v)$ 中, 当且仅当 v 包含在节点 u 的邻居集合 $N(u)$ 中, 即 $u \in N(v)$ 且 $v \in N(u)$ 成立时, 链路 (u, v) 是双向的。

定义 4 (网络连通性) 对于网络中任意两个节点 u 和 v , 如果存在通信链路 $u \Leftrightarrow v_0 \Leftrightarrow v_1 \cdots v_n \Leftrightarrow v$, 则称 u, v 是连通的, 若网络中所有节点都两两连通, 那么整个网络就是连通的。

定义 5 (平均最大节点度) 多次执行 RAWSL 算法, 每次拓扑重建前记录网络最大节点度, 多次拓扑重建网络最大节点度的平均值。

下面以 4 个节点 u, v_1, v_2, v_3 组成的简单 WSN(如图 2)为例介绍 RAWSL 算法具体实现过程。

第 1 步 网络中各个节点依次以自身最大发射功率 P_{\max} 发射一条包含节点 id 的 Hello 信息包, 每个节点根据接收到 Hello 信息包的先后顺序, 将节点添加到自己的邻居信息列表 $Inlist(nid, RSSI, style)$ 中。其中, nid 为邻居节点序号; $RSSI$ 表示接收到邻节点信息时测得的接收信号强度值; $style$

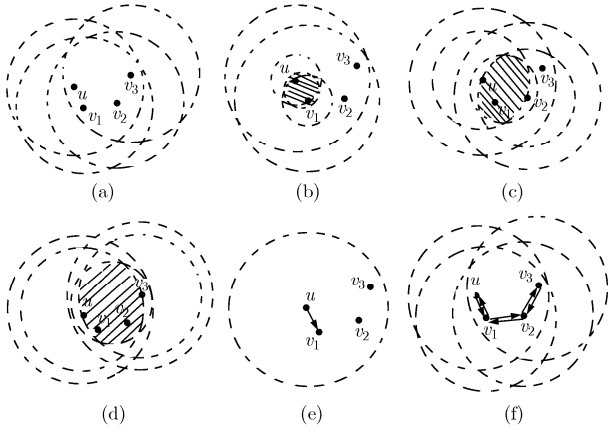


图 2 RAWSL 算法执行过程

反映与其邻居节点之间的通信方式。各节点建立起邻居列表后, 再次以功率 P_{\max} 广播另一个信息包 Build, 包含已经建立好的邻居信息列表, 使网络中的每个节点通过接收彼此的 Build 信息包, 以获得自己所有邻居节点的邻居信息。

第 2 步 网络中各节点经信息交换后, 分别根据自己收集的邻居信息列表独立地构建局部拓扑, 以节点 u 为例进行说明。由图 2(a)可知, 节点 v_1, v_2, v_3 , 皆在 u 的感知范围(以 u 为圆心, 虚线圆周围成的区域)内, 当节点 u 接收到其邻居节点 v_1 的信息列表 Inlist(v_1)时, 判断 Inlist(u)与 Inlist(v_1)信息列表中是否存在公共邻居节点 w , 使得式(3)成立。

$$\omega_{(u,w)}^2 + \omega_{(v_1,w)}^2 - \omega_{(u,v_1)}^2 / 2 < 2l^2 \quad (3)$$

其中,

$$l = \frac{\omega_{(u,v_1)}}{2} \sqrt{1 + 2r^2}, \quad 0 \leq r \leq 1 \quad (4)$$

当式(3)成立时, 表明图 2(b)阴影区域内存在公共邻居节点 w , 则节点 u 与其邻节点 v_1 采用多跳转发方式进行数据通信, 不建立直接通信链路; 否则节点 u 与 v_1 将建立直接通信链路。由图 2(b)可知, 节点 u, v_1 之间不存在符合式(3)的节点 w , 所以节点 u 与 v_1 之间存在直接通信链路。同理由图 2(c)和 2(d)可知, 节点 u 与 v_2, v_3 皆以多跳方式进行通信, 节点 u 最终建立的局部拓扑如图 2(e)所示。网络中其他节点 v_1, v_2, v_3 依次独立构建本地拓扑, 最终全局网络拓扑(如图 2(f))也就构建起来了。

第 3 步 网络拓扑建立之后, 各节点将依据构建的局部拓扑来调整自身的发射功率, 在保证网络连通的条件下, 尽可能地减少网络能耗, 以延长网络使用寿命。节点发射功率与信号接收功率存在如下关系

$$P_r = P_t \cdot F \quad (5)$$

其中, P_r 为信号接收功率; P_t 为节点发射功率; F

是一个混合参数, 对不同的传播模型形式不同。以节点 u 的功率调整过程为例加以说明, 节点 u 的发射功率与信号接收功率满足式(6)所示。

$$P_r(u_{v_i}) / P_t(u) = P_{rth}(u_{v_i}) / P_{th}(u_{v_i}) \quad (6)$$

其中, $P_r(u_{v_i})$ 是 u 节点以最大发射功率发送信息到邻节点 v_i 的信号接收功率; $P_t(u)$ 是节点的最大发射功率; $P_{rth}(u_{v_i})$ 为节点 u 发送的信息恰好被节点 v_i 接收到的信号接收功率; $P_{th}(u_{v_i})$ 为节点的临界发射功率。考虑到接收信号强度与节点的发射功率存在一致的变化趋势, 节点 u 的最终发射功率可表示为

$$RSSI_{(u,v_i)} / P_{\max} = RSSI_{th} / P_t \quad (7)$$

其中, $RSSI_{th}$ 是式(2)代入网络期望收包率反求出的 $RSSI$ 阈值。

为了在网络连通的前提下尽可能节省网络能耗, 节点 u 发送的信息需保证被信息列表中 $style = S$ (单跳)且 $RSSI_{(u,v)}$ 值最小的节点正确接收到, 其最小值 $RSSI_{(u,v_i)}$ 为

$$RSSI_{(u,v_i)} = \min_{style=S} \{RSSI_{(u,v)}\} \quad (8)$$

最后, 将所得 $RSSI_{(u,v_i)}$ 代入式(7)即得节点 u 的临界发射功率 P_t , 网络中其他节点依次调整其发射功率, 拓扑构建过程结束。

下面对 RAWSL 算法构建的网络拓扑链路对称性及连通性进行分析。

定理 1(链路双向性) RAWSL 算法构建的拓扑 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 所有链路都是双向的。

证明 对于网络中任意两个互为邻居的节点 u 和 v 而言, 由定义 3 可知, 链路 (u, v) 要符合双向性, 则节点 u, v 需满足条件 $u \in N_{\text{RAWSL}}(v)$ 且 $v \in N_{\text{RAWSL}}(u)$ 。采用反证法进行论证, 假设 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 中 $u \notin N_{\text{RAWSL}}(v)$, 而 $v \in N_{\text{RAWSL}}(u)$, 由 $u \notin N_{\text{RAWSL}}(v)$ 可知, 节点 u 和 v 之间没有建立直接通信的链路, 而是采用其他节点转发信息方式通信, 那么必定存在节点 w_i , 使得节点 v 与其邻节点 w_i 建立通信链路相对于同节点 u 建立链路更为容易, 因此得出 $v \notin N_{\text{RAWSL}}(u)$, 这与前提假设 $v \in N_{\text{RAWSL}}(u)$ 相互矛盾, 同理可以证明 $v \notin N_{\text{RAWSL}}(u)$, $u \in N_{\text{RAWSL}}(v)$ 的情况, 这种假设也不成立, 由于节点 u, v 具有普遍性, 所以 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 中的所有链路都是双向的。证毕

定理 2(网络连通性) 若 $G(V, E)$ 是连通的, 那么 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 也是连通的。

证明 考虑任意两个节点 $u, v \in V$, 要证明 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 是连通的, 按照定义 4 可知, $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 中必然至少存在一条通信链路 $u \Leftrightarrow v_0 \Leftrightarrow v_1 \cdots v_n \Leftrightarrow v$ 。采用反证法进行论证, 假

设 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 中包含不连通的节点 u, v , 但节点 u, v 在 $G(V, E)$ 中是连通的, 根据通信链路形式不同分两种情况进行讨论。

(1)若 $G(V, E)$ 中 u, v 具有直接通信链路, 按照 RAWSL 算法设计思想, 必然存在公共邻节点 w , 使得节点 u, v 通过 w 以转发方式通信, 而不建立直接通信链路, 如此节点 u, v 间存在通信链路 $u \Leftrightarrow w \Leftrightarrow v$, 与假设条件 u, v 不连通相矛盾。

(2)若 $G(V, E)$ 中 u, v 具有多跳通信链路 $u \Leftrightarrow v_0 \Leftrightarrow v_1 \cdots v_n \Leftrightarrow v$, 因为该链路是由多个两两直接通信的链路组成, 如此对每一条直接通信链路进行如上分析即可, 最终可以得到节点 u, v 连通的结论, 由于节点 u, v 的任意性可知, 网络中每对节点都至少存在一条通信链路, 因此, 若 $G(V, E)$ 是连通的, 那么 $G_{\text{RAWSL}}(V, E_{\text{RAWSL}})$ 也是连通的。证毕

4 实验研究

为了验证 RAWSL 算法的可行性和有效性, 本文采用 Iris 节点对 RAWSL 算法进行了实验研究, 实验共分 4 部分: 通信链路的特性分析, 网络节点度特性分析, 网络鲁棒性对比分析以及网络时延性对比分析。实验验证了 RAWSL 算法以 RSSI 作为通信链路度量的正确性, 以及参数 r 取值同网络节点度一一对应的变化关系, 并进一步从网络鲁棒性以及时延性方面与 XTC 算法进行对比分析, 验证了 RAWSL 算法的有效性。

4.1 通信链路的特性分析

在安静走廊内放置两个 Iris 节点, 一个节点直接与基站相连作为数据接收节点记为 A 节点, 另一个作为发送节点记为 B 节点。初始两节点距离为 0 m, 节点间距离每增加 0.6 m 记录一组 RSSI 和 PRR, 一段时间后以 A 节点作为发送方, B 节点作为接收方, 重复上述实验过程得 PRR 与距离, PRR 与 RSSI 的变化关系如图 3, 图 4 所示。

由图 3 可见, 节点间距离和收包率并不存在简单规则的变化关系, 所以单纯以距离作为衡量链路

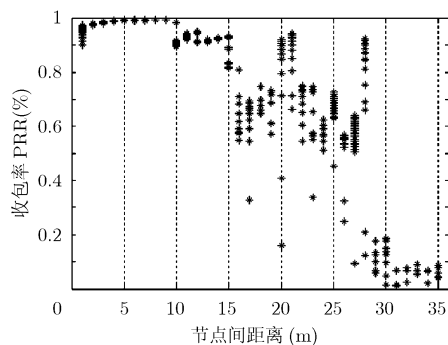


图3 收包率随距离的变化关系

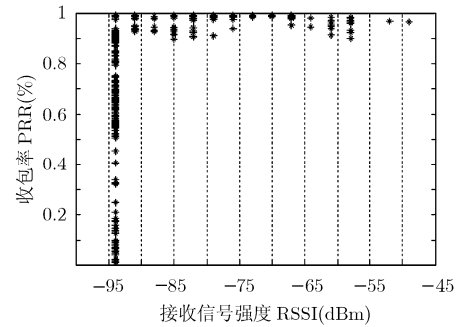


图4 收包率与接收信号强度变化关系

质量的依据不符合实际通信情况。由图 4 可见, PRR 随 RSSI 值递增呈上升趋势, 且当 RSSI 值大于 -90 dBm, PRR 基本上处于 0.9 以上; 当 RSSI 值小于 -94 dBm 时, PRR 迅速下降至 0, 因此若选取 RSSI 大于 -90 dBm 的链路构建拓扑, 就能够保证网络每条链路的收包率皆在 0.9 以上。所以, 本文取 -90 dBm 为 RSSI 阈值作为拓扑构建门限, 避免了不可靠通信链路对上层协议的影响^[17]。

4.2 网络节点度特性分析

RAWSL 算法通过调整参数 r 取值可以很灵活地依据网络需求构建相应的网络拓扑: 当 r 值较小, 构建的网络拓扑中链路数较多, 有效能耗路由能够被包含在该拓扑中; 当 r 值较大, 构建的网络拓扑相应保证了较低的节点度, 可有效抑制信息干扰和竞争。下面具体分析网络节点度随 r 取值的变化关系。

在 $1000 \text{ m} \times 1000 \text{ m}$ 的区域内, 随机分布 150 个最大传输距离皆为 250 m 的节点, r 取值从 0 以步长 0.1 增长到 1, 各节点分别执行 RAWSL 算法 200 次, 统计网络节点度随参数 r 的变化关系如表 1 所示。

可见, 网络平均节点度同参数 r 存在一一对应关系, 随着 r 取值的递增, 网络平均节点度呈下降趋势, 即网络鲁棒性也相应降低。从而通过对 r 取值的调整, 可构建不同鲁棒等级的网络拓扑以适应网络的不同应用需求。

出于吞吐量最优的需求, 依据 Leonard Kleinrock^[18]等人对网络节点度进行分析得出, 网络平均节点度近似为 6 时, 吞吐量可达到最优。考虑到高节点度的节点在网络中能量消耗相对较快, 是造成网络过早不连通的重要因素, 统计网络平均最大节点度随 r 的变化关系, 如表 1 所示。可见, RAWSL 算法中 r 取 0.3 时构建的网络拓扑即可很好地满足网络吞吐量的需求。

4.3 网络鲁棒性对比分析

网络的鲁棒性和稀疏性是 WSN 中相互矛盾的一对性能指标, 可以用网络的平均节点度来衡量, 平均节点度高, 鲁棒性好, 网络的抗毁性强。但节

表1 网络节点度随参数 r 的变化关系

参数 r	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
平均节点度	3.54	3.49	3.35	3.16	2.98	2.80	2.65	2.53	2.44	2.39	2.37
平均最大节点度	6.77	6.65	6.3	5.87	5.32	5.03	4.65	4.28	4.09	4.01	4

点度过高又意味传播信号间的干扰和冲突严重, 网络因数据包重发消耗大量能量。相反网络平均节点度低, 减少了传播信号间的干扰和冲突, 但过于稀疏的网络, 抗毁性相应很差, 网络存在易瘫痪的问题。因此, 对于 WSN 来说, 在构建拓扑时能够同时兼顾网络鲁棒性和稀疏性的拓扑算法性能更好。

由 4.2 节可知网络节点度和参数 r 存在一一对应关系, 即通过 r 改变可实现网络鲁棒性的调整。图 5 给出了在 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的区域内, 随机分布 N 个最大传输距离皆为 250 m 的节点, N 分别取 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 时, 各节点独立执行 RAWSL ($r=0.3$), XTC 算法各 200 次所得网络平均节点度的变化情况。

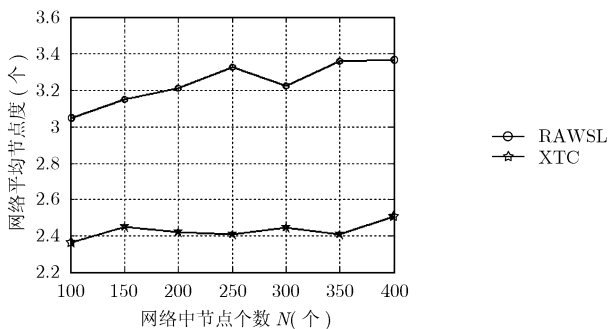


图 5 平均节点度随网络节点数的变化关系

由图 5 可见, XTC 算法无论在稀疏还是密集型网络中, 其构建的网络拓扑平均节点度随节点数目变化趋势相当平稳, 仅仅在 2.3~2.5 之间轻微波动。而 RAWSL 拓扑的网络平均节点度可介于 3~3.4 之间, 并随网络节点个数的递增呈上升趋势。因此, 较 XTC 而言, RAWSL 算法有效地提高了网络鲁棒性, 且 RAWSL 算法在密集型网络 ($N=400$) 中, 仍能够保证网络平均节点度在 4 以下, 这就表明其在提高网络鲁棒性同时也很好地兼顾到了网络稀疏性的要求。

4.4 网络时延性对比分析

网络时延性是一个很重要的性能评价指标。通信链路的平均跳数在一定程度上能够反映端到端的时延, 对监测区域内发生的变化需要做出及时响应的 WSN 而言, 构建时延性小的网络拓扑算法对 WSN 来说尤为重要。

对 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$ 的区域内, 随机分布 N 个

最大传输距离皆为 250 m 的节点, N 分别取 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400 时, 统计 RAWSL ($r=0.3$), XTC 算法构建的网络拓扑其余点到 sink 节点的平均跳数, 进行时延性对比分析如图 6 所示。

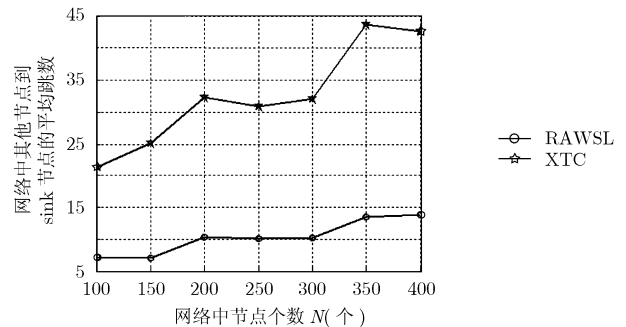


图 6 距 sink 节点平均跳数随节点个数变化关系

由图 6 可知, XTC, RAWSL ($r=0.3$) 算法构建的网络拓扑, 其任意节点到网络 sink 节点的平均跳数皆随着网络节点数目的增加而增加, 但 RAWSL 拓扑的平均跳数明显低于同条件下的 XTC, 这就表明, 算法 RAWSL ($r=0.3$) 的通信时延明显优于 XTC。

5 结论

基于几何 r 邻近图模型, 本文提出了一种以接收信号强度判断链路特性的分布式拓扑控制算法 RAWSL。对算法进行了理论分析, 证明其构建的网络拓扑能够保证全局的双向连通; 通过以 Iris 节点进行的通信实验研究, 验证了距离单纯作为链路度量指标的不合理性, 并得出存在信号强度阈值能够保证通信可靠性的结论。实验结果还表明, RAWSL 算法有效地保留了网络拓扑中通信稳定链路; 且通过调整可变参数 r 能够得知, 当 r 取值 0.3 时, RAWSL 拓扑能够满足理论最优吞吐量需求。

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): 1282-1291.
Ren F Y, Huang H N, and Lin C. Wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2003, 14(7): 1282-1291.
- [2] Akyildiz L F, Su W L, and Sankarasubramanian Y, et al. A survey on sensor networks[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2002, 40(8): 102-105.

- [3] 张学, 陆桑璐, 陈贵海. 无线传感器网络的拓扑控制[J]. 软件学报, 2007, 18(4): 943-954.
Zhang X, Lu S L, and Chen G H. Topology control for wireless sensor networks[J]. *Journal of Software*, 2007, 18(4): 943-954.
- [4] Roger W and Aaron Z. XTC: A practical topology control algorithm for Ad-hoc networks[C]. Proceedings-18th International Parallel and Distributed Processing Symposium, IPDPS 2004(Abstracts and CD-ROM), Santa Fe, NM, United States, Apr. 26-30, 2004: 2969-2976.
- [5] Lillis K and Pemmaraju S V. Topology control with limited geometric information[C]. 9th International Conference on Principles of Distributed Systems(OPODIS) 2005, Pisa, Italy, Dec. 12-14, 2005: 427-442.
- [6] Sukurnar G, Lillis K, and Saurav P, *et al.* Robust topology control protocols[C]. 8th International Conference on Principles of Distributed Systems, OPODIS2004, Grenoble, France, Dec. 15-17, 2004: 94-109.
- [7] Matthias D, Jan B, and Lothar T. S-XTC: A signal-strength based topology control algorithm for sensor networks[C]. 8th International Symposium on Autonomous Decentralized, ISADS2007, Sedona, AZ, United States, Mar. 21-23, 2007: 508-515.
- [8] Burri N, Rickenbach P V, and Wattenhofer R. Topology control made practical increasing the performance of source routing[C]. 2nd International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Networks, Hong Kong, China, Dec. 13-15, 2006: 1-12.
- [9] Anahita N, Amir D, and Arash D, *et al.* Topology control scheme in MANETs for AODV routing[C]. 2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications, ICTTA, Damascus, Syrian Arab Republic, Apr. 7-11, 2008: 1-6.
- [10] Lu G, Zhou M T, and Niu X Z. A survey of proximity graphs in wireless networks[J]. *Journal of Software*, 2008, 19(4): 888-911.
- [11] Jeng A A and Jan R H. The r -neighborhood graph: An adjustable structure for topology control in wireless Ad hoc Networks[J]. *IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems*, 2007, 18(4): 536-549.
- [12] 孙佩刚, 赵海, 朱剑. 无线传感器网络链路通信质量测量研究[J]. 通信学报, 2007, 10(3): 36-87.
Sun P G, Zhao H, and Zhu J. Study on measurement of link communication quality in wireless sensor networks[J]. *Journal on Communications*, 2007, 10(3): 36-87.
- [13] Jure L, Purnamrita S, and Carlos G. Modeling link qualities in a sensor network[J]. *Informatika (Ljubljana)*, 2005, 29(4): 445-451.
- [14] Sun P G, Zhao Hi, and Pu M. Evaluation of communication link in wireless sensor networks[J]. *Dongbei Daxue Xuebao*, 2008, 29(4): 500-503.
- [15] Rodriguez E and Carmen B. System level performance metrics in mobile wireless communication networks considering both resource insufficiency and link unreliability[C]. 50th Annual IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM2007, Washington, DC, United States, Nov. 26-30, 2007: 2612-2616.
- [16] Zhao J and Ramesh G. Understanding packet delivery performance in dense wireless sensor network[C]. SenSys'03: Proceedings of the First International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, Los Angeles, CA, United States, Nov. 5-7, 2003: 1-13.
- [17] Marco Z and Bhaskar K. Analyzing the transitional region in low power wireless links[C]. 2004 First Annual IEEE Communications Society Conference on Sensor and Ad hoc Communications and Networks, IEEE SECON2004, Santa Clara, CA, United States, Oct. 4-7, 2004: 517-526.
- [18] Kleinrock L and Silvester J. Optimum transmission radii for packet radio networks or why six is a magic number[C]. The IEEE National Telecommunication Conference, New York, 1978: 431-435.
- 刘浩然: 男, 1980年生, 博士, 研究方向为无线传感器网络通信协议.
- 尹荣荣: 女, 1985年生, 硕士, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.
- 郝晓辰: 男, 1980年生, 讲师, 博士, 研究方向为无线传感器网络拓扑控制.
- 窦晶晶: 女, 1985年生, 硕士, 研究方向为无线传感器路由算法.
- 毕卫红: 女, 1960年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为光电传感网络.