

联合能量路由和睡眠调度算法的分析与改进

孙 宏*, 张曦煌

(江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122)

(*通信作者电子邮箱 jn_sunhong@gmail.com)

摘 要:为最大化链路负载小,并对时延有要求的无线传感器网络(WSN)的生存时间,对联合路由和睡眠调度的IGP算法进行了分析与研究,提出了改进算法。改进算法统计节点一段时间内收发的数据包数和空监听周期数,根据统计结果计算使工作功率最小时的节点睡眠时间,设置此时间为该节点下一时间段的睡眠时间,最后将该功率传递给它的邻接节点。节点用保存的邻接节点的工作功率预测邻接节点的剩余能量,根据预测的剩余能量进行能量路由选择。理论分析及模拟实验表明,改进算法使网络生存时间延长了23%左右,并减少了网络时延。

关键词:无线传感器网络;生存时间最大化;能量均衡;调度算法;能量使用效率

中图分类号: TP393; TN915.07 **文献标志码:** A

Analysis and improvement of joint routing and sleep scheduling algorithm

SUN Hong*, ZHANG Xihuang

(School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi Jiangsu 214122, China)

Abstract: To maximize the lifetime of Wireless Sensor Network (WSN) with small link load and less network delay, the Iterative Geometric Programming (IGP) algorithm of joint routing and sleep scheduling was analyzed and researched, and an improved algorithm was proposed. The improved algorithm counted the packets sent and received by the node and the number of idle cycles for a period of time. According to the record, sleep time which made the node work power smallest was calculated, and then the time was set as the node sleep time for next period. Last, the work power was transmitted to its adjacent nodes and the node residual energy was forecasted. Therefore, the energy route selection was done. The experimental results show that the improved algorithm prolongs the network lifetime about 23% and reduces network delay.

Key words: Wireless Sensor Network (WSN); lifetime maximum; energy balance; scheduling algorithm; energy utilization efficiency

0 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Network, WSN)由无线传感器节点组成,传感器节点大都采用电池供电,有限的电池能量直接影响着整个无线传感器网络的性能和生存时间。近年来,研究人员对如何延长无线传感器网络的生存时间,进行了多方面的研究,取得了一系列的研究成果。如文献[1-2]从路由的方向着手,通过优化路由和研究节能路由等来降低数据传输时的能量消耗,并通过路由选择实现链路负载均衡。文献[3-6]从睡眠调度的方向对无线传感器生存时间进行了研究。文献通过使用节点睡眠调度的方式,减少节点不必要的能耗,延长节点的使用寿命,从而达到延长网络生存时间的目的。但是已存在的文献中大部分工作大都将路由协议和睡眠调度分开来考虑,而文献[7]则将路由选择和睡眠调度联合起来考虑,提出了联合路由和睡眠调度的IGP(Iterative Geometric Programming)算法。该算法用数学表达式将睡眠调度和路由选择联系起来,将问题转化成一个迭代线性规划问题,通过求线性规划最优解的方式延长网络生存时间。文献[7]中对网络存活的评价标准是:网络中所有节点都存活,如果网络中有一个节点死亡,那么网络死亡。IGP算法延长了网络的生存时间,但是该算法网络时延大,节点采用异步睡眠调度,增大了路由选择时的节点能耗和网络时延。文献[8-

9]提出的对节点剩余能量预测的方法,能有效地减少路由选择时的能量开销和网络时延,对文献[7]是一个较好的补充。

针对文献[7]中提出的联合路由和睡眠调度的IGP算法的不足之处,分析和研究了已有文献,并对IGP算法进行了如下改进:一是对节点最大睡眠时间进行了限制,目的是减少网络时延和实现对采集数据的及时传输,避免原始数据的积累,减少发生网络堵塞的可能;二是对节点睡眠时间的设定,改进算法采取根据网络实时运行情况进行动态设定,目的是减少时延和能耗,使节点工作功率尽量达到最小;三是路由协议,改进算法采用了基于节点剩余能量调配的能量均衡路由协议^[10-12],对于路由选择时对节点剩余能量等信息的获取,采取了对剩余能量进行预测估算的策略^[8-9]和在数据传输结束后对节点剩余能量进行矫正的策略。采用对节点剩余能量预测的策略,减少了节点间的频繁的信息交换,也减少了路由维护和路由选择的网络时延,并降低了节点能耗。最后通过模拟实验证明了本文算法的有效性,延长了网络生存时间和网络时延。

1 系统模型

无线传感器网络是由大量的、随机分布在某一地理区域的静态的传感器节点以自组织方式形成的多跳通信网络,无中心控制,且传感器节点具有通信和计算能力。本文假定无

收稿日期:2012-07-11;修回日期:2012-08-23。

作者简介:孙宏(1987-),男,安徽阜南人,硕士研究生,主要研究方向:嵌入式系统、计算机网络;张曦煌(1962-),男,江苏无锡人,教授,主要研究方向:嵌入式系统、计算机网络。

线传感器网络数据链路负载较小,并且数据链路在数据传输时,假定链路无冲突。

定义传感器网络中的路由矩阵为 $\mathbf{R}^i = \{R_{ij}^i\}$ 。如果节点 i 和节点 j 的射频信号能够相互覆盖,那么 $R_{ij}^i > 0$,具体大小下面将作说明;如果节点 i 和节点 j 的射频信号不能相互覆盖,那么令 R_{ij}^i 为一恒定值 0。定义集合 N_i 作为节点 i 的邻接节点集合,它满足如下条件:

$$J \begin{cases} \in N_i, & \text{节点 } j \text{ 在节点 } i \text{ 的射频范围内} \\ \notin N_i, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

网络运行期间,传感器节点将在活动模式 (Active Mode) 和睡眠模式 (Sleep Mode) 之间相互切换。活动模式指节点处于正常工作状态,节点能够处理数据,收发数据包,采集数据等;睡眠模式下,节点处于低功耗状态,不能处理数据和收发数据包,只进行周期性的数据采集和存储工作,因此该模式下能耗较少。又因为这部分能耗固定,所以为了系统模拟方便,本文未考虑该部分能耗。

节点 i 完成活动模式的相应工作后,调整节点进入睡眠模式,并睡眠一段时间 T_{sleep}^i , T_{sleep}^i 的大小根据相应节点的实时需要进行动态设定。 T_{sleep}^i 时间片用完后,调整节点进入活动模式。进入活动模式后,节点对自身各部件进行初始化。初始化工作完成后,节点检测自身是否有数据要发送,节点同时对信道进行监听。根据有无数据收发将活动模式进一步划分为空监听周期和数据收发周期。具体地说,如果一个节点在它的一个活动周期内无数据包收发,那么就把这个活动周期称为空监听周期;反之,则称之为数据收发周期。

节点 i 进入活动周期后,初始化工作的主要能耗是节点射频电路的初始化。假定节点完成一次射频电路初始化所需要的时间为 T_{rf} ,消耗的节点总能量为 E_{rf} 。节点初始化工作完成后,开始对信道进行监听,监听的时间长度用 T_{lis} 表示。定义 $T_d = T_{\text{rf}} + T_{\text{lis}}$ 为节点从被唤醒到再次进入睡眠的总时间。 T_d 的大小稍后讨论。

节点在发送数据包前,首先预测邻接节点的剩余能量,而后根据能量均衡路由协议^[10]的原则和路由矩阵 \mathbf{R}^i 选定下一跳节点。然后向选定节点发送 RTS (Request To Send) 序文包,该动作的目的是探测选定的下一跳节点是否处于活动模式。如果目标节点处于活动模式并且捕获到了这个 RTS 序文,那么目标节点返回一个 ATS (Allow To Send) 序文包,告知源节点可以发送数据了。节点接收到 ATS 序文包后,开始发送数据。目标节点收到数据包后,随即返回一个 ACK 序文对收到的数据包进行确认。如果选定的下一跳节点处于睡眠模式,那么调整节点进入节能状态(短暂的睡眠),时间长度为 $T_{\text{sav}} \circ T_{\text{sav}}$ 时间片用完后,节点向选定节点重发 RTS 序文包。节点重复此过程,直到收到目标节点返回的 ATS 序文(如果此过程花费的时间大于限定的节点最大睡眠时间,则判定节点死亡)。本文假定所有数据包,序文包的发送功率都相同,用 P_{tx} 表示。同时,接收器接收任何数据包,序文包的接收功率也相同,用 P_{rx} 表示。数据包的长度为定长 L ,那么发送一个数据包的时间为定值,用 T_{data} 表示。为了便于模拟和计算,假定 RTS, ATS 和 ACK 数据包的长度都相等,那么发送时间必相等,用 T_{pre} 表示。

为了保证传感器节点间能够准确、有效地连接并进行通信,那么传感器节点的信道监听时间 T_{lis} 必须足够长,至少为发送两个连续的 RTS 序文的时间。如果 T_{lis} 过短,那么可能导致目标节点无法捕获源节点的 RTS 序文。又 T_{rf} 为一定值,结

合上文,针对节点 i 可得到式(2):

$$T_d \geq \max_{j \in N_i} (2T_{\text{rf}} + 3T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}^j) \quad (2)$$

式(2)右侧的表达式可以变换为: $(T_{\text{rf}} + T_{\text{pre}}) + T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}^j + (T_{\text{rf}} + T_{\text{pre}})$ 。意义为:发送一个序文;等待对方响应;无响应,调整节点进入低功耗;低功耗时间用完后再次发送序文。从式(2)可以看出, T_d 值的大小受节点 i 的邻接节点集合中 T_{sav}^j 值的影响。如果邻接节点集合中一个节点的 T_{sav} 值小于该节点所在集合的最大值,那么增大该节点的 T_{sav} 值不会对节点 i 的 T_d 造成影响。因此,最有效的能量利用方法是让所有节点的 T_{sav} 相同。因此,本文假定所有节点的 T_{sav} 都相同。除非另作说明,否则取 T_d 为网络允许的最小值,即 $T_d = 2T_{\text{rf}} + 3T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}$ 。

现在计算节点 i 一个活动周期所消耗的能量,这个周期可能是一个空监听周期,也可能是一个数据收发周期。下面分别讨论。

如果节点 i 的活动周期是一个空监听周期,那么节点所消耗的能量由两部分组成:射频电路初始化所消耗的能量和信道监听所消耗的能量。因此,空监听周期的所消耗的总能量用公式表示为式(3):

$$E_{\text{idle}} = E_{\text{rf}} + (T_d - T_{\text{rf}}) P_{\text{rx}} \quad (3)$$

如果节点 i 的活动周期为一个数据收发周期,那么节点的主要能耗是完成对数据包的收发。节点 i 传输一个数据包到节点 j 所消耗的平均能量用式(4)表示:

$$E_{\text{tx}}^j = (E_{\text{rf}} + P_{\text{rx}} T_d) - E_{\text{rf}} + (E_{\text{rf}} + (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}) T_{\text{pre}}) \times \left(\frac{T_{\text{sleep}}^j/2 - (2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}} + T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}})}{T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}} + 2 \right) + P_{\text{tx}} T_{\text{data}} + P_{\text{rx}} T_{\text{pre}}; j \in N_i \quad (4)$$

其中:表达式 $(E_{\text{rf}} + P_{\text{rx}} T_d)$ 表示节点 i 初始化射频电路和监听信道所消耗的能量;表达式 $-E_{\text{rf}} + (E_{\text{rf}} + (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}) T_{\text{pre}}) \times \left(\frac{T_{\text{sleep}}^j/2 - (2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}} + T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}})}{T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}} + 2 \right)$ 是节点 i 发送 RTS 序文包到目标节点,直到 RTS 序文包被目标节点确认接收所消耗的能量;表达式 $P_{\text{tx}} T_{\text{data}} + P_{\text{rx}} T_{\text{pre}}$ 表示节点 i 发送一个数据包到目标节点并接收到目标节点的 ACK 确认包所消耗的能量。

特别的,式(4)中的 $T_{\text{sleep}}^j/2$ 表示节点 i 传输数据到节点 j 时,节点 j 剩余睡眠时间的平均值。 $E_{\text{rf}} + (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}) T_{\text{pre}}$ 表示节点发送一个 RTS 序文包和监听一个可能的 ATS 序文包确认包所消耗的能量。式(4)的 $-E_{\text{rf}} + (E_{\text{rf}} + (P_{\text{tx}} + P_{\text{rx}}) T_{\text{pre}}) \times \left(\frac{T_{\text{sleep}}^j/2 - (2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}} + T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}})}{T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}} + 2 \right)$ 中,因为第一次传输 RTS 序文包时,射频电路已经被初始化,所以在这里要减去一个 E_{rf} 。最后一次 RTS/ATS 的交换是没有节能时间 T_{sav} 的。

表达式 $\left(\frac{T_{\text{sleep}}^j/2 - (2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}} + T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}})}{T_{\text{rf}} + 2T_{\text{pre}} + T_{\text{sav}}} + 2 \right)$ 表示节点 i 发送 RTS 序文包到节点 j ,直到序文包被节点 j 所捕获,节点 i 所发送的 RTS 序文包的个数; $P_{\text{tx}} T_{\text{data}}$ 表示传输一个数据包所消耗的能量; $P_{\text{rx}} T_{\text{pre}}$ 表示接收一个 ACK 所消耗的能量。

节点接收一个数据包的能量消耗量的计算表达式如式(5):

$$E_{\text{rx}} = (E_{\text{rf}} + P_{\text{rx}} T_d/2) + P_{\text{rx}} T_{\text{data}} + 2P_{\text{rx}} T_{\text{pre}} \quad (5)$$

式(5)右边第一项表示节点初始化射频电路和收到一个 RTS 序文包所消耗的平均能量;第二项表示接收一个数据包所消耗的能量;第三项表示节点传输一个 ATS 序文包和一个

ACK 序文包所消耗的能量。

现在计算节点在一段时间的平均工作功率。考虑一段时间 T , 假定在时间 T 内, 节点 i 传输数据包到节点 j 的个数为 N_{ij}^T ($j \in N_i$), 接收的数据包的个数为 N_{ix}^T , 空监听周期的周期数为 N_{idle}^T 。那么节点 i 在时间 T 内的平均工作功率可用表达式表示如式(6):

$$\bar{p}_i = \left(\sum_{j \in N_i} \overline{E_{tx}^{ij}} N_{ij}^T + \overline{E_{rx}} N_{ix}^T + E_{idle} N_{idle}^T \right) / T \quad (6)$$

令

$$s_{ij} = \left(\sum_{j \in N_i} N_{ij}^T \right) / T \quad (7)$$

表示节点 i 发送数据包到节点 j 的平均发送速率。令

$$r_i = N_{ix}^T / T \quad (8)$$

表示节点 i 接收数据包的平均接收速率。又链路负载较小, 所以节点大部分时间处于空监听周期模式, 也就是:

$$T \approx (T_d + T_{sleep}^i) N_{idle}^T \quad (9)$$

把式(7) ~ (9) 代入式(6), 得到式(10):

$$\bar{p}_i = \overline{E_{tx}^{ij}} s_{ij} + \overline{E_{rx}} r_i + \frac{E_{idle}}{T_d + T_{sleep}^i}; \quad j \in N_i \quad (10)$$

式(10) 中仅有 \bar{p}_i 和 T_{sleep}^i 这两个变量是待定值。

得到了节点平均工作功率, 那么节点的生存时间可表示为: $T_{life}^i = E_i / \bar{p}_i$ 。又因为节点的电池还要用于其他用处, 比如数据采集等, 所以得到不等式: $T_{life}^i < E_i / \bar{p}_i$ 。

2 路由和睡眠调度

2.1 节点睡眠时间的计算

根据以上的推导, 基于路由和睡眠调度算法可以转化为寻找节点剩余能量最大路由和确定节点的睡眠时间。具体地说, 就是找到一条剩余能量最大的路由和确定网络中节点的睡眠时间 T_{sleep}^i 。

网络中节点的睡眠是异步进行的, 各个节点的睡眠调度相互独立, 互不干扰。因此, 如果某个节点睡眠时间过长, 可能会使整个网络产生很大的时延。这是因为节点发送数据时, 必须等待被选中中的下一跳节点被唤醒, 产生了等待节点唤醒时延。且随着网络规模的扩大, 中间路由的增多, 时延会累加, 越来越大。异步睡眠调度产生的时延对时延有要求的应用会产生很大的影响。

为了兼顾时延, 本文令节点的睡眠时间不大于节点产生一个数据包的时间, 这样节点就不会积累原始数据包。为了便于计算和模拟, 规定传感器单次采集得到的数据总长度为 Δl (单位: 字节), 节点数据采集瞬间完成。那么节点的最大睡眠时间为 $\frac{L}{\Delta l} \times \Delta t$, Δt 为数据采集的时间间隔。可得到如式(11):

$$T_{sleep}^i \leq \frac{L}{\Delta l} \times \Delta t \quad (11)$$

对于 T_{sleep}^i 值的确定, 采取的策略为: 网络开始运行时, 统一初始化所有节点的睡眠时间为 $\frac{L}{\Delta l} \times \Delta t$ 。网络运行一段时间 T 后, 各个节点分别统计出在时间 T 内各自发送的数据包的个数 $\sum_{j \in N_i} N_{ij}^T$, 接收的数据包个数 N_{ix}^T 以及空监听周期数 N_{idle}^T 。根据对时间段 T 内网络运行的各节点的统计信息, 预测节点下一时间段的睡眠时间。为了有效地利用节点的有限能量, 延长网络的生存时间, 要求要尽量减小节点的平均工作功率 \bar{p}_i 。

现在确定节点 i 下一个时间段 T 的睡眠时间 T_{sleep}^i 。已知 T 为一已知定值, $\sum_{j \in N_i} N_{ij}^T, N_{ix}^T, N_{idle}^T$ 为节点 i 在时间 T 内的统计值。那么, 式(7) ~ (8) 的值可确定, 得到 s_{ij}, r_i 的值。将式(4) ~ (5) 代入到式(10), 整个表达式中只有 \bar{p}_i 和 T_{sleep}^i 是未知量。得到一个 \bar{p}_i 关于 T_{sleep}^i 的函数, 函数形如 $f(x) = ax + \frac{b}{c+x} + d$, 其中 T_{sleep}^i 是自变量, 且 T_{sleep}^i 取值范围为 $[0, \frac{L}{\Delta l} \times \Delta t]$ 。那么根据函数的单调性和 T_{sleep}^i 的取值范围, 确定 T_{sleep}^i 的值, 使 \bar{p}_i 最小。得到的这个 T_{sleep}^i 即为下一个时间段内该节点的睡眠时间。

2.2 网络路由的连通

为了保证无线传感器网络中的节点能够相互连通并进行通信, 网络中每个节点维持一个路由矩阵 R^i , 如上文所定义。矩阵 R^i 的规模和节点的邻接节点的个数成正比。为了节省通信时的节点能量消耗, 对网络中的节点进行分层划分, 使整个网络划分成一个以网关为中心的多层圆环。圆环半径和节点通信距离相等。节点所在的层数用节点的 Layer 属性标识。发送报文的节点用 i 标识, 接收报文的节点用 j 标识。那么层次划分的具体算法描述如下。

- 1) 网络开始运行时, 初始化网络中所有节点的 Layer 属性值为 0。
- 2) 网关节点 i 首先发送广播报文, 报文中携带节点 i 的标识信息和 Layer _{i} 值, 此时 Layer _{i} 的值为 0。网络中所有收到此广播信息的节点首先判断自己的 Layer 属性值是否为 0, 若为 0, 那么令 Layer _{j} = Layer _{i} + 1; 反之维持 Layer 属性值不变。
- 3) Layer 属性值设定好后, 更新矩阵 R^i , 令 $R_j^i = \max\{Layer_i, Layer_j\}$ 。
- 4) Layer 属性值为 1 的节点发送广播信息, 根据步骤 2) 的规则更新收到此广播报文的节点的 Layer 属性值, 然后依据步骤 3) 中的规则更新矩阵 R^i 。
- 5) 根据步骤 2) ~ 4), 依次设定网络中的其他节点层数和相应矩阵。

如此建立起来的矩阵中包含两个值: 一个等于节点的 Layer 属性值; 一个等于节点的 Layer 属性值加 1。从上面易得到: 当向网关传输数据时, 则选择矩阵元素值等于该节点 Layer 属性值的线路; 反之则选择 (Layer + 1) 的线路。经过层次划分, 节点的 Layer 属性值及路由矩阵得到初始化, 建立了节点间的相互联系和通信关系, 实现了路由的连通性。

2.3 路由算法

本文采用了基于节点剩余能量调配的能量均衡路由算法。整个网络被划分成多个同心圆环, 节点采集的数据由外向内逐层以多跳方式向网关节点传输。因为节点是异步睡眠, 因此算法选取的下一跳节点的剩余能量可能并不是最大 (因为要准确知道所有邻接节点的剩余能量, 会增大时延和能耗), 但是改进算法会尽可能选取剩余能量最大的节点作为下一跳路由节点。

为了寻找路由的需要, 引入了邻接节点当前平均工作功率集合 $\bar{p}_i = \{p_{cur}^j\} (j \in N_i)$ 和邻接节点剩余能量集合 $E_i = \{e_j\} (j \in N_i)$ 。根据这两个值对邻接节点的剩余能量进行预测, 以减少查找路由时的通信开销, 达到减少时延和能耗的目的。

对集合 \bar{p}_i 中元素的更新方法为: 当节点的时间 T 用完, 节点统计并计算出平均工作功率。然后节点向它的邻接节点广

播,携带节点平均工作功率和节点的剩余能量,每隔一段时间(该时间段小于节点的空监听时间,以保证在时间 $\frac{L}{\Delta l} \times \Delta t$ 内,它的所有邻接节点都能收到此消息)广播一次,直到该节点收到它的所有邻接节点的确认。然后调整节点进入睡眠和活动相互切换的模式。

对于节点 i 下一跳路由节点的选择,数据传输和剩余能量集合 E_i 的更新算法步骤如下。

1) 若节点 i 的一个周期是空监听周期,那么节点 i 对收到的广播信息进行处理,更新 E_i 中相应的值,同时记录对应的邻接节点剩余能量的更新时间 t_{last}^j ,对于没有收到广播信息的邻接节点,本文采用的更新方法是 $e_j = e_j - \partial p_{cur}^j(t_{cur} - t_{last}^j)$,其中 ∂ 为修正值,同时令 $t_{last}^j = t_{cur}$ 。最后节点 i 广播自己的剩余能量,调度节点进入睡眠模式,算法周期结束。若不是空间监听周期则转至步骤2)。

2) 节点 i 在一个活动周期内有数据收发,那么节点 i 根据步骤1)中的策略更新邻接节点剩余能量集合的值。从矩阵 R^i 中选择矩阵元素值等于节点 $Layer_i$ 值的条目,然后找到对应的节点。最后再从选出的节点中选择剩余能量最大的节点(这样可保证选中的下一跳节点必能将数据传输到网关节点),并向它发送 RTS 序文包。转至步骤3)。

3) 收到 ATS 序文包后,节点 i 向目标节点发送数据。数据发送完后,等待目标节点返回 ACK 序文包和目标节点的剩余能量信息,用这个能量信息更新节点 i 邻接节点集合中该节点的剩余能量,同时更新该节点的 t_{last}^j 值。转至步骤4)。

4) 广播节点当前实时剩余能量,调整节点 i 进入睡眠模式。算法周期执行结束。

3 实验结果

3.1 实验环境和参数设置

本文选用了网络仿真平台 NS2 对算法进行实验分析和评估,主要的评价指标为整个网络的生存时间。模拟实验中相关参数的设定详见表1。表1中,各参数的设定和文献[7]中的参数相同。这样做的主要目的是用于和文献[7]的实验结果作对比分析。在模拟实验中,网络中的网关节点能量假定不受限制(即能量无限)。

表1 模拟实验中的参数设置

参数名	含义	数值
P_{tx}	发送功率	60 mW
P_{rx}	接收功率	45 mW
E_{rf}	初始化射频电路能量	20.5 μ J
T_{rf}	初始化射频电路时间	2.1 ms
T_{data}	发送一个数据包的时间	14.98 ms
T_{pre}	发送一个序文包的时间	0.832 ms
T_{sav}	节能时间片	4.16 ms
L	数据包长度	512 B
Δt	数据采集间隔时间	1 s
Δl	一次数据采集长度	32 B

3.2 实验结果分析

实验采用类似文献[7]的网络模拟环境,用不同的网络拓扑进行仿真。节点随机分布在一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的区域内。节点射频电路发射和接收功率恒定,射频信号相互覆盖的范围为15 m,节点的初始化电池容量为2500 mAh,一个网

络拓扑如图1示。图1中括号内参数以及只有一个参数的标识为本文算法计算得出的对应节点的睡眠时间,括号外为节点的实际睡眠时间。黑点代表节点,直线代表链路。图中较大的节点为网关节点,该节点能量足够大。

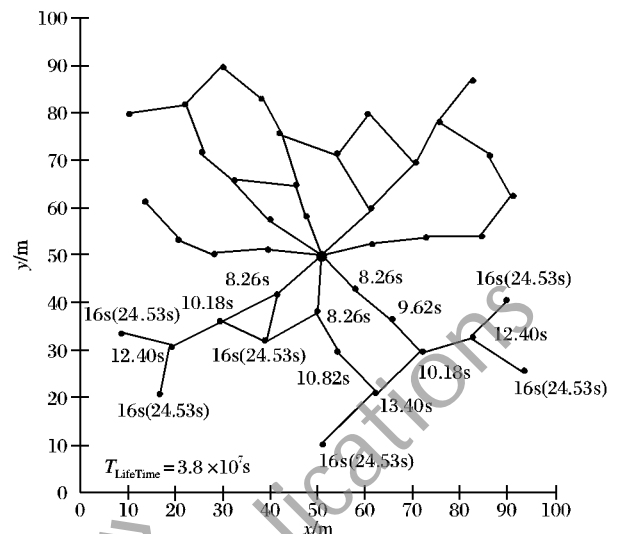


图1 联合路由和睡眠调度的改进算法网络拓扑实例

比较 IGP 算法和改进算法 Joint-Sleep&Routing 的网络生存时间。由表1知,网络中节点数据包生成速率为 6.25×10^{-7} 。随机生成多个网络拓扑,使用 IGP 算法得到的网络平均生存时间为 2.98×10^7 s,使用改进算法 Joint-Sleep&Routing 得到的平均网络生成时间为 3.87×10^7 s。改进算法的网络平均生存时间比 IGP 算法提高了23%左右。

从上面表述的系统模型以及模拟实验可以得到,节点的能量在改进算法中大都消耗在数据收发上。改进算法中节点自身信息以及和路由相关信息的维护都在数据传输前后顺带进行,且算法简单,处理的信息量少,占用时间少,耗能较少。而数据采集和存储是节点不可节省的能耗,算法中未予考虑。

改进算法中采用的对节点剩余能量预测的策略,减少了路由选择时节点间的通信,有效地减少了路由时的能耗和网络时延。改进算法对节点的睡眠时间采用动态设置的策略,使节点工作功率始终处于比较低的状态,节省了节点能耗。改进算法对节点最大睡眠时间进行了限制,有效地降低了网络时延。从图1可以看出,边缘节点的睡眠时间被强制缩短,这导致边缘节点的工作功率不是最佳状态,但是边缘节点能量充足,适当减少其睡眠时间,可以减少整个网络的时延,同时又可以避免由于数据积累而可能造成的网络拥塞情况的发生,达到了双重目的。模拟实验结果表明,通过这些策略的实施,改进算法有效地减少了节点能耗和整个网络的时延,达到了延长网络生存时间的目的。

用表1中的参数设置进行实验,当网络失去作用的时候,对所有节点剩余能量进行了统计。统计结果显示边缘节点剩余能量较多,而靠近网关的节点剩余能量较少,个别节点能量耗尽。从边缘到网关,节点剩余能量呈递减趋势。因此,靠近网关的节点是整个网络生存时间的瓶颈节点,制约着网络的性能和生存时间。

接着改变数据包的产生速率而保持网络中节点个数不变,比较两种方案的性能,结果如图2所示。从图中可以看

出,随着数据包生成速率的增加,网络生存时间在逐渐减少。但是改进算法 Joint-Sleep&Routing 比 IGP 算法的生存时间平均提高了 23% 左右。

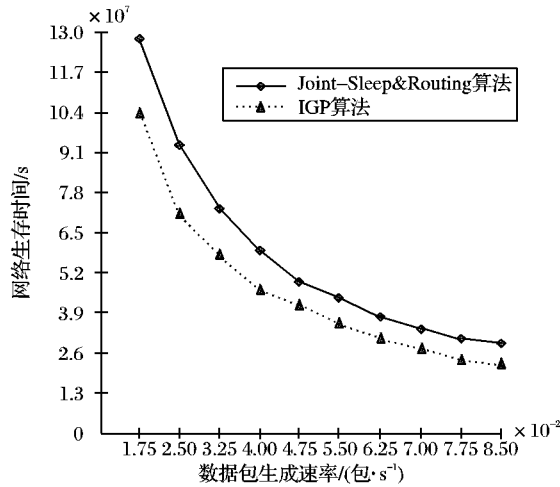


图2 不同数据生成速率下传感器网络生存时间对比

改进算法对节点最大睡眠时间进行限制,同时使用了对节点剩余能量进行估计预测的策略和选择了基于能量均衡的路由协议,使整个网络的时延和生存时间性能较 IGP 算法有了大幅度的改善。

4 结语

本文研究了联合路由和睡眠调度算法在无线传感器网络生存时间最大化中的应用,对文献[7]中的 IGP 算法进行了改进。将优化问题转化成了一个函数求最值问题,简化了算法。同时使用了对节点剩余能量进行估计预测的策略,该策略有效地减少了节点间的通信,减少了能耗,延长了网络生存时间。

从网络失去作用时节点剩余能量消耗分布上看,边缘节点能量剩余较多,而靠近网关节点能量所剩无几,个别节点能量耗尽。因此,网关节点在适当的时候进行重新选择将会更充分有效地利用网络中节点的能量,延长网络的生存时间。再次,本文中未考虑信道冲突问题,这是本文模型的不足之处。

参考文献:

- [1] CHANG J-H, TASSIULAS L. Maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(4): 609–619.
- [2] GAN L, LIU J M, JIN X L. Agent-based, energy efficient routing in sensor networks [C]// Proceedings of the Third International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2004: 472–479.
- [3] MADAN R, LALL S. Distributed algorithms for maximum lifetime routing in wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2006, 5(8): 2185–2193.
- [4] CHACHRA S, MAREFAT M. Distributed algorithm for sleep scheduling in wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Robotics Automation. Piscataway: IEEE Press, 2006: 3101–3107.
- [5] SUBRAMANIAN R, FEKRI F. Sleep scheduling and lifetime maximization in sensor networks: fundamental limits and optimal solutions [C]// Proceedings of the 5th International Conference on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM Press, 2006: 218–225.
- [6] BULUT E, KORPEOGLU I. DSSP: a dynamic sleep scheduling protocol for prolonging the lifetime of wireless sensor networks [C]// Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshop. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 725–730.
- [7] LIU F, TSUI C-Y, ZHANG Y J. Joint routing and sleep scheduling for lifetime maximization of wireless sensor networks [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2010, 9(7): 2258–2267.
- [8] 林恺,赵海,尹振宇,等.无线传感器网络路由中的能量预测及算法实现[J].通信学报,2006,27(5):21–27.
- [9] 廖明华,张华,谢建全.基于蚁群算法的WSN能量预测路由协议[J].计算机工程,2012,38(3):88–90.
- [10] 党小超,李小艳,郝占军.无线传感器网络的能耗均衡策略研究[J].计算机工程,2012,38(6):107–110.
- [11] 李戈阳,曹阳,冯浩,等.基于节点剩余能量调度的无线传感器网络能量均衡路由协议[J].中南大学学报:自然科学版,2009,40(6):1642–1648.
- [12] 张海洋,曾凡仔,罗娟,等.无线传感器网络的能量均衡路由算法[J].计算机工程,2010,36(1):134–138.

(上接第114页)

- [5] KOODLI R. RFC4068, Fast handovers for mobile IPv6 [S]. [S. l.]: IETF, 2005.
- [6] WANG L, GAABAB B, BINET D, et al. Novel MAP selection scheme using location history in hierarchical MIPv6 networks [C]// WCNC 2008: Proceedings of the 2008 IEEE Wireless Communications and Networking Conference. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 2420–2425.
- [7] 赵成,陈萍,李建华. IPv6 的移动性支持及其优化[J].现代电子技术,2004,27(12):8–17.
- [8] FATHI H, CHAKRABORTY S S, PRASAD R. Optimization of mobile IPv6-based handovers to support VoIP service in wireless heterogeneous networks [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2007, 56(1): 260–270.
- [9] CHEN Y S, WU K L. A cross-layer partner-assisted handoff scheme for hierarchical mobile IPv6 in IEEE 802.16e systems [J]. Wireless Communications and Mobile Computing, 2011, 11(4): 522–541.
- [10] 杨君,郭伟,刘军,等.基于可信区域的移动IPv6切换优化[J].计算机应用研究,2010,27(3):1106–1109.
- [11] 陈魏鑫,韩国栋,刘洪波,等.基于快速DAD的分层移动IPv6切换算法[J].通信学报,2008,29(1):23–26.
- [12] LIU Q, LI S M, HE H Y, et al. A multi-binding solution for simultaneous mobility of MIPv6 [C]// SOSE2006: Proceedings of the Second IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2006: 143–146.
- [13] ZHANG D W, GAO J C, LIU Y. An improved hierarchical MIPv6 mobility solution used in inter-domain mobility management [C]// WOCN'07: Proceedings of the 2007 IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2007: 1–3.
- [14] The network simulator—ns-2. [EB/OL]. [2012-04-20]. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.