

# LR-WPAN Mesh 网络双重能效优化设计

查肇祥, 张金艺, 刘捷, 范天翔

(上海大学特种光纤与光接入网教育部重点实验室, 上海 200072)

**摘要:** 针对 IEEE 802.15.5 低速无线个域网(LR-WPAN)标准缺乏能效均衡设计的问题, 提出 LR-WPAN Mesh 网络双重能效优化方法。在自适应树建立和拓扑引导分布式链路状态路由环节中引入合理的能效评估要素, 优化拓扑结构和路由选择。实验结果表明, 双重能效优化方法可使网络寿命延长 97%, 并使网络的能耗更加均衡。

**关键词:** 低速无线个域网; 树状拓扑; 网状拓扑; 能效优化; 负载均衡; 链路质量指标

## Double Energy Efficient Optimization Design for LR-WPAN Mesh Network

ZHA Zhao-xiang, ZHANG Jin-yi, LIU Jie, FAN Tian-xiang

(Key Laboratory of Special Fiber Optics and Optical Access Networks of Ministry of Education,  
Shanghai University, Shanghai 200072, China)

**【Abstract】** Since IEEE 802.15.5 Low Rate Wireless Personal Area Network(LR-WPAN) standards lack load balancing design, a double energy efficient optimization method is proposed for LR-WPAN Mesh network and reasonable judge elements of energy efficiency is introduced for Adaptive Tree(AT) and Topology-guided Distributed Link State(TDLS) router of LR-WPAN Mesh network to optimize the topology and router choice. Experimental results show that the double energy efficient optimization method can prolong the network lifetime by about 97% and make the consumption of the network more balance.

**【Key words】** Low Rate Wireless Personal Area Network(LR-WPAN); tree topology; mesh topology; energy efficient optimization; load balancing; Link Quality Indicator(LQI)

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-3428.2013.04.029

### 1 概述

低速无线个域网(Low Rate Wireless Personal Area Network, LR-WPAN)的设备具有价格便宜、体积小、易操作和功耗低等优点<sup>[1]</sup>, 广泛应用于工业监控组网、办公自动化与控制等领域。IEEE 802.15.5 标准<sup>[2]</sup>提供了一种结构框架, 将网状拓扑引入无线个域网, 大大提高了网络的可扩展性, 使无线个域网设备能够支持互操作的、稳定的和可扩展的无线网状拓扑结构。其中, 该标准的 LR-WPAN 部分制定了一种基于自适应树(Adaptive Tree, AT)和拓扑引导分布式链路状态(Topology-guided Distributed Link State, TDLS)路由的网络结构<sup>[3]</sup>。但是 IEEE 802.15.5 LR-WPAN 标准只考虑了单节点的节能设计, 在网络设计中并没有加入能量均衡的考虑。如果网络中某些关键节点因能量过早消耗殆尽而失效, 则可能造成网络分割, 并大大影响网络整体的吞

吐量和网络寿命。如何高效地使用能量, 尽可能延长网络寿命, 是网络研究需要解决的关键问题。

IEEE 802.15.5 LR-WPAN 标准中的网络结构是一种融合树状拓扑和网状拓扑的混合网络。目前, 针对树状网络和网状网络的能耗优化都有了不少的研究成果。

在树状网络方面, 文献[4]综合考虑节点的剩余能量级别和跳数的链路代价函数来选取路由, 但它缺乏对节点负载的考虑, 可能导致网络因某些节点负载过重而产生拥塞, 从而增加重发次数, 缩短网络寿命。文献[5]针对树状网络设计了综合考虑节点的负载和能量状态的路由协议, 使路由选择阶段能耗更为均衡。但该协议没有在树状拓扑组建时考虑这些因素。这会导致网络拓扑的不合理, 从而加快节点的能量消耗。

在网状网络方面, 文献[6]综合考虑链路质量、信道多样性以及信道负载等因素提出了负载均衡加权累计传输时

**基金项目:** 上海市科学技术委员会基金资助项目(08706201000, 08700741000); 上海市教委重点学科基金资助项目(J50104)

**作者简介:** 查肇祥(1988—), 男, 硕士研究生, 主研方向: 无线 Mesh 网络; 张金艺, 教授、博士生导师; 刘捷, 硕士研究生; 范天翔, 高级工程师

**收稿日期:** 2012-05-14 **修回日期:** 2012-07-06 **E-mail:** zhazhaoxiang@yahoo.cn

间的路由判据,使网络更为均衡,但该判据没有将节点剩余能量考虑进来,因此该协议不适用于对能量敏感的网络。文献[7]的能量预测方法利用剩余能量选择从汇聚节点到事件区域的路由,但这是一种利用地理位置信息的路由,不能用于无法获得地理位置的节点,同时文献[7]也没有考虑信息在网络中传输的最少跳数,容易造成信息传输时延和能量的浪费。

针对 LR-WPAN Mesh 这种融合树状拓扑和网状拓扑的混合网络,单从一方面开展网络的能效优化设计是不全面的。因此,就要针对自适应树和 TDLS 路由进行双重能效优化。本文分别提出了高能效自适应树(Energy-efficient Adaptive Tree, EEAT)和高能效拓扑引导分布式链路状态(Energy-efficient Topology-guided Distributed Link State, EETDLS)路由优化网络能效。

## 2 高能效自适应树设计

对于自适应树来说,当所有节点并发产生流量时,将造成网络流量呈现出漏斗效应<sup>[8]</sup>,即下层节点流量小、能耗少,上层节点由于需要转发大量数据,流量大、能耗多。由于树状网络存在着固有的能耗不均衡性,因此形成一个合理的树状拓扑是延长网络寿命的第一步。具体要求如下:(1)剩余能量较少的节点不应被选为上层节点,否则该节点将很快因能量耗尽而失效,从而影响整体网络的功能。(2)层数相对较大的节点不应被选为父节点,否则就会增加需要转发的节点个数,加重了对网络的负载,增大对网络整体的能耗。(3)链路质量指标(Link Quality Indicator, LQI)较差的节点不应被选为父节点,否则会导致链路不稳定,加快能量的消耗。(4)形成后的网络拓扑也应该是均衡的,不能让某些“强节点”连上过多的负载,否则将导致其因单位时间能量消耗过大而较快失效。一个合理的树状拓扑应该通过综合评估各节点的剩余能量、节点层数、链路质量值和形成后的负载均衡性而形成。所以,为了达到优化能效、延长网络寿命的目的,在自适应树的建立过程中,将节点层次、剩余能量和链路质量三者归一化到父节点优选因子中以形成高能效自适应树 EEAT。AT 与 EEAT 拓扑连接的比较如图 1 所示。

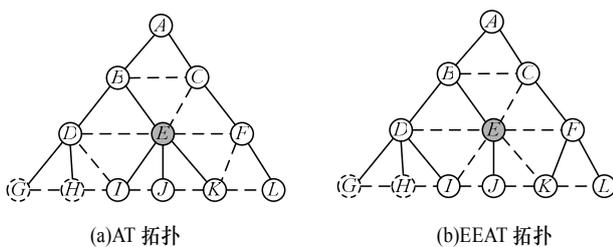


图1 AT与EEAT拓扑连接

其中,实线为树形连接;虚线为网状连接;E点为能量较少的点。由于AT对节点能量等信息不敏感,可能会给E点分配过多的子节点,而EEAT形成的拓扑则不会给E点分配

过多的节点。实现过程如下:从根节点开始,各节点逐层向外发送包含节点层数信息和剩余能量值的信标帧。而当未入网节点收到该信标帧时,当前信标帧的LQI值被记录下来。于是,未入网节点就可以根据这3个信息计算出该广播节点的父节点优选因子值,可用式(1)表示。

$$L(i) = -k + \frac{E_l(i)}{E_{\max}} + \frac{Q(i)}{Q_{\max}} \quad (1)$$

其中, $k$ 为节点 $a_i$ 的层数; $E_l(i)$ 为节点 $a_i$ 的剩余能量值; $E_{\max}$ 为节点的满能量值; $Q(i)$ 为节点 $a_i$ 当前LQI值; $Q_{\max}$ 为LQI的最大值。

得到父节点优选因子后,将该值连同该节点的ID计入备选父节点列表,并等待下一个潜在父节点的广播。经过时间 $T$ 后,每个下层节点都得到一个备选父节点列表。此时,需根据各父节点优选因子的大小选择自己的父节点,但分配机制要同时兼顾拓扑形成后的负载均衡性。下层节点首先根据备选父节点列表的结果,得出其中父节点优选因子的最大值和平均值,若最大值远大于平均值,即满足式(2),就直接将父节点优选因子最大的节点选为父节点。

$$\max_{n \in N_p} L(n) > \frac{\sum_{n \in N_p} L(n)}{p} + 0.5 \quad (2)$$

其中, $N_p$ 为备选父节点列表的集合; $p$ 为备选父节点列表中的节点数。

若下层节点发现没有满足式(2)的情况,则利用加权随机的方式产生父节点。节点 $a_i$ 被选为父节点的概率满足式(3)。

$$P(i) = \frac{L(i)}{\sum_{n \in N_p} L(n)} \quad (3)$$

这样的设计保证了当存在优选因子很高的父节点时,直接选择最佳负载,使其承担更多的网络任务。而当父节点优选因子相差不大的情况下,利用加权随机的方式选择父节点可以起到平均负载的目的。

而随着网络中各节点能量的消耗,某些树干节点的剩余能量会先于大部分节点达到警戒值 $E_w$ 。此时能耗优化机制应该动态改变网络拓扑,保护这个“弱节点”,将其将转为叶子节点。其中,最小能量门限 $E_w$ 可用式(4)表示。

$$E_w = \eta E_{\max} \quad (4)$$

其中, $\eta$ 为最小能量门限权值,反映网络的工作模式。 $\eta$ 越大,切换时刻越早,节点后续工作时间越长,但对其他节点负载越大。EEAT拓扑切换机制示例如图2所示。

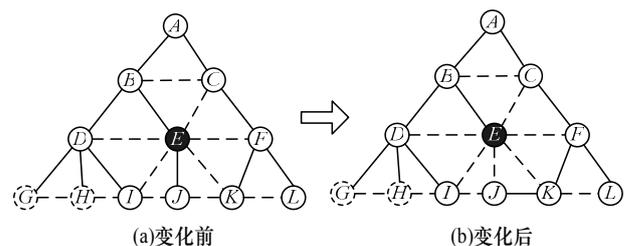


图2 EEAT拓扑切换机制

图2中的 $E$ 点低于了警戒能量门限 $E_w$ , 于是拓扑切换机制将节点 $E$ 与节点 $J$ 父子连接切断, 而让节点 $J$ 重新发起小范围的自适应树建立, 再次利用父节点优选因子寻找新的父节点。由于自适应树中包含自适应地址分配的设计, 因此在完成小范围的自适应树重建后, 将会重新分配地址。

### 3 高效 TDLS 路由设计

对于标准中的 TDLS 路由来说, 虽然在路由跳数一致时随机的路径选择可以一定程度地均衡负载, 但就网络整体而言, 这种跳数优先设计存在一定的局限性。在这种机制下, 某些邻居节点较多的节点就有更大的可能性承担转发任务, 从而导致能耗过于集中, 并使该节点的寿命缩短。利用链路代价函数来优化路由选择是一种有效的能效优化途径。此时, 合理地选择能效评估要素成了链路代价函数是否有效的关键。首先, 路由跳数是路由选择的最基本要素, 跳数较少的路由可以有效减少单次路由的能耗, 但仅仅考虑跳数无法实现网络整体的能效均衡。为了均衡网络总体能耗, 需要添加节点的剩余能量和负载作为重要的能效评估要素, 为剩余能量较多、负载较少的路由分配更多路由任务。由于 LR-WPAN mesh 网络具有树状网络和网状网络的双重属性, 本文将代表树状网络属性的节点层数和代表网状网络属性的节点邻居数, 共同作为影响负载的因数。除了路由跳数、剩余能量和负载之外, LQI 也是影响能效的要素。LQI 均值与包接收率存在着近似线性的关系, LQI 越大包接收率越高<sup>[9]</sup>。同时, 由于一般网络的 MAC 层具有重发机制, 未被正确接收的数据将被重发而引起再次的能耗。于是, LQI 值与能效也建立起了联系, 即 LQI 值越大, 包接收率就越高, 需要节点重发的次数就越少, 从而可以减少通信能耗、延长网络寿命。于是, 链路代价函数可以设计成一个关于路由跳数、节点剩余能量、节点层数、节点邻居数和 LQI 值的函数, 以优化路径选择、提高能效。

由于路由协议决定着数据的传输路径和不同节点的中继数据量, 路由协议的设计也是影响各个节点通信负载和能量消耗状况的关键因素。在建立 EEAT 之后, 进一步改进节点间网状路由的选择。LR-WPAN Mesh 网络中基于 TDLS 网状路由的设计可以在不使用泛洪广播的情况下, 实现 2 跳内邻居路由的获取。本文在 TDLS 路由的基础上添加一个关于路由跳数、节点剩余能量、节点层数、节点邻居数和 LQI 值的链路代价函数函数, 以优化路径选择、提高能效。单跳的综合链路代价值  $L(a_i, a_{i+1})$  可用式(5)表示。

$$L(a_i, a_{i+1}) = 1 + \alpha \times \frac{E_{\max} - E_l(i+1)}{E_{\max}} + \beta \times \frac{n(i+1)}{k(i+1)} + \gamma \times \frac{Q_{\max}}{Q(i, i+1)} \quad (5)$$

其中,  $E_l(i+1)$  为节点  $a_{i+1}$  的剩余能量值;  $E_{\max}$  为节点的最大能量值;  $n(i+1)$  为节点  $a_{i+1}$  的邻居节点数;  $k(i+1)$  为节点  $a_{i+1}$

的层数;  $Q(i, i+1)$  为当前 LQI 值;  $Q_{\max}$  为 LQI 的最大值;  $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$  为相应的权值, 分别反映对节点能量、节点负载、LQI 的重视程度,  $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。

任意 2 个节点间链路代价为一条路径上所有单跳链路评价的总和, 可通过上一跳传来的链路代价加上本链路的代价并逐次累加计算得出, 可用式(6)表示。

$$L(i, j) = L(a_i, a_{j-1}) + L(a_{j-1}, a_j) = \sum_{m \in N_{ij}} L(m, m+1) \quad (6)$$

其中,  $N_{ij}$  为路径上所有数据发送节点的集合。最终选择的路由就是链路代价  $L(i, j)$  最小的路径。而标准中的 TDLS 为 2 跳的路由半径, 这不太利于能耗优化路由的发挥。因此, 本文考虑将 TDLS 路由的路由半径扩展到  $k_{\text{set}}$  跳(3 跳以上), 以扩大能效优化后网状路由选择的作用范围, 更大程度地体现能效优化的效果。每个节点向周围节点广播只含有自身地址的 Hello 命令帧, 其帧格式如图 3 所示, 其中包含了节点层次、节点剩余能量和 1 跳邻居个数。

命令帧标识字	TTL	起始地址	结束地址	层次	Hello 控制	剩余能量	1 跳邻居个数
--------	-----	------	------	----	----------	------	---------

图3 基本 Hello 命令帧负载格式

而各接收节点在接收 Hello 命令帧时记录当前的 LQI 值。至此, 即可通过式(5)计算出当前节点到所有 1 跳范围内节点的链路代价, 并存入邻居表, 其格式如图 4 所示。

起始地址	结束地址	层次	跳数	链路代价
------	------	----	----	------

图4 邻居表

完成 1 跳内邻居的链路代价计算后, 为建立  $k$  跳内邻居的 TDLS 路由, 每个节点开始发送扩展 Hello 命令帧, 其帧负载格式如图 5 所示, 相对基本 Hello 命令帧添加了  $k-1$  跳内邻居地址及相应链路代价。

命令帧标识字	TTL	起始地址	结束地址	层次	Hello 控制	剩余能量	最远跳数 $k-1$
1 跳邻居数	.....	$k-1$ 跳邻居数	1 跳邻居地址	1 跳邻居对应代价	.....	$k-1$ 跳邻居地址	$k-1$ 跳邻居对应代价

图5 扩展 Hello 命令帧负载格式

于是, 收到扩展 Hello 命令帧的节点根据这些信息不但可以实时计算出 Hello 命令帧发送节点到本节点之间的链路代价  $L$ , 而且可以根据  $k-1$  跳内邻居的链路代价信息进一步扩展出  $k$  跳内邻居的链路代价。其扩展的过程是通过多跳链接矩阵遍历计算实现。

以图 6 所示的拓扑图为例。其中, 实线为树形连接, 虚线为网状连接。节点  $J$  收到了来自节点  $A$ 、 $B$ 、 $H$ 、 $K$  的扩展 Hello 命令帧, 即可利用如图 7 所示的多跳链接矩阵进行遍历计算, 其中, “1”、“2” 表示两节点之间的最优链路代价路由的跳数; “-” 表示两节点之间没有 2 跳以内的连接。

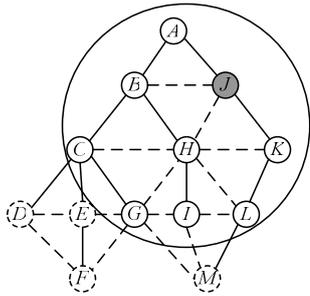


图6 节点拓扑图

	J	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M
J		1	1	2	-	-	-	2	1	2	1	2	-
A	1		1	2	-	-	-	-	2	-	2	-	-
B	1	1		1	2	2	-	2	1	2	2	2	-
H	1	2	1	1	2	2	2	1		1	1	1	2
K	1	2	2	2	-	-	-	2	1	2		1	2

图7 多跳链接矩阵

节点J收到的4个邻居节点的Hello命令帧包括了这4个节点所有2跳内邻居表，通过多跳链接矩阵利用遍历的方法就可以计算出节点J所有3跳内的邻居。例如，要建立节点J到节点D的路由，就可通过多跳链接矩阵找到节点B和节点H分别有一条到节点D的2跳路径，对应的链路代价分别为 $L(B,D)$ 、 $L(H,D)$ ，连同通过式(5)计算得到的节点J到节点B和节点H的链路代价 $L(J,B)$ 、 $L(J,H)$ ，进一步利用式(6)得到2种路由链路代价 $L(J,B,D)$ 和 $L(J,H,D)$ 。最终，将链路代价最小的路径选为路由，并连同链路代价存入邻居表。

EETDLS 具体的形成过程如图8所示，其中， $k_{set}$ 为预先设定的EETDLS路由的范围。

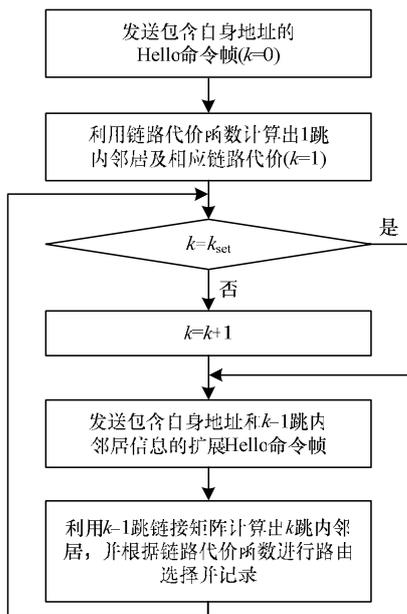


图8 k跳EETDLS路由形成过程

在k跳EETDLS路由形成后，需要路由时首先查看邻

居表中是否有目的节点的路由。若有，则直接发送至邻居表中的下一跳节点；若没有，则利用树状路由转发。

当网络工作一定时间以后，节点 $a_i$ 剩余能量低于了警戒值 $E_w$ ，此时能耗优化机制应该更大程度地保护这个“弱节点”，对节点 $a_i$ 启动转发避免机制，更大程度地延长其寿命。具体方法是将一切与节点 $a_i$ 直接相连的链路代价设为5，可用式(7)表示。

$$L(a_i, a_{nb}) = 5, L(a_{nb}, a_i) = 5 \quad (7)$$

其中， $a_{nb}$ 为节点 $a_i$ 的相邻节点。

综上，本文通过添加多跳能效链路代价函数计算和能量警戒转发避免机制实现了EETDLS路由。

### 4 验证与分析

本文基于专业网络仿真平台OPNET对前述双重能效优化设计进行仿真，主要验证网络寿命和能量均衡性的优化情况。在OPNET平台上，建立起基于EEAT与EETDLS路由的双重能效优化网络，并与基于AT与TDLS的原网络进行对比。

为体现LR-WPAN mesh网络在大规模网络上的表现，本文定义了一个根据网格形状分布的784个节点(28×28网格)的场景。其中，相邻的节点间横向和竖向的间距均为10m，信号的传输距离为12m。网络的MAC均采用IEEE 802.15.4协议<sup>[10]</sup>，使用非信标帧的模式，源和目的节点对是随机选择的，设定的其他网络变量参数如表1所示。

表1 仿真参数设置

参数	取值	参数	取值
空中数据传输率	250 Kb/s	$\eta$	0.1
物理帧长度	127 Byte	$\alpha$	0.6
发送频率	1 packet/s	$\beta$	0.3
$k_{set}$	4	$\gamma$	0.1

通过比较双重能效优化网络与原网络中的能量最小节点的能耗情况，来比较双重能效优化设计对能耗的改进情况。

本文提出的双重能效优化网络在网络寿命方面与原网络相比有明显优势。由图9可以看出，原网络中能量最小节点的能量衰减很快，网络没有针对节点实时的情况对自适应树和TDLS路由做出动态的调整。而双重能效优化网络虽然在网络初始阶段与原网络的能耗几乎相同，但随着能量的消耗，由于EETDLS路由中的链路代价函数会根据节点剩余能量等因素的变化动态选择链路代价最小的路由，网络会减少对能量最小节点的转发量，从而减少能量最小节点的能耗。而当节点能量达到警戒能量门限(10%)时，双重能效优化网络会进一步切换自适应树的拓扑并且在EETDLS中启动转发避免机制，于是能量最小节点被进一步保护，能耗进一步减少，使其能够延续更长的时间。

最终, 双重能效优化网络中的能量最小节点寿命是原网络能量最小节点寿命的 1.97 倍。

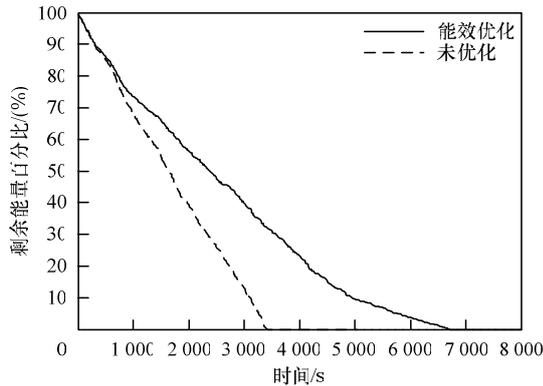


图9 能量最小节点的剩余能量百分比

观察在 2 500 s 时刻原网络与双重能效优化网络的能量消耗分布。对比图 10、图 11 可以看出双重能效优化网络的节点能量消耗更为均衡。原网络由于没有采用能效优化的设计, 自适应树中层数较低节点能量消耗很大, 而层次较高的外围节点能量消耗较少, 反映了明显的网络不均衡性。相对而言, 双重能效优化网络由于在 EEAT 以及 EETDLS 路由加入了能耗均衡的设计, 不同层次的节点能量差别没有那么明显, 因此达到网络相对的能耗均衡。

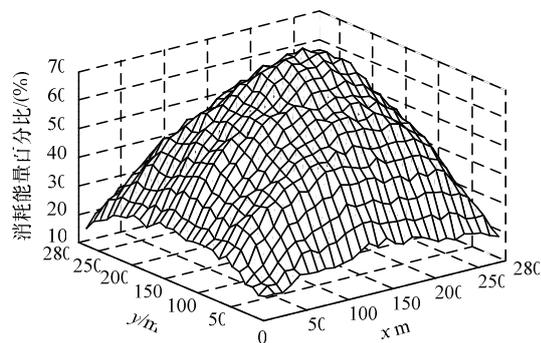


图10 原网络在 2 500 s 后的能量消耗情况

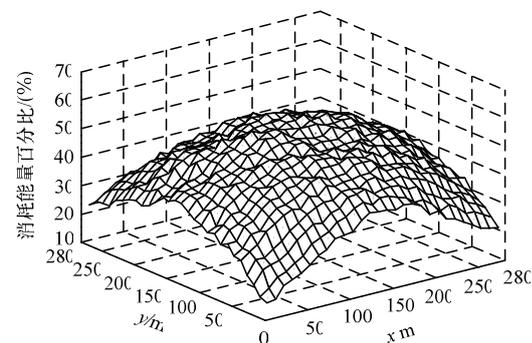


图11 双重能效优化网络在 2 500 s 后的能量消耗情况

## 5 结束语

本文提出了一种基于 EEAT 和 EETDLS 路由的双重能效优化方法。由于网络的拓扑结构和路由选择对网络的能耗影响较大, 因此本文利用父节点优选因子改进自适应树

的拓扑结构, 并利用链路代价函数对路由进行优化选择。仿真结果表明双重能效优化方法可以大幅延长网络寿命, 并使网络中各个节点的能量消耗更为均衡。下一步将研究如何完善双重能效优化设计的通信协议, 组建基于 2.4 GHz 无线节点的 LR-WPAN mesh 网络, 进一步验证双重能效优化设计的实用性。

## 参考文献

- [1] Li Jun, Bose A, Zhao Yiqiang. The Study of Wireless Local Area Networks and Wireless Personal Area Networks[C]//Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. Saskatoon, Canada: IEEE Press, 2005.
- [2] IEEE. IEEE Std 802.15.5-2009 IEEE Recommended Practice for Information Technology-telecommunications and Information Exchange Between Systems-local and Metropolitan Area Networks-specific Requirements Part 15.5: Mesh Topology Capability in Wireless Personal Area Networks(WPANs)[S]. 2009.
- [3] Lee M J, Zhang Rui, Zheng Jianliang. IEEE 802.15.5 WPAN Mesh Standard-low Rate Part: Meshing the Wireless Sensor Networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2010, 28(7): 973-983.
- [4] Lu Yeming, Wong V W S. An Energy-efficient Multipath Routing Protocol for Wireless Sensor Networks[C]//Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. Montreal, Canada: IEEE Press, 2006.
- [5] 王琛, 柴乔林, 王芳. 基于树形结构的 ZigBee 能量均衡协议研究[J]. 计算机工程与设计, 2009, 30(15): 3534-3536, 3586.
- [6] 江禹生, 任晶晶, 何芳. 基于多准则的无线网状路由由判据[J]. 计算机工程与应用, 2010, 46(28): 88-89, 97.
- [7] Lin Kai, Zhao Hai, Yin Zhenyu, et al. Energy Prediction and Routing Algorithm in Wireless Sensor Networks[J]. Journal on Communications, 2006, 27(5): 21-23.
- [8] 胡丹, 李士宁, 李志刚, 等. 无线传感器网络动态负载均衡树路由算法[J]. 计算机工程, 2009, 35(23): 91-94.
- [9] Srinivasan K, Levis P. RSSI is Under Appreciated[EB/OL]. [2012-05-12]. <http://www.eecs.harvard.edu/emnets/papers/levisEmnets06.pdf>.
- [10] IEEE. IEEE 802.15.4: Wireless LAN Medium Access Control(MAC) and Physical Layer(PHY) Specifications for Low-rate Wireless Personal Area Networks(LR-WPANs)[S]. 2006.