

无线传感网络节能跨层调度算法^①

张忠厚, 赵 龙

(辽宁工程技术大学 理学院, 阜新 123000)

摘 要: 由于无线传感网络中节点能够携带能量的有限, 且能量补充复杂, 所以如何高效利用无线节点的能量是无线网络面临的首要挑战。为解决上述问题, 通过分析无线传感网络的特点和其能量损耗模型, 提出了一种高效节能的跨层调度算法, 仿真结果表明, 算法能够很好的节约能量, 同时降低数据传输延迟, 最大化无线传感网络的生存时间。

关键词: 无线传感器网络; 节能; 跨层调度; 网络生存时间

Energy-Efficient Cross-layer Scheduling Algorithm Based on WSN

ZHANG Zhong-Hou, ZHAO Long

(College of Science, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: As the WSN nodes are limited in energy, and energy supplement is very complex, so how to use energy of the wireless node efficiently is the primary challenge faced by the WSN. In order to solve the problem proposed above, by analyzing the characteristics of WSN and its energy loss model, we propose a cross-layer energy-efficient scheduling algorithm. Simulation results are computed and the results are shown. The algorithm can save energy consumption efficiently and reduce data transmission delay. At the same time, the algorithm is able to prolong the lifetime of WSN.

Key words: WSN; energy-efficient; cross-layer scheduling; network lifetime

无线传感网络是随着无线通信技术、计算机网络技术和传感器技术的迅速发展而兴起的一种多学科高度交叉的前沿研究领域, 具有巨大的发展前景^[1]。但是由于传感节点的体积微小, 携带电池的能量有限, 且传感节点个数多、部署区域环境复杂, 有些地方甚至人员不能到达, 所以通过更换电池来为传感节点补充能源是不现实的。所以如何高效使用能量来最大化网络生命周期是传感网络面临的首要挑战。为解决上述问题, 本文通过分析无线传感网络的特点, 提出了一种基于无线传感网络的节能跨层调度算法, 并给出了仿真分析。

无线传感网络特点

无线传感网络集中了监测、控制以及无线通信的等功能。与其它无线网络相比, 无线网络节点数目庞大, 节点分布密集, 节点更容易出现故障, 这就造成

了网络拓扑结构的变化。另外, 传感节点具有的能量、处理能力、存储能力都十分有限。所以, 无线传感器网络首要目标是能量的高效利用, 这也是和传统无线网络重要的区别之一^[2]。

采用跨层节能算法的必要性

为了寻求一种能够充分利用能量的无线传感网络协议, 很多学者进行了大量的研究。但是, 许多研究过于关注无线传感器、网络的单个层面, 忽略了网络的整体性能和不同层之间协同工作的重要性。另外, 无线传感网络是一种面向应用的无线网络, 采用严格的分层算法和通用的通信协议, 会导致执行效率降低和资源的严重浪费。因此, 无线传感网络的节能算法需要统观全局跨层进行考虑, 不能孤立地对每层进行设计。此外, 上层协议应尽量避免执行下层协议已实现的功能来减少能量消耗^[3]。

① 收稿时间:2011-11-13;收到修改稿时间:2011-12-26

跨层协议栈不是完全推翻原有的分层协议栈，而是在原有分层协议的基础上集成跨层设计方法，每个层都可以利用其他层的信息来提高系统的整体性能。因此，跨层设计不仅可以减少整个协议栈消耗的能量，还可以提高无线传感网络的应用性能^[4]。

1 能量消耗模型

本文采用虚拟 MIMO 系统作为基本模型对无线传感网络的能量消耗进行数学分析。首先假设系统的传输信道衰落服从平坦的瑞利分布，在模型中，系统的信道增益为一个标量，传输路径的平均损耗与传输距离的平方成反比^[5]。由此可知，信息通过网络的第 i 级传输第 j 级时 ($j > i$)，在第 j 级的接收功率为^[6]：

$$P_{ij}^r = \frac{P_{ij}^o}{G_o d_{ij}^2} \quad (1)$$

其中， P_{ij}^r 为第 j 级的接收功率， P_{ij}^o 为第 i 级的发射功率， G_o 为传输每单位长度的功率损耗系数， d_{ij} 为从第 i 级到第 j 级的传输距离。将第 j 级的接收功率以每比特信息接收能量的形式表示如下：

$$P_{ij}^r = \overline{E}_b b_{ij} B \quad (2)$$

式中 \overline{E}_b 为信道中每比特信息消耗能量， b_{ij} 为每符号所含的信息比特数， B 为系统带宽。则由式(1)和(2)可得

$$P_{ij}^o = \overline{E}_b b_{ij} G_o d_{ij}^2 B \quad (3)$$

信息由第 i 级发送到第 j 级损耗的发射功率为

$$P_{ij}^o = (1 + \alpha) \overline{E}_b b_{ij} G_o d_{ij}^2 B \quad (4)$$

其中 α 为功率放大器功率损耗因子。那么信息从第 i 级传输到第 j 级的功率损耗可作如下表示

$$P_{ij} = P_t^i + P_t^j + P_r^j \quad (5)$$

其中 P_t^i 为发送端第 i 级的电路功率损耗，可表示如式(6)所示，式中 N_i 为协作发送节点的数目。

$$P_t^i = N_i (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt}) + P_{sym} \quad (6)$$

P_r^j 为发送端第 j 级的电路功率损耗，可表示如式(7)所示，式中 N_j 为协作接收节点的数目。

$$P_r^j = N_j (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filt} + P_{ADC}) + P_{sym} \quad (7)$$

则可得

$$\begin{aligned} P_{ij} &= (1 + \alpha) \overline{E}_b b_{ij} G_o d_{ij}^2 B \\ &+ N_i (P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt}) \\ &+ N_j (P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filt} + P_{ADC}) \\ &+ 2P_{sym} \end{aligned} \quad (8)$$

令

$$P_T = P_{DAC} + P_{mix} + P_{filt} \quad (9)$$

$$P_R = P_{LNA} + P_{mix} + P_{IFA} + P_{filt} + P_{ADC} \quad (10)$$

则有

$$P_{ij} = (1 + \alpha) \overline{E}_b b_{ij} G_o d_{ij}^2 B + N_i P_T + N_j P_R + 2P_{sym} \quad (11)$$

假设系统采用时分多址传输，且源节点有 L_1 个信息包产生，此时无线传感器网络的能量优化问题可描述如下

$$\begin{aligned} \min \sum t_{ij} P_{ij} \\ S.T. \sum t_{ij} \leq T, 2 \leq b_{ij} \leq b_{maxij} \end{aligned} \quad (12)$$

式中， t_{ij} 表示信息由节点 i 到节点 j 的传输时间， P_{ij} 表示信息由节点 i 到节点 j 的全部功率损耗， $\sum t_{ij} P_{ij}$ 表示信息由源节点传输到目的节点所经过的所有链路消耗能量之和，即无线传感器网络完成一次信息传输消耗的总能量； $\sum t_{ij}$ 为所有链路传输时间总和， b_{ij} 为节点 i 到节点 j 的通信链路上每个符号所含比特数， b_{maxij} 是节点 i 到节点 j 的通信链路上每个符号所含最大比特数。第一个约束条件为网络传输时延应该小于总传输时隙 T ，第二个约束条件为节点发送每个符号所含的信息比特数限制^[7]。

2 算法描述

在无线传感器网络中，如何高效使用传感器节点的能量是所有无线传感网络协议设计的首要出发点。但仅考虑一个节点的能耗却有局限性，要保证整个网络的长时间通信必须保证网络整体节点的能耗。下面就如何延长网络的生存时间给出了一个具体的设计方案。在本算法中，结合 MAC 层协议、应用层和路由层提出了一种高效节能的跨层调度算法。其基本思想如图 1 所示。跨层调度算法同时考虑系统的应用类型和路由协议设计，并结合网络层所提供的信息，高效的控制节点的睡眠时间，减少因睡眠导致的数据延迟。

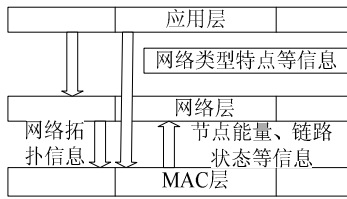


图 1 跨层调度算法的基本思想

在传统的路由协议中，传输过程中节点的最小跳数或最小能量消耗通常被作为传统路由协议的设计依据。在无线传感网络传输过程中，当中继节点与目的节点之间的信道质量降低时，在传统的分层设计中，源节点并不清楚这一状况，仍需要中继节点对来自源节点的数据进行接收并转发，当中继节点接收到来自源节点的数据后，由于其与目的节点之间的信道质量下降的原因，目的节点可能很长时间接收不到来自源节点的数据，这就导致了系统时延的增大。另外，当重传次数达到一定程度时，数据包可能被丢弃。采用跨层协议后，中继节点自己与目的节点之间的信道质量下降后，对自己的路由信息进行更新，并在收到源节点发送来的 RTS 包后，通过 CTS 将这一信息反馈给源节点。源节点在收到这一信息后，判断如果这种情况已达到系统设定的链路状态门限值 linkErTh 后，会将这一信息写入网络状态信息，并刷新路由以选择更高效的路径，而不是在到达中继节点之后选择改变后的低效路径转发。接收节点收到 RTS 后，如果当前节点不适合做中继节点，需要回复 CTS 通知发送节点当前状态，修改的 CTS 帧，在 CTS 帧的最后一个字段加入能量信息，使源节点实时了解到中继节点的能量信息。在中继节点能量偏低的时候，适当的选择其他路径转发数据。这样不至于出现中继节点能量耗尽后才使用其它节点转发的情况。

在路径选择策略上，我们采用如下方案：

在路由表的每条路径上都加上一个权值和每条路径下一节点的能量级别，权值用于说明当前路由协议选择当前路径的优先程度，能量级别则对应中转节点当前能量信息。

假设系统定义节点路由级别为 $PriLv_1, PriLv_2, \dots, PriLv_n$ ，能量级别为 $EngyLv_1, EngyLv_2, \dots, EngyLv_n$ ，路由级别最初由路由协议建立，当网络运行中链路状态发生变化时，其级别会一定程度的受到影响。

路由选择算法如图 2 所示，采用这种机制一定程度上改善了数据传输延迟的问题，当发现链路状态出现问题后，源节点能够在数据包到达出现问题的节点之前选择备用路由，提高了系统的效率。

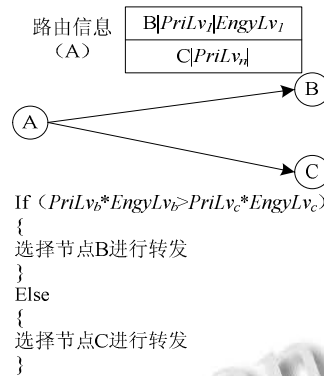


图 2 路径选择

在数据链路层 MAC 协议中，将应用层提供的网络约束条件和网络层提供的网络拓扑、路由信息加以利用。在网络建立初始化阶段，以应用层提供的网络约束条件为依据，建立一个初始的节点初始状态等数据，转发数据时，MAC 层利用网络层提供的数据，决定转发路径时会了解到转发路径上附近的几个节点的信息，在数据传送时可以适时地将节点唤醒，以提高数据包的转发效率，降低数据包的延迟^[8]。

具体描述如下：节点在发送 RTS 或回传 CTS 时，其邻居节点会在其通信结束后醒来，而 MAC 层在共享网络层信息之后，通过获取路由信息，如果节点的发送队列为空，则可直接在回传 CTS 时标明下一跳的地址，非下一跳地址的节点可以直接转入睡眠状态。同时，在 CTS 标明的目标节点需要继续发送 PTS (prepare-to-send)，直到 Sink 节点。

在节点发送 RTS/CTS 中带有目标地址，目标节点在持续时间结束后唤醒并进行数据转发，其他节点可以依然保持睡眠模式。节点进入睡眠状态需满足如下条件^[3]：

- 1) 节点处于空闲状态，消息队列为空；
- 2) 节点在收到 RTS/CTS 后，目标地址不是自己，且节点发送队列为空；
- 3) 节点收到 RTS，但剩余能量不足以满足发送本次数据量；
- 4) 节点收到 PTS 后，如果消息队列为空。

数据通路只在源节点建立一次，通过共享网络层路径信息的方式，使通信链路上节点适时的唤醒并进行正常通信，其他无关节点进入睡眠状态，节省能量。

3 仿真分析

本文采用 Omnet++ 作为仿真平台，对网络节点的平均能耗、数据包的延迟和网络的生命周期进行了分析，仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

| 参数 | 数值 |
|----------|--------|
| 带宽 | 20kbps |
| SYNC窗口大小 | 31 |
| 数据窗口大小 | 63 |
| 时隙长度 | 1ms |
| 初始能量 | 100J |
| 侦听功率 | 0.2W |
| 接收功率 | 0.2W |
| 传输能量 | 0.3W |
| 睡眠时间 | 0.001W |

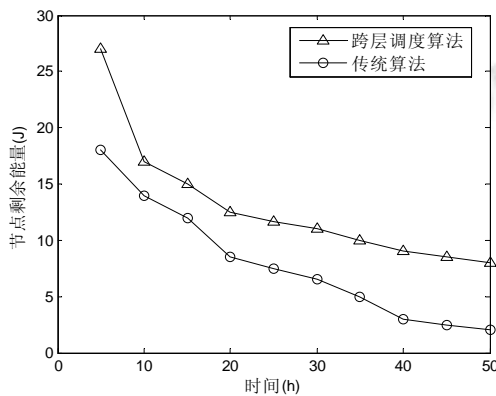


图 3 节点能量剩余对比图

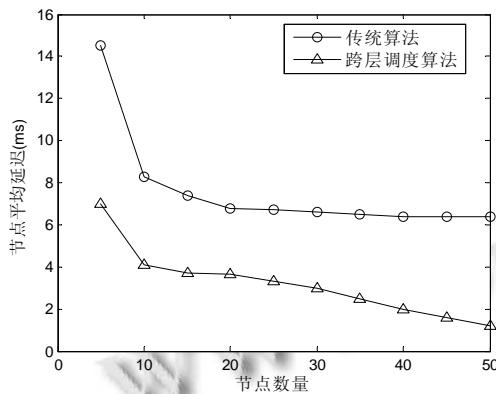


图 4 数据包延迟对比图

图 3~图 5 分别给出网络节点的平均能耗、数据包的延迟和网络的生存时间的性能曲线，与传统算法相比，论文中所提出的算法能够明显的减低网络节点的平均能耗，缩短数据包的传输时延，并延长了整个网络的生存时间。

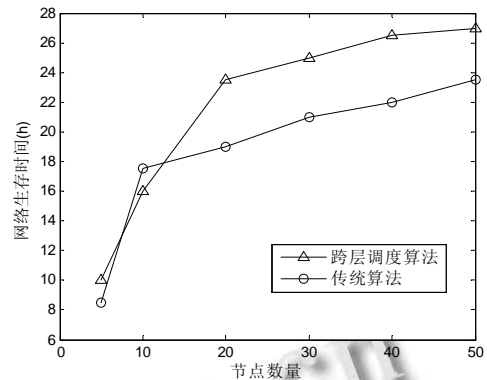


图 5 网络生存时间对比图

4 结论

无线传感网络作为近些年无线通信研究热点之一，由于其自身携带能量有限且能量不能及时得到补给而使其生存时间缩短。本文通过对无线传感网络的能量消耗模型进行分析，提出了一种节能高效的跨层调度算法，通过仿真分析可知，算法能够有效的降低无线传感网络中节点的平均能耗，并且改善的数据传输过程中的延迟，延长了整网的生存时间。

参考文献

- 1 Estrin D, Govindan R, Heidemann J, et al. Next century challenges: Scalable coordination in sensor networks. Proc. of MOBICOM'99. Seattle, Washington, 1999.
- 2 陈立伟, 罗云. 实时无线传感网络的跨层调度设计. 计算机工程与设计, 2005, 26(10): 2630-2633.
- 3 范清峰. 无线传感网络跨层设计. 济南: 山东大学, 2009.
- 4 方倩, 赵晓群. 无线传感网络的安全地理位置跨层协议. 传感技术学报, 2008, 21(5): 841-845.
- 5 徐楠, 孙亚民, 于继明等. 无线传感器网络中基于尺度的系统中继跨层 QoS 路由算法. 中国工程科学, 2011, 13(3): 45-49.
- 6 许倩倩. 无线传感网络的跨层设计优化方法. 西安: 西安电子科技大学, 2010.
- 7 杨凤, 李强, 朱灵波. 一种无线传感器网络跨层能量模型及其能耗计算. 计算机工程与应用, 2008, 44(2): 172-176.
- 8 王罗, 李云, 刘占军, 等. 一种基于跨层优化的低延迟无线传感器网络 MAC 协议. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2007, 19(5): 622-626.