A Two-Layer Tree-Type Energy Efficient Multi-Link Routing Algorithm*

HU Zhongdong, ZHANG Kang, WANG Zhendong*

(*School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou Jiangxi* 341000, *China*)

Abstract: In order to overcome the high maintenance cost of the single-link of the PEGASIS protocol algorithm, and solve the defects of the COSEN protocol algorithm such as the large number of cross-links and long-links, data reverse transmission, a two-layer tree-type energy efficient multi-link routing algorithm (TTEMR) is proposed. TTEMR algorithm divides the network nodes into two layers, the bottom layer constructs the network nodes into multiple sub-links, then select the main link-leader and the sub-link-leaders to construct the top layer link-leader link. To reduce the length of the data transfer path, handling isolated points using a tree structure during the linking process, optimizing the selection strategies of the main link-leader and the sub-link-leaders and the link-forming rules, and avoid common nodes and sub-link-leaders near the Sink node into the link to reduce the reverse transmission of data. Simulation results show that compared with LEACH, PEGASIS and COSEN algorithm, TTEMR algorithm excels in the performance of each round of nodes, the stability period and life cycle of the network, the total energy remaining in each round, and the average path length per unit link segment.

Key words: wireless sensor networks; TTEMR; two-layer tree-type; isolated point; reverse transmission; multi-link

EEACC: 6150P **doi**: 10.3969/j.issn.1004-1699.2019.01.022

一种双层树型高能效多链路由算法*

胡中栋*, 张 康, 王振东

(江西理工大学信息工程学院, 江西 赣州 341000)

摘 要: 针对 PEGASIS 协议算法的单链维护成本高, COSEN 协议算法的交叉链和长链多、数据逆传递严重等缺陷, 提出一种双层树型高能效多链路由算法(TTEMR)。TTEMR 算法把网络节点分为两层, 底层将网络节点构造成多条分链, 选取主链头和分链链头构造顶层链头链。对成链过程中产生的孤立点进行树型结构化处理以降低数据传递路径长度, 优化主链头和分链链头选取策略及成链规则, 并对 Sink 附近的普通节点和链头进行不入链操作以减少数据逆传递。仿真实验结果表明, 与 LEACH、PEGASIS 和 COSEN 算法相比, TTEMR 算法在每轮节点的存活数量、网络的稳定周期和生命周期、每轮剩余总能量及单位链路段平均路径长度等性能方面表现优异。

关键词: 无线传感器网络; TTEMR; 双层树型; 孤立点; 逆传递; 多链路

中图分类号: TP393 **文献标识码**: A **文章编号**: 1004-1699(2019)01-0127-06

无线传感器网络 WSN(Wireless Sensor Networks)是广泛应用于气象、环境、农业和军事等领域[1]的一种信息获取及处理技术, 其综合了传感器技术、微电子技术和无线通信技术等多学科技术, 被认为是本世纪改变世界的十大技术之一[2]。WSN 的主要组成部分是作为微电子设备的传感器节点, 一般外形小巧, 功耗较低, 能量有限且不可再生, 因目前对节点生存时间有较大影响的电池技术没有突破性发展, 于是对网络结构特性和传输协议的研究是提高网络寿命的重要研究方向。

为减少网络能耗、提高网络寿命, Lindsey S 等人在 LEACH 算法[3]的基础上改进提出了 PEGASIS 算法[4], 该算法采用链式结构, 网络结构固定, 减少了簇结构算法的频繁重构开销, 但由于网络结构是一条长链, 时延[5]较大, 不适用实时性要求高的场景, 且一旦链中某一节点失效, 则整个网络瘫痪, 鲁棒性[6]差。为此, Quazi 等人又改进提出了 COSEN 算法[7], 其采用多链组网, 有效降低网络时延, 增强了网络鲁棒性, 但多链组网也未能解决交叉链和长链多、数据逆传递严重等问题。鉴于上述, 本文提出一种双层树型高能效多链路由算法 TTEMR(A Two-layer Tree-type Energy Efficient Multi-link Routing Algorithm)。

项目来源: 国家自然科学基金项目(61562038, 61562037); 江西省自然科学基金项目(20171BAB202026)

收稿日期: 2018-06-28 **修改日期**: 2018-09-21

1 相关研究

1.1 经典协议

经典的平面型路由协议由于传输跳数过多,导致传输时延高、能量浪费严重,而层次路由协议的分簇、成链等思想能有效聚合数据,降低传输平均路径长度,减小时延,已成为当前路由算法研究的热点。

1.1.1 LEACH 协议描述

LEACH 协议算法采用分簇思想,成簇阶段,通过随机选取节点来作为簇头,非簇头节点就近加入簇。数据传输阶段,簇内节点将数据发送给簇头,然后簇头将数据汇聚融合[8]后直接发给 Sink 节点。

1.1.2 PEGASIS 协议描述

PEGASIS 协议算法采用链式结构,建链阶段通过贪婪算法将网络中的所有节点组织成一条链路,每轮随机选择一个节点充当与 Sink 通信的链头。数据传输阶段,采用令牌机制,沿形成的链路逐跳收集、融合数据,直至传送至链头,最后由链头将数据直接发送给 Sink 节点。

1.1.3 COSEN 协议描述

COSEN 协议算法在建链阶段采用贪婪算法,当形成的链上节点数占全网节点数 20%时,终止建链,从下跳节点开始重复上述步骤建立新链,直至全网节点皆已成链。然后选取每条链上节点剩余能量最大的节点为链头,各链头再建立链头链,链头链选取剩余能量最大的为主链头。数据传输阶段,各链头分别发送令牌以控制本链节点数据收集传输,最终主链头将各分链链头数据收集融合并传递至 Sink 节点。

1.2 算法分析

对上述三种协议算法进行优缺点分析:

1.2.1 LEACH 算法

簇头随机周期性选取可有效减少网络能耗分部不均,实现网络能耗负载均衡。但仍存在以下缺点:①簇头以单跳通信方式与 Sink 传输数据,造成簇头节点能量的大量浪费;②由于簇头是随机选取,易导致簇头位置过偏或过于集中。

1.2.2 PEGASIS 算法

算法采用链式结构,网络结构固定,节点间平均路径长度短,数据传输阶段每次只有一个节点与 Sink 通信,减少了簇结构算法的频繁重构开销,但 PEGASIS 算法仍存在着以下不足:①在成链过程中容易形成长链,位于长链上的节点死亡较快;②总链路较长,从链两端到链头的传输时延长;③选择链头未考虑距离影响造成远离 Sink 的链头节点过快死亡;④一旦有节点死亡,整个 WSN 需要重新构建链路,网络维护成本高。

1.2.3 COSEN 算法

算法采用多链方式,每个分链数据收集和发送同时进行,可大大降低网络时延。当网络中某个节点失效死亡时,只对当前分链和链头链进行维护即可,维护成本低,鲁棒性高。但依然有以下不足:①交叉链多,成链陷入局部最优;②分链构造中后期链端为寻找下一跳未入链的节点易形成长链结构;③链头选取未考虑距离和位置问题易导致链头链形成超长链,加重数据逆传递[9]。

2 TTEMR 算法

2.1 分链成链

首先对 Sink 附近的节点进行不入链操作,然后采用贪婪算法进行成链,但在成链过程中采用启发式算法进行优化,对孤立点[10]进行树型[11]结构化处理。

2.1.1 不入链处理

由于链的单向传递特点,会使部分节点集将数据向远离 Sink 的方向传递,然后通过某几个节点汇聚融合后再向 Sink 发送,这称为数据的逆传递。

因为 Sink 节点靠近 WSN 但不位于其内,若靠近 Sink 的普通节点不将其作为数据传递的下一跳,而是选择与距离较远的节点成链,则会造成该节点数据最终逆传递至主链头,不但加重了该分链和链头链能耗,而且增加了网络时延,所以合理分配 Sink 附近节点的传递路径可有效降低全网能耗。如图 1 所示,因为 $d_{bS} \leqslant d_{ba}$、$d_{cS} \leqslant d_{cd}$,所以节点 b、c 直接向 Sink 传递数据而不选择与其他节点成链。

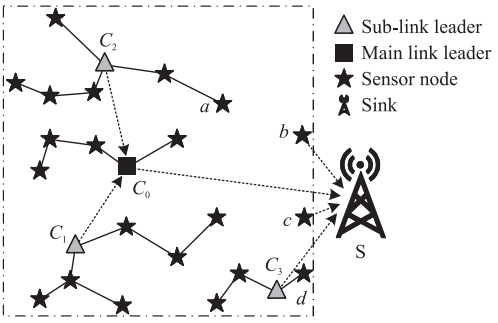

图 1 Sink 附近节点路径处理

2.1.2 启发式算法

①消除链内交叉

最优链路中必定不含有交叉路径[12],因此对于一条链内出现交叉情况时要将它消除。如图 2 所示,找到两个交叉路径 af 和 de,删除其连接后连接 ae 和 df。

②消除链间交叉

虽然通过消除链内交叉可保证 WSN 局部区域不再出现交叉,但由于整个区域内存在多条链中,分

链之间还会出现交叉情况,链间交叉是算法局部最优而非全局最优的直接表现。如图 3 所示,找到交叉链路 *bf* 和 *ec*,删除其连接,建立 *bc* 和 *ef* 链接。

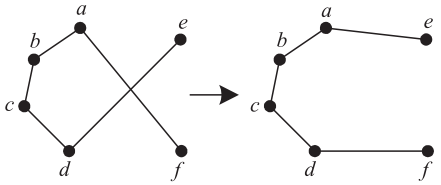

图 2　消除链内交叉

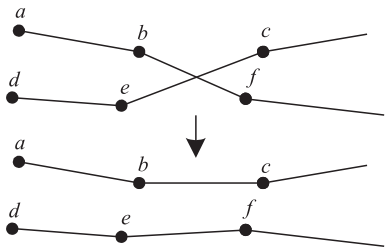

图 3　消除链间交叉

③消除长路径

长链的产生一般是由于静态规则化分建链空间或算法陷入局部最优造成的,原本相距较近的节点却因为所属空间不同而不能够加入同一条链,这造成了数据传递能耗浪费、时延增长。如图 4 所示,找到长链 *ab*,删除 *ab* 连接,连接 *ac*,并将节点 *b* 加入距离较近的节点 *f* 所在的链路。

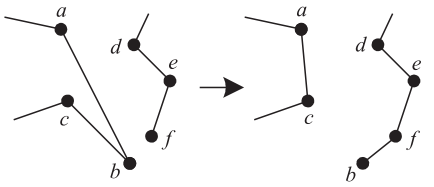

图 4　消除长链

设 d_{bound} 为长短链界限值,定义如式(1),两节点间距离小于等于 d_{bound} 则为短链,超过 d_{bound} 则为长链。

$$d_{\text{bound}}=\alpha E(d_{\text{ij}}) \tag{1}$$

式中:α 为长链系数,$E(d_{\text{ij}})$ 为节点 i 到下一跳节点 j 距离的期望。根据文献[13]实验可知,α 初始值为 1.5 时效果最好,但当遇到以下两种情况时,长链系数的取值应该适当增大:①WSN 稀疏时,网络中短链较少,长链较多,导致成链数较多、孤立点较多,此时链的维护成本将增大。②在 WSN 运行的中后期,由于出现了大量节点死亡,导致网络节点间距增大,此时可适当增大长链系数避免形成过多分链和孤立点。

2.1.3　孤立点树型结构化处理

孤立点直接与 Sink 节点通信会造成能量损耗过快,因此将孤立点以合适的方式加入附近的分链才是首选,产生孤立点主要有下面几种情况:①在消除链内、链间交叉时,导致个别节点孤立于分链附近;②在网络边缘或稀疏区域产生的长链,通过删除长链会产生离周围分链都较远的孤立点;③中后期网络中节点不断死亡,导致产生距离过远的孤立点。

如图 5(a)所示,节点 *d* 为消除交叉链时产生的孤立点,节点 *e* 为上述②、③情况产生的孤立点。文献[13]中对孤立点的处理是首先找到距离孤立点 *d* 最近的节点 *b*,判断节点 *b* 的上一跳节点 *a* 和下一跳节点 *c* 到孤立点 *d* 的距离,将孤立点 *d* 插入节点 *b* 和距离较近节点 *a* 之间,形成如图 5(b)所示的链路。

TTEMR 算法运用树的思想,直接比较孤立点 *d* 到节点 *a*、*b*、*c* 的距离,建立如图 5(c)所示距离较近的 *bd* 连接,*b* 为父节点,*d* 为其子节点。对于孤立点 *e*,由于到周围节点距离都为长链,则寻找距离孤立点 *e* 最近的分链节点或 Sink 节点构建链路,如图 5(c)建立 *ec* 链路,*c* 为父节点,*e* 为其子节点。

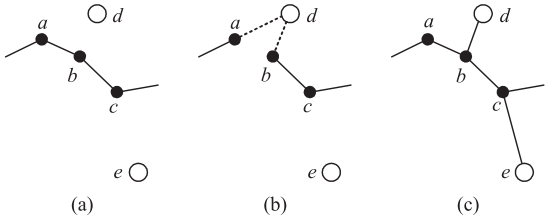

图 5　孤立点入链

本文采用文献[14]中的能量模型,假设每个数据包有 *k* bit 的数据,则发送端消耗的能量为式(2):

$$E_{\text{TX}}=\begin{cases}kE_{\text{elec}}+k\varepsilon_{\text{fs}}d_{ij}^2 & d_{ij}\leqslant d_0\\ kE_{\text{elec}}+k\varepsilon_{\text{amp}}d_{ij}^4 & d_{ij}>d_0\end{cases} \tag{2}$$

$$d_0=\sqrt{\varepsilon_{\text{fs}}/\varepsilon_{\text{amp}}} \tag{3}$$

接收端消耗的能量为式(4):

$$E_{\text{RX}}=kE_{\text{elec}} \tag{4}$$

数据汇聚融合消耗的能量为式(5):

$$E_{\text{DA}}=kE_{\text{da}} \tag{5}$$

式中:E_{elec} = 50 nJ/bit,表示收发电路能耗;E_{da} = 5 nJ/bit,表示单位数据融合能耗;d_{ij} 表示节点 *i* 到节点 *j* 的距离;d_0 表示能量损耗的界限值。

设节点 *a* 为靠近链头方向,则图 5(b)链路段 bda 能耗为式(6),图 5(c)链路树 dba 能耗为式(7):

$$E_{\text{bda}}=k(4E_{\text{elec}}+2E_{\text{da}}+\varepsilon d_{bd}^{\omega}+\varepsilon d_{\text{ad}}^{\omega}) \tag{6}$$

$$E_{\text{dba}}=k(4E_{\text{elec}}+2E_{\text{da}}+\varepsilon d_{bd}^{\omega}+\varepsilon d_{\text{ab}}^{\omega}) \tag{7}$$

因为 $d_{\text{ab}}<d_{\text{ad}}$,所以 $E_{\text{dba}}<E_{\text{bda}}$,即链路树 dba 能耗小于链路段 bda 能耗。通过能耗分析知,以树型结构形式将孤立点加入附近分链能有效降低网络能耗。

2.2　链头链成链

2.2.1　选取主链头

在链式协议算法中,主链头和分链链头的选取

会对 WSN 中节点数据的整体传递方向产生较大影响,若主链头和分链链头靠近 Sink,则网络中数据总体向 Sink 方向移动;若主链头和分链链头远离 Sink,则网络中数据总体向远离 Sink 方向移动,最后通过主链头转发至 Sink,因此合理选取主链头和分链链头可减少 WSN 内的数据逆传递。

在 COSEN 算法中,主链头和分链链头的选取只考虑了剩余能量,这导致距离 Sink 较远的节点被选为主链头、不同分链中距离较远的两个节点可能会被选为相邻链头,形成如图 6(b)中 *ed*、*db*、主链头 *c* 到 Sink 这样的长链,且 *ed* 链会引起严重的数据逆传递。TTEMR 算法综合考虑了节点剩余能量和到 Sink 的距离,根据式(8)在全网节点中选取主链头 C_0。

$$\eta=\frac{E_i}{d_{i\text{ to }S}},\{i=1,2,3\cdots N\} \tag{8}$$

式中:E_i 为节点 i 的剩余能量,$d_{i\text{ to }S}$为节点 i 到 Sink 节点的距离,N 为全网节点数,η 越大被选为主链头概率越大。

2.2.2 选取分链链头

分链链头选取步骤如下:①令主链头 C_0 所在分链编号为 0,主链头所在的链称为主分链,主链头也是主分链的分链链头。

②确定距主分链最近分链的链头 C_k。距离 C_0 最近的非本链节点所在的链就是与主分链最近的分链,令该分链为当前链,链号为 k,根据式(9)选取链头 C_k。

③确定距当前链最近的分链的链头 C_{k+1}。距离当前链链头最近的无链头非本链节点所在的链就是与当前链最近的分链,令该分链为当前链,链号为 $k+1$,根据式(9)选取链头 C_{k+1}。

④重复步骤③,直至每个分链确定链头。

$$\beta=\frac{E_j^k}{d_{j\text{ to }C_{k-1}}},\quad \{j=1,2,3\cdots M;k=1,2,3,\cdots\} \tag{9}$$

式中:E_j^k 为分链 k 上节点 j 的剩余能量,M 是当前分链节点数目,$d_{j\text{ to }C_{k-1}}$为分链 k 上节点 j 到上一个相邻最近分链的链头 C_{k-1}的距离,β 越大被选为分链链头的概率越大。

2.2.3 链头链成链规则

TTEMR 算法链头链成链规则如下:①若某一分链链头到主链头或其他分链链头的距离大于等于到 Sink 节点的距离,则应直接与 Sink 通信以减少数据逆传递。如图 1,链头 C_3 到相邻链头的距离 $d_{(C_3,C_0)}\geqslant d_{(C_3,S)}$、$d_{(C_3,C_1)}\geqslant d_{(C_3,S)}$,所以链头 C_3 直接向 Sink 传递数据而不参与链头链成链。②采用贪婪算法以主链头为起始点,将其余各分链链头组成链头链;③对成链过程中产生的链内交叉按 2.1.2①节消除链内交叉进行优化;④对成链过程中产生的孤立点链头作如下处理:(a)若相邻链头间为短链则将孤立点链头按 2.1.3 节孤立点树型结构化处理;(b)若相邻链头间皆为长链则首先寻找距离孤立点链头最近的相邻链头 $C_k(k=0,1,2,\cdots)$,链头 C_k 所在分链编号 k,然后寻找孤立点链头距离分链 k 上最近的节点 j,将孤立点链头作为子节点加入分链 k,j 为其父节点,最后孤立点链头通过分链 k 中的普通节点中转传递数据至相邻链头 C_k。

在数据传输阶段,各分链链头控制本链令牌,收集融合本链数据。主链头控制链头链令牌,收集融合各分链链头数据并最终传递至 Sink 节点。

3 算法仿真与分析

为了验证 TTEMR 算法的性能,本文对该算法进行了 MATLAB 模拟仿真实验,并与 LEACH、PEGASIS、COSEN 算法进行对比。仿真区域为 100 m×100 m,区域内节点随机分布且不能移动,当节点剩余能量低于 1%后则认为该节点死亡,仿真参数见表 1。

表 1 仿真实验基本参数

参数	取值
节点初始能量	0.5 J
节点最大通信半径	30m
节点数量	100
数据包	4 000 bit
E_{elec}	50 nJ/bit
E_{da}	5 nJ/bit
E_{fs}	10 pJ/bit/m^2
E_{amp}	0.0013 pJ/(bit·m^4)
广播包大小	25 bit
Sink 位置	(50 m,0 m)

3.1 节点成链情况分析

图 6(a)、6(b)分别为 PEGASIS 和 COSEN 算法的链式结构,可以看出这两种算法成链杂乱无章,交叉链、长链多。图 6(b)中 COSEN 算法链头链几乎全是长链,其中 ed 链将数据向远离 Sink 方向传递,数据逆传递严重。图 6(c)、6(d)分别为 TTEMR 算法底层分链结构和顶层链头链结构,有明显树型特征,节点间跨度小,成链区域自适应,分链长度适中且没有交叉链,长链较少,且长链长度比 PEGASIS 和 COSEN 算法中的长链短,图 6(d)中链头数据总体向 Sink 方向传递,因为链头 g 到 Sink 节点的距离小于等于到其他链头的距离,所以链头 g 不参与链头链成链,有效避免了逆传递带来的能量消耗。

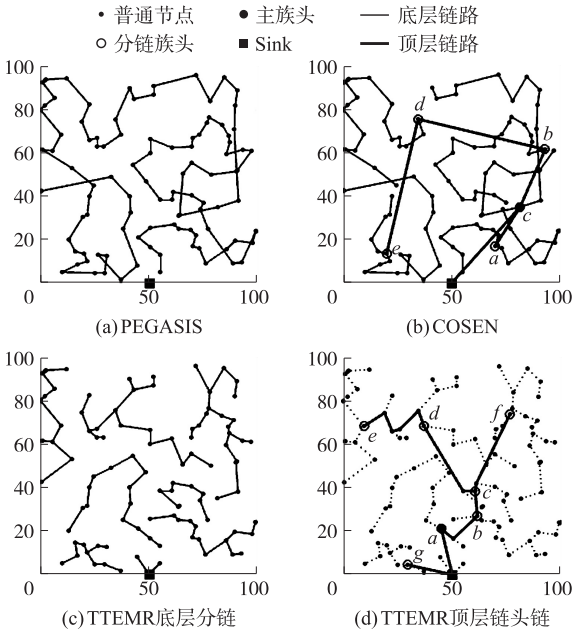

图 6　各算法链式图对比

3.2　能耗分析

本文以全网节点向 Sink 发送一次数据为一“轮”,对比四种算法每轮存活节点数,从图 7 可以看出,TTEMR 算法相对于 LEACH、PEGASIS、COSEN 算法,首节点死亡轮数和最后一个节点死亡轮数都有明显的延长,节点死亡轮数曲线在最上方。这是由于 TTEMR 算法采用了树型成链方法,优化了主链头、分链链头选取策略,有效减少了长链节点传输能耗和网络数据逆传递情况。

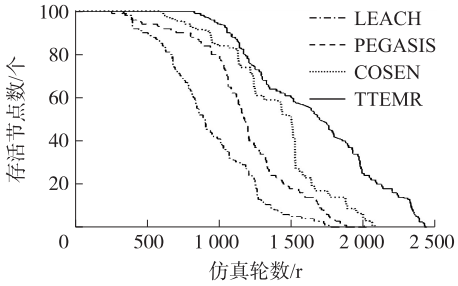

图 7　每轮存活节点对比

从 WSN 开始运行到第一个节点死亡所经历的轮数称为稳定周期,从网络开始运行到 50% 的节点死亡所经历的轮数称为生命周期。由表 2 可知,TTEMR 算法稳定稳定周期比 LEACH、PEGASIS、COSEN 提升约 145%、227%、37%,生命周期提升约 89%、44%、12%,在网络 20%、80% 节点死亡情况下,TTEMR 算法仍比上述三种算法有较明显的提升。

由图 8 可知,在每轮收集数据后,COSEN 算法全网剩余能量仅比 PEGASIS 略高,这是因为其并没有从根本上解决能耗浪费严重的长链和数据逆传递问题,而 TTEMR 每轮全网剩余能量均高于 LEACH、PEGASIS、COSEN 这三种算法,这表明 TTEMR 在网络节能方面更加优越。

表 2　网络生存周期对比

	LEACH	PEGASIS	COSEN	TTEMR
首节点死亡	338	253	602	827
20%	665	945	1129	1170
50%	890	1171	1496	1681
80%	1245	1441	1637	2086
全部死亡	1758	1880	2076	2420

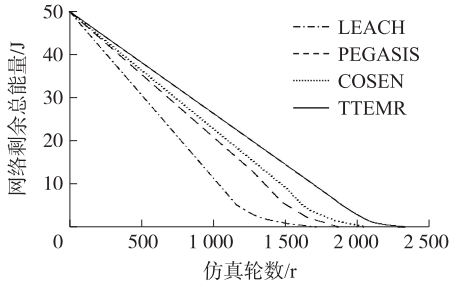

图 8　网络剩余总能量对比

3.3　单位链路段平均路径长度分析

本文称两个相连接的底层节点间的链路为单位链路段,则所有单位链路段路径长度之和除以单位链路段数量为单位链路段平均路径长度,简称平均路径长度。其反应成链规则的优劣,平均路径长度越短则成链规则越合理,传递数据越节约能量。

图 9 中,PEGASIS、COSEN、LEACH 算法前期平均路径长度没有改变是因为网络中没有节点死亡,网络结构没有变化,而 LEACH 算法每几轮便重新随机选取簇头,导致网络结构变化频繁,因此平均路径长度变动幅度大,且 LEACH 算法的平均路径最长,这是因为其普通节点以单跳方式向簇头传递数据;COSEN 算法的节点间平均路径比 PEGASIS 略短,因为其未从根本上减少交叉链和长链;而 TTEMR 算法的平均路径长度较其他算法有较明显降低,这是因为在链路中采用了启发式算法和树型结构优化,消除了交叉链,减少了长链路。

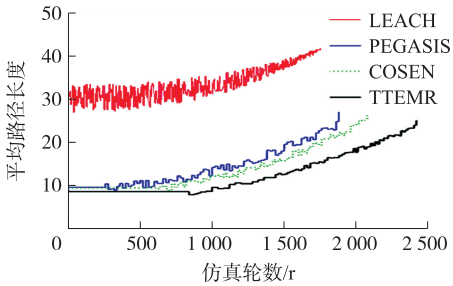

图 9　单位链路段平均路径长度对比

4　结束语

本文在分析了 LEACH、PEGASIS、COSEN 协议

算法优缺点的基础上,提出了 TTEMR 算法。TTEMR 将网络构造成双层树型多链路结构,分链和链头链均通过启发式算法优化,并对网络孤立点进行树型结构化处理,降低了数据传递路径长度;通过优化主链头和分链链头的选取策略及成链规则,并对 Sink 附近的普通节点和链头作不入链操作,减弱了网络的数据逆传递。本文对每轮节点的存活数量、网络的稳定周期和生命周期、每轮剩余总能量及单位链路段平均路径长度这五项性能指标进行仿真实验,仿真实验结果显示,TTEMR 算法在上述五项性能指标对比中表现比其他三种算法优异。但 TTEMR 需要构造树型结构,计算量比 COSEN 要大,链头链需要多跳中转,所以延迟略大于 COSEN,在实时传输场景下有所受限。

参考文献:

[1] Sabet Maryam, Naji Hamidreza. An Energy Efficient Multi-Level Route-Aware Clustering Algorithm for Wireless Sensor Networks: A Self-Organized Approach[J]. Computers and Electrical Engineering, 2016, 56: 399-417.

[2] 胡中栋,谢金伟. 基于山区地形的无线传感器网络三维定位机制[J]. 传感技术学报,2015,28(3):408-411.

[3] Reddy G R S, Balaji S. A Review on Different Types of LEACH Protocol for Wireless Sensor Networks[J]. International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. 2017, 2(4): 840-844.

[4] Han Zhao, Wu Jie, Zhang Jie, et al. A General Self-Organized Tree-Based Energy-Balance Routing Protocol for Wireless Sensor Network[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2014, 61(2): 732-740.

[5] Dong Mianxiong, Ota Kaoru, Liu Anfeng, et al. Joint Optimization of Lifetime and Transport Delay under Reliability Constraint Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2016, 27(1): 225-236.

[6] Xiang Ying, Chen Miaochao, Zhuang Xiaohong, et al. Routing Algorithm of Wireless Sensor Network and Robustness Analysis Based on Fuzzy Mathematics[J]. International Journal of Online Engineering, 2017, 13(12): 85-103.

[7] Tabassum N, Ehsanul Q, Mamun K, COSEN: A Chain Oriented Sensor Network for Efficient Data Collection[C]//Information Technology: New Generations, Third International Conference on (2006), USA: IEEE, 2006: 262-267.

[8] Kuo Tung Wei, Lin Kate Ching Ju, Tsai Ming Jer. On the Construction of Data Aggregation Tree with Minimum Energy Cost in Wireless Sensor Networks: NP-Completeness and Approximation Algorithms[J]. IEEE Transactions on Computers, 2016, 65(10): 3109-3121.

[9] 林鹭榕,汤碧玉. 无线传感器网络中远程链路传输算法研究[J]. 计算机工程,2012,38(9):100-104.

[10] Bhuiyan M Z A, Wang Guojun, Cao Jiannong, et al. Deploying Wireless Sensor Networks with Fault-Tolerance for Structural Health Monitoring[J]. IEEE Transactions on Computers, 2015, 64(2): 382-395.

[11] 何杏宇,周亦敏,杨桂松,等. 无线传感器网络能量感知增强树型路由协议研究[J]. 传感技术学报,2015,28(4):551-556.

[12] 范兴刚,王翊,介婧,等. 基于离散 PSO 的分层多链无线传感器网络路由算法[J]. 传感技术学报,2010,23(7):1006-1011.

[13] 翁江鹏,王卫,孙宝霞,等. WSN 中基于混合天线的 PEGASIS 改进算法[J]. 计算机应用研究,2018,35(4):1217-1226.

[14] 孙彦景,林昌林,江海峰. 一种能量高效的分布式非均匀分簇路由算法[J]. 传感技术学报,2015,28(8):1194-1200.

胡中栋(1958-),男,江西婺源人,工学硕士,教授,硕士研究生导师,研究方向为无线传感器网络,智能计算,jxhzd@163.com;

张 康(1992-),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为无线传感器网络,智能计算,ub.daiyu@gmail.com;

王振东(1982-),男,湖北随州人,工学博士,副教授,硕士研究生导师,研究方向为无线传感器网络、物联网、大数据与信息安全。