

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.09.007

太阳能无线传感器网络节点传输功率优化策略

刘丽萍¹,安新升¹,张 强¹,石高涛²

(1.天津大学 电气与自动化工程学院,300072 天津;2.天津大学 计算机科学与技术学院,300072 天津)

摘 要:针对最大化节点能量收集时间内的数据传输量问题,考虑太阳能驱动的无线传感器网络节点的能量收集特性,在数据已经到达的假设下,设计了环境能量驱动节点的前向-后向搜索(FBS)传输功率优化策略.该策略依据节点收集能量下降段平均值的判断,给出全局优化的各时刻节点的传输功率.最后以1990年美国洛杉矶(N33°,W118°)的光照辐射数据为依据,对算法进行了仿真分析.结果表明:前向-后向搜索传输功率优化策略在传输的数据量上优于能量即到即用(EUP)的传输方式;节点收集能量的时间越长,算法的优化效果越好.

关键词:太阳能驱动;无线传感器网络节点;传输功率;数据传输;优化策略

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)09-0036-06

Optimal transmission power scheduling on solar wireless sensor networks node

LIU Liping¹, AN Xinsheng¹, ZHANG Qiang¹, SHI Gaotao²

(1.School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, 300072 Tianjin, China;

2.School of Computer Science and Technology, Tianjin University, 300072 Tianjin, China)

Abstract: Considering the energy harvesting properties of solar-driven wireless sensor network node, an optimal transmission power scheduling policy was proposed aiming at maximizing data bits delivered by a deadline. Assuming data bits have arrived, the proposed forward-backward searching (FBS) transmission power policy established an optimal transmission power series. According to the average harvested energy estimate during the harvesting decreasing period, the method can provide a global optimal transmitting series. Simulation was made based on the solar radiation data of Los Angeles (N33°, W118°), America in 1990. The results show that FBS performs better than the energy used up (EUP) policy. The longer sensor node harvestes energy, the better FBS performs.

Keywords: solar-driven; wireless sensor network node; transmission power; data delivering; optimization strategy

能量有效性研究一直是无线传感器网络硬件设计、通信协议、上层应用优化方面的研究重点,受限且不可更换的能量供给模块极大地限制着无线传感器网络的应用进程.近年来,随着环境能量收集技术,如太阳能电池、振动电池、温差电池等的迅猛发展,在传感器节点中加入能量收集模块,给恶劣甚至人类无法到达环境中的无线传感网络发展带来了新的契机.文献[1-2]设计了获取太阳能的能量收集模块 Helimote,能够驱动 Bekerly /Crossbow 的传感器节点.文献[3]结合 Helimote 和 Trio 详细分析了传感器节点的环境能量收集模块的能量管理问题.

文献[4]提出了用 PCM 解决闪存耐用问题,通过调节 PCM 写入宽度,节点能够适应太阳能收集模块的电流 MPP,减少了电池的充放电周期,满足了无线传感器网络长期使用的需求.环境能量收集技术给无线传感网络的应用带来潜能的同时,环境的不确定性使得能量补充和消耗具有很大的随机性,也给原有网络的能效性优化带来很大的挑战.

数据传输是无线传感器网络最基本的功能,消耗了网络中的大部分能量.现有的无线传感器网络研究中,开展了很多高效的数据传输机制研究.考虑没有能量补给的情况下,文献[5]研究了数据包传输耗能最小化问题,在满足一定数据传输延迟的要求下,给出了通过改变数据包传输时间和节点发射功率以达到节能目的的懒惰调度方法(lazy scheduling algorithm, LSA);考虑数据随机到达的情况,文献[6]针对单传感器节点数据传输能耗问题,

收稿日期:2014-05-28.

基金项目:国家自然科学基金(61104208);天津市应用基础与前沿技术研究计划(13JCQJNC00800,12JCQJNC00200).

作者简介:刘丽萍(1979—),女,副教授.

通信作者:刘丽萍, lipingliu@tju.edu.cn.

结合数据接收的规律和传输速率与发射功率的凸函数关系,给出了满足 QOS(服务质量)的节能数据传输优化方法;考虑存在信道衰减的情况,文献[7]提出了满足数据包延时限制条件的能量有效离线回归算法,解决了存在信道衰减的数据传输的能量效率问题.然而,对于环境能量驱动传感器网络而言,能量的随时补充改变了原有的节点能量环境,也对现有的节点数据传输机制提出了挑战.文献[8]假设数据已经到达节点且能量收集信息已知的情况下,利用拉格朗日乘数法在理论上分析了单节点的数据传输优化问题,并设计了相应的数据传输策略;考虑数据包随机到达的情况,文献[9]提出根据数据包传输拥塞和能量收集情况改变传输速率的自适应传输策略,保证数据包的传输时间最小.文献[10-11]分别对两个数据传输序列的信道优化及两个数据终端的传输优化机制进行了理论分析.该类环境能量驱动传感器节点数据传输机制多是针对理想状况下进行了理论分析,考察传输机制的性能,需要结合真实应用环境的进一步进行分析验证.

本文拟针对环境能量驱动传感器网络,考虑太阳能供给能量的传感器节点的能量收集特点,以最大化固定时间 T 内节点传输的数据量为优化目标,建立了数据传输优化模型,研究太阳能驱动节点数据传输优化策略,并以 1990 年美国洛杉矶 ($N33^\circ, W118^\circ$) 的光照辐射数据^[12]为依据对优化策略进行分析验证.

1 系统模型

本文研究单个传感器节点传输数据的情况,假设数据在传输之前已经收集并随时可以传输,节点传输数据的能量消耗远远大于存储数据的能量消耗;节点获取的能量随环境随机变化,但获取的能量数量及时刻已知;节点在任意时刻收集的能量不会超过节点储能元件的储能范围,节点在 $t_1, t_2, t_3, \dots, t_N, t_{N+1}$ ($T = t_{N+1}$) 时间序列上完成能量的收集和数据的传输,其数据传输模型如图 1 所示.

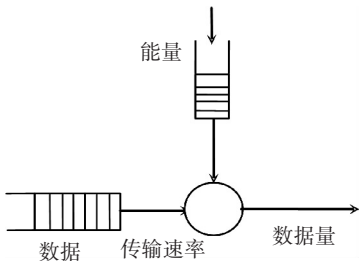


图 1 单节点数据传输模型

根据文献[8],传感器节点某一时刻以功率 p_{t_i} 传输数据,其传输速率 $R(p_{t_i})$ 为

$$R(p_{t_i}) = \frac{1}{2} \log(1 + hp_{t_i}). \quad (1)$$

其中 h 为信道的衰减系数.

当 h 一定时,节点在某时间段 L_{t_i} ($L_{t_i} = t_{i+1} - t_i$) 内以功率 p_{t_i} 持续传输数据,则传输的数据量 $B = L_{t_i} \cdot R(p_{t_i})$,节点所消耗的能量为 $E_{t_i} = L_{t_i} \cdot p_{t_i}$.考虑信道衰减平稳,即 h 固定的情况,在等时间间隔离散时间序列上,有能量的获取及数据的传输,能量的获取假设在 t_i 时刻完成,数据的传输在两个时间间隔内以一定的功率持续传输.本文假设两个相邻时刻的时间间隔均为 L ,如果在 $t_{i-1} \sim t_i$ 内有能量的获取,则 E_{t_i} 为 t_i 时刻获取的能量值,没有获取能量 $E_{t_i} = 0$.数据的传输功率在每个时刻点调整,对应的功率为 p_{t_i} ,持续以此功率发射 L 时长,如图 2 所示.

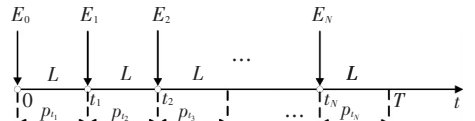


图 2 节点能量收集与数据传输序列模型

2 优化策略

2.1 优化模型

本文考虑时间 T 内的数据传输情况,将时间 T 划分为 N 个时间段,即 $T = NL$.节点在每个时间段的开始收集到的能量为 E_{t_i} , T 时间内节点最大数据量传输问题可表示为

$$\max \sum_{i=1}^N L \cdot R(p_{t_i}), \quad (2)$$

$$\text{s.t.} \quad \sum_{i=1}^K L p_{t_i} \leq \sum_{i=1}^K E_{t_i}, \quad K = 1, 2, \dots, N. \quad (3)$$

式(3)为数据传输过程中需要满足的条件, $K = N$ 时,式(3)满足等号成立,式(2)取得最大值.

对(2)式进一步展开,可得

$$\frac{NL}{2} \max_{\xi} \log \prod_{i=1}^N (1 + hp_{t_i}). \quad (4)$$

设数据传输功率序列的集合为 ξ ,最优功率序列 P ,则数据传输功率序列表示为

$$P = \arg \frac{NL}{2} \max_{\xi} \log \prod_{i=1}^N (1 + hp_{t_i}). \quad (5)$$

2.2 问题分析

假设每段传输时间 L 一定,信道衰减平稳, t_i 时刻的功率为 p_{t_i} 的情况下,由式(1)可知,信道容量及某段时间内传输的数据量也是 p_{t_i} 的凹函数,可以设计一种功率优化控制方法,使得在某一能量序列下某段时间 T 内传输的数据量最大.基于此,本文提出一种前向 - 后向搜索传输功率优化策略,根据节点

的能量收集情况,给出每一时刻节点传输数据所用的功率,使一定时间内数据传输量达到最大,提高节点数据传输效率.在给出具体的节点数据传输优化调度策略之前,根据问题的需要,引入以下引理.

引理 对于 $\sum_{n=1}^N x_n$ 为一定值的正数序列 $x_1, x_2, \dots, x_N$, 其乘积 $\prod_{n=1}^N x_n$ 获得最大值的充要条件是序列的方差最小(引入拉格朗日因子可证明引理).

对于太阳能驱动的无线传感器网络而言,节点每一个时间段 L 用于传输数据的能量序列为一正序列.由式(4)可知,获得 T 时间内节点传输的数据量最大化的数据传输过程可以转化为求解这一序列的乘积最大值的优化问题.根据节点获取能量过程的特点,本文给出以下推论,作为前向-后向搜索优化算法的策略依据.

推论 1 节点获取的能量序列随时间呈递减趋势时,节点在该段时间内用于数据传输的功率均为 $\bar{E}/L$ 时,该段时间内节点传输的数据总量最大.其中 $\bar{E}$ 为该时间段内节点获取能量的平均值, L 为此段时间的长度.

证明 图 3 为节点获取能量随时间递减的示意图.根据引理可知,当 $p_{t_1} = p_{t_2} = \dots = p_{t_N} = \bar{E}/L$ 时, p_{t_i} 序列的方差最小,节点在时间段 T 上传输的数据量最大.

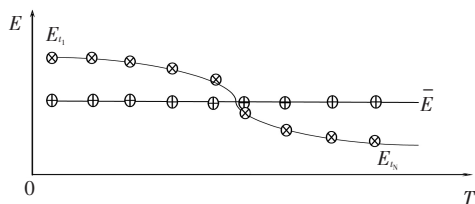


图 3 节点获取的能量随时间递减

$$\delta' = \sqrt{\sum_{t_x \in A} \left(\frac{\sum_{m=1}^N (p_{t_x}' - p_{t_m})^2}{N} \right) + \sum_{t_y \in B} \left(\frac{\sum_{m=1}^N (p_{t_y}' - p_{t_m})^2}{N} \right) + \sum_{t_l \in \Gamma} \left(\frac{\sum_{m=1}^N (p_{t_l} - p_{t_m})^2}{N} \right)} = \sqrt{\delta^2 - \sum_{t_x \in A} 2\Delta_{t_x} p_{t_x} + \sum_{t_y \in B} 2\Delta_{t_y} p_{t_y} + \sum_{t_x \in A} \Delta_{t_x}^2 + \sum_{t_y \in B} \Delta_{t_y}^2}. \quad (7)$$

考虑到只有 $x < y$ 时, t_x 时刻的能量才能保留至 t_y 时刻利用,则有 $\delta' > \delta$, 故若有能量传递,式(2)会减小,即当节点收集的环境能量随时间序列呈递增趋势时,在每个时间间隔内消耗掉该时刻初期的能量时,整个时间段内节点传输的数据量最大.

2.3 算法描述

在环境能量驱动的无线传感器网络中,传感器节点收集的能量很少存在单调的情况,多以波动的形式

推论 2 节点获取的能量序列随时间呈递增趋势时,节点在 $t_i \sim t_{i+1}$ 内以功率 $p_{t_i} = E_{t_i}/L$ 传输数据时,在整段时间内传输的数据量最大.

证明 图 4 为节点获取的能量随时间呈递增趋势的示意图.当节点在时间段 $t_i \sim t_{i+1}$ 内将 t_i 时刻获取的能量全部用完时,即 $p_{t_i} = E_{t_i}/L$ 时,则在整个时间内,这样的传输功率形成一个功率序列,这些功率序列的方差为

$$\delta = \sqrt{\sum_{i=1}^N (p_{t_i} - \bar{p})^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[\frac{\sum_{j=1}^N (p_{t_i} - p_{t_j})^2}{N} \right]}. \quad (6)$$

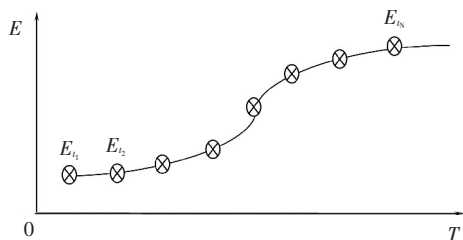


图 4 节点获取的能量随时间递增

假设存在 t_x 时刻的能量有存在用完保留到 t_y ($x < y$) 时刻使用的情况,此时对应 t_x 时刻用于传输数据的功率为 p_{t_x}' , t_y 时刻的传输功率为 p_{t_y}' , 设保留能量的时刻序列为 $A = \{t_x \mid p_{t_x} < \frac{E_{t_x}}{L}\}$, 相应时刻保留的能量为 Δ_{t_x} , 接受能量的时间序列为 $B = \{t_y \mid p_{t_y}' > \frac{E_{t_y}}{L}\}$, 相应时刻接受的能量为 Δ_{t_y} , 设能量不变化的时刻序列为 $\Gamma = \{t_l \mid p_{t_l} = \frac{E_{t_l}}{L}\}$, 显然,存在式子 $\sum_{t_x \in A} \Delta_{t_x} = \sum_{t_y \in B} \Delta_{t_y}$ 成立. 此时的功率序列的方差为

存在. 太阳能的收集受到温度、光照的影响,能量收集曲线类似正弦函数曲线.从节点能量收集的实际情况出发,基于以上引理和推论,本文给出太阳能驱动传感器网络节点的数据传输功率优化策略——前向-后向搜索优化算法.基于推论 1,找出能量收集曲线中的下降段,并求此段收集的能量的平均值;并考察下降段前一时刻和后一时刻节点收集的能量值,如果下降段前一时刻收集的能量大于平均值,或下降段后一

时刻收集的能量小于平均值,将此刻加入下降到下降段的时间序列中,更新能量的平均值,继续前向、后向搜索,更新平均值,直至最后的“下降段”的前一时刻能量小于等于平均值,并且“下降段”后一时刻能量大于等于平均值停止;按下降段出现的先后依次用此方法处理,最终处于“下降段”中的时刻用于数据传输的能量为相应的平均值,未经过处理的时刻用于数据传输的能量为此刻获得的能量,形成新的能量序列。最后,根据传输功率与传输能量之间的关系得到优化的节点传输功率序列。前向-后向搜索传输功率优化策略的伪代码分为

1) **Initialize**: get the initial power sequence

$$[p_{t_i}] \leftarrow \left[\frac{E_{t_i}}{L} \right]$$

find the decreasing segments and index

them as: $[t_{n_1}, t_{m_1}]$, $[t_{n_2}, t_{m_2}]$, $\dots$, $[t_{n_z}, t_{m_z}]$

2) **For** $x \leftarrow 1$ to z

do get the average energy of the

decreasing segment x as $\bar{E}_x$

While $\bar{E}_x < E_{t_{n_x}-1}$

do enlarge decreasing

boundary $n_x \leftarrow n_x - 1$ and

update average energy $\bar{E}_x$

While $\bar{E}_x > E_{t_{m_x}+1}$

do enlarge decreasing

boundary $m_x \leftarrow m_x + 1$ and

update average energy $\bar{E}_x$

End while

End while

For $i \leftarrow n_x$ to m_x

do update energy of t_i time

slot $E'_{t_i} \leftarrow \bar{E}_x$ and update

power of t_i time slots $p_{t_i} \leftarrow \frac{E'_{t_i}}{L}$

End for

End for

3) **Return** $[p_{t_i}]$

3 仿真与分析

3.1 仿真结果

根据美国 NREL (national renewable energy laboratory) 官方网站公布的部分地区太阳能辐射量的统计信息,本文以 1990 年美国洛杉矶 (N33°, W118°) 1990 年 8 月 1 日—8 月 5 日的光照辐射数据^[12]为依据,数据记录了全天每隔 1 h 的光照信息,考虑到节点能量存储损耗和一段时间内太阳能

驱动的传感器节点收集的能量与太阳能辐射成一定的比例关系,假设从太阳能能量最终转换为可利用电能的效率为 10%,节点安装太阳能电池板面积 4 cm^2 ,节点间的距离为 $75 \sim 100 \text{ m}$ 。太阳能辐射量随时间变化有一定的随机性,但又有一定的周期性,在每天的 12 时左右达到最高值,夜间太阳的辐射量为 0,节点收集的能量如图 5 所示。此外,本文假设信道衰减平稳 ($h = 1$),带宽为 250 kHz ,并以 1 h 为一个时间间隔 ($L = 3600 \text{ s}$),从 8 月 1 日 0 时—8 月 5 日 24 时,共计 120 h ,对提出的前向-后向搜索传输功率优化策略进行了仿真。

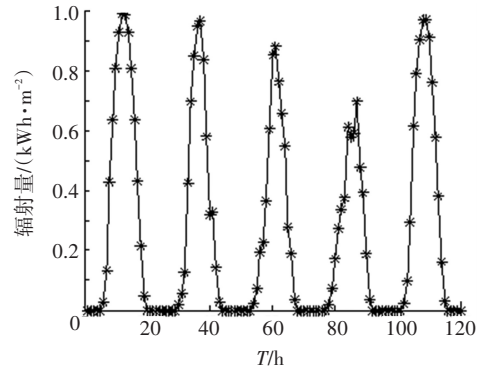


图5 节点收集的能量

为研究算法的性能,针对图 5 的能量收集情况,本文将提出的前向-后向数据传输功率优化策略与能量收集来即在下一时间段 L 全部用于数据传输的“能量即来即用”(energy used up, EUP)的数据传输方式

(其传输功率 $p_{t_i} = \frac{E_{t_i}}{L}$) 进行比较,图 6 显示,EUP 传

输方式下,节点的传输功率与节点获取的能量变化趋势一致;而前向-后向数据传输功率优化策略下节点的传输功率在 T 时间内随时间呈阶梯上升趋势,并且在 $8 \sim 103 \text{ h}$ 时间内保持恒定值。随着后期 $105 \sim 120 \text{ h}$ 时间内节点获取的平均能量值的增加,在该时间段内传输功率为 10.34 mW 不变。两种方法相应的节点传输数量如图 7 所示,在能量收集最初的 25 h 内,EUP 的传输方式将收集来的能量全部用于数据传输,而本文提出的前向-后向搜索传输功率优化策略为保证优化,将该段时间的能量存储起来用于后期能量收集量低的时间段,因此这段时间内前向-后向搜索传输功率优化策略在传输的数据量上小于 EUP 的数据传输方式。在 $40 \sim 120 \text{ h}$ 时间内,前向-后向搜索传输功率优化策略在传输的数据总量上多于 EUP 的数据传输方式;而在 26 h 和 40 h 时刻两者的数据传输量相等,也是由于在前向-后向搜索传输功率优化策略分别保留了 $8 \sim 17 \text{ h}$ 和 $33 \sim 39 \text{ h}$ 时间段的能量供后期传输数据使用的缘故。前向-后向搜索传输功率优化策略是

一个全局优化策略,从整个时间来看其传输的数据量远远优于 EUP 的数据传输方式,随时间的延长优化效果越来越明显,表明策略在长时间的数据传输方面优势尤为突出.

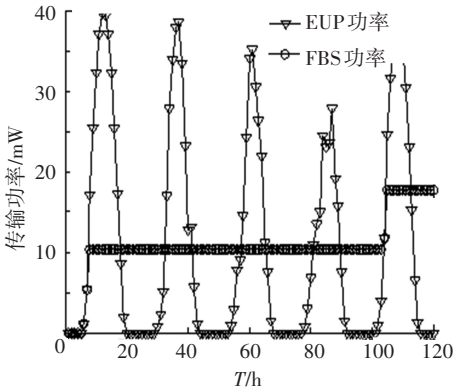


图 6 节点的数据传输功率优化后的功率序列

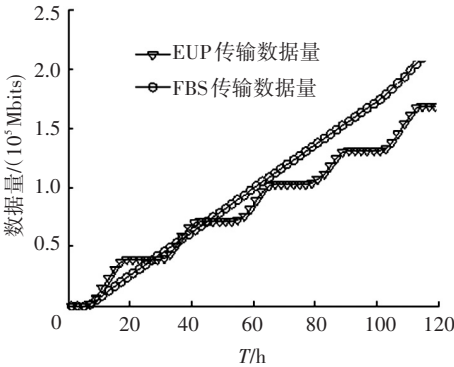


图 7 节点传输的数据量对比

3.2 算法性能分析

前向-后向搜索传输功率优化算法为全局优化算法,由前面的分析可知,节点从环境中收集能量的情况和收集时间 T 对节点的传输功率有很大的影响. 本节将针对这个两个因素对算法进行性能分析.

3.2.1 节点能量收集情况对节点传输功率的影响

节点收集的能量具有很大的随机性,与能量收集装置以及所在的环境有直接相关. 由 2.2 节算法分析可知,前向-后向搜索传输功率优化策略是基于对节点能量收集过程中下降段平均能量收集值的判断进行的. 为研究算法的性能,本文节点收集能量过程中能量呈下降趋势整段的平均值随时间的变化可分为上升型(如图 8 所示)和下降型(如图 9 所示),对于上升型能量收集曲线,利用前向-后向搜索优化法优化之后,用于数据传输的功率值,会形成多个等级并且呈递增趋势,如图 10 所示;对于下降型的能量收集曲线,最终形成一个或两个能量等级,如图 11 所示.

3.2.2 能量收集时间 T 对节点传输功率的影响

随着节点收集能量的时间 T 的变化,能量收集曲线中的下降段数也会相应变化. 考虑到算法为全

局优化算法,节点的传输功率会随时间作适当调整. 本文考察了 8 月 1 日—8 月 3 日 ($T = 72\text{ h}$) 和 8 月 1 日—8 月 4 日 ($T = 96\text{ h}$) 时节点传输功率的变化情况,如图 12、13 所示, 其中图 12 显示在前 72 h 内.

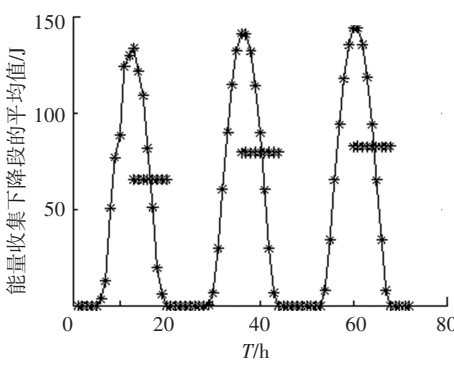


图 8 节点收集能量下降段平均值呈上升趋势

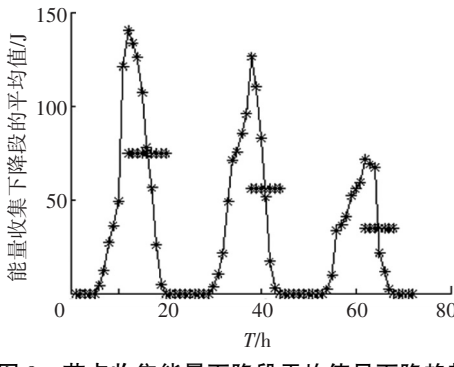


图 9 节点收集能量下降段平均值呈下降趋势

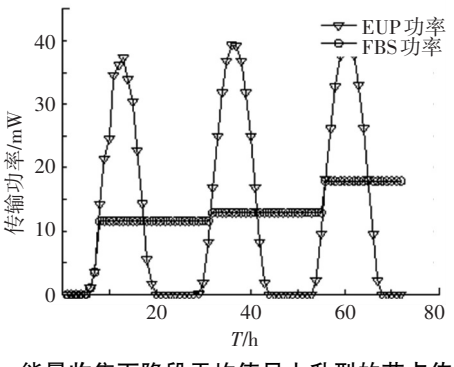


图 10 能量收集下降段平均值呈上升型的节点传输功率

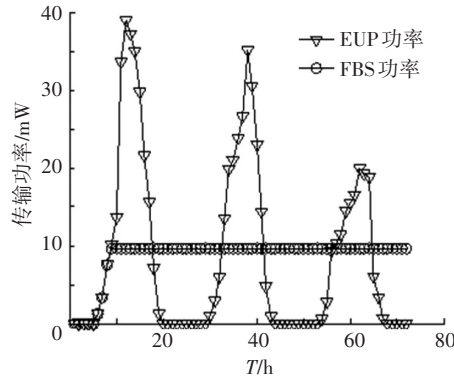


图 11 能量收集下降段平均值呈下降型的节点传输功率
节点的传输功率基本维持在 3 个等级,分别为 0、11.75、13.82 mW;图 13 显示在 $T = 96\text{ h}$ 的优化效果中,

由于后期 62~78 h 时间段内收集的能量平均值小于前一段能量的平均值,即出于优化的需要,前面时刻的能量需要留到后期使用,进而使得两个时间段上节点的传输功率降低,最终也形成 3 个功率等级,分别为 0、11.03、11.44 mW。保证在整个时间内数据量传输的最大化,体现本文提出的前向-后向搜索传输功率优化算法在解决长时间数据传输问题的优势。

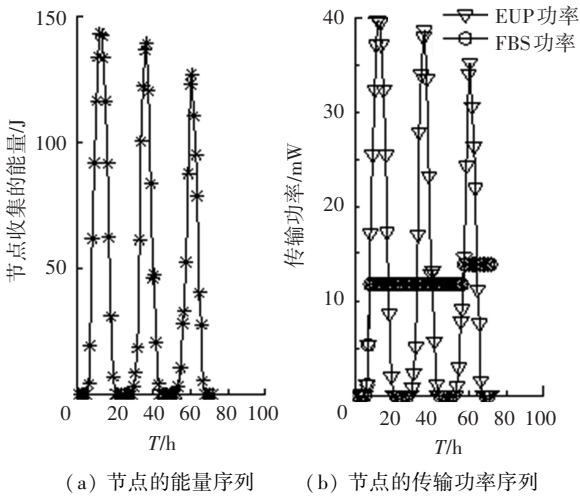


图 12 $T=72\text{ h}$ 时,节点获取能量及传输功率

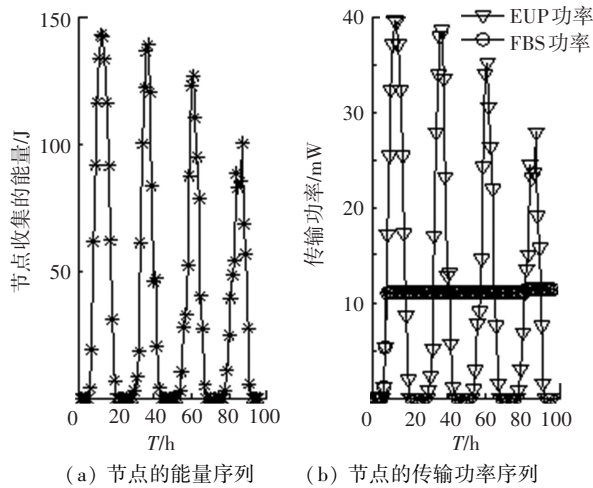


图 13 $T=96\text{ h}$ 时,节点获取能量及传输功率

4 结 论

1) 对太阳能驱动的单个传感器节点的数据传输机制进行了研究,以固定时间 T 内节点的最大数据传输量为优化目标建立了数据传输优化模型,并针对节点收集能量的变化趋势对算法进行了分析,提出了前向-后向搜索传输功率优化的全局优化方法,给出能够使得 T 时间内节点传输数据量最优的各个时刻的传输功率序列。

2) 以 1990 年美国洛杉矶 ($N33^{\circ}$, $W118^{\circ}$) 的光照辐射数据为依据,对算法进行了仿真,结果表明:前向-后向搜索传输功率优化策略在传输的数据量上优于“能量即到即用”的传输方式,节点收集能量

的时间越长,算法的优化效果越好。

参考文献

[1] JIANG Xiaofeng, POLASTRE J, CULLER D. Perpetual environmentally powered sensor networks [C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles: IEEE, 2005:463-468.

[2] RAGHUNATHAN V, KANSAL A, HSU J. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems [C]//Fourth International Symposium on Information Processing in Sensor Networks. Los Angeles: IEEE, 2005:457-462.

[3] JAEIN J, JIANG Xiaofeng, CULLER D. Design and analysis of micro-solar systems for wireless sensor networks [C]//5th International Conference on Networked Sensing Systems. Kanazawa:IEEE, 2008:181-188.

[4] ZHOU Ping, ZHANG Youtao, YANG Jun. The design of sustainable wireless sensor network node using solar energy and phase change memory [C]//Design, Automation & Test in Europe Conference & Exhibition. Grenoble:IEEE, 2013:869-872.

[5] UYSAL-BIYIKOGLU E, PRABHAKAR B, EI GAMAL A. Energy-efficient packet transmission over a wireless link [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2002, 10 (4):487-499.

[6] ZAFER M A, MODIANO E. A calculus approach to energy-efficient data transmission with quality-of-service constraints [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2009, 17 (3):898-911.

[7] CHEN Wangshi, MITRA U, NEELY M J. Energy-efficient scheduling with individual delay constraints over a fading channel [C]//5th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks and Workshops. Limassol:IEEE, 2007:1-10.

[8] OZEL O, TUTUNCUOGLU K, YANG Jing. Resource management for fading wireless channels with energy harvesting nodes [C]//2011 Proceedings IEEE INFOCOM. Shanghai:IEEE, 2011:456-460.

[9] YANG Jing, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in an energy harvesting communication system [J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60 (1):220-230.

[10] YANG Jing, OZEL O, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in a broadcast channel with an energy harvesting transmitter [C]//2011 IEEE International Conference on communications. Kyoto:IEEE, 2011:1-5.

[11] YANG Jing, ULUKUS S. Optimal packet scheduling in a multiple access channel with rechargeable nodes [C]//2011 IEEE International Conference on communications. Kyoto:IEEE, 2011:1-5.

[12] NREL. National solar radiation data base 1961-1990 [DB/OL]. [2013-12-20]. http://rredc.nrel.gov/solar/old_data/nsrdb/1961-1990.