

认知无线传感器网络中基于稳定性的能效路由协议

朱 江 雷 云 王 雁

(重庆邮电大学移动通信技术重庆市重点实验室 重庆 400065)

摘 要 在认知传感器节点构建无线传感器网络的过程中,为了降低节点的能量消耗和提高数据的传输能力,提出一种基于稳定性的能效路由协议。该协议引入了稳定性因子,通过采用授权用户占用信道模型建模,并不断调整稳定性因子来研究路径选择与系统能量消耗的关系,找出一种受主用户影响最小的合理路径选择方案,减少链路失效的次数,提高数据传输能力,且保证较小的能量消耗,从而有效地均衡网络能量,延长网络生命周期。模拟的结果与理论分析结果一致,且表明所提出的协议在能量消耗和数据传输能力方面都具有更好的表现。

关键词 认知无线传感器网络,稳定性,能效,网络生命周期

中图分类号 TN929.5 **文献标识码** A **DOI** 10.11896/j.issn.1002-137X.2018.11.014

Stability Based Energy-efficient Routing Protocol in Cognitive Wireless Sensor Networks

ZHU Jiang LEI Yun WANG Yan

(Chongqing Key Lab of Mobile Communications Technology, Chongqing University of Posts and Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract In order to reduce the energy consumption of nodes and improve the transmission capacity of data in the process of building wireless sensor network at the cognitive sensor node, a new time-limited energy-efficient protocol based on stability was proposed. The protocol introduces a stability factor through employing the channel model to model by authorized users and studies the relationship between path selection and system energy consumption by adjusting the stability factor constantly to find a reasonable path choice which is least affected by users, thus reducing the times of link failure, improving data transmission capacity, ensuring the lesser energy consumption, and achieving the goal of effectively balancing the network energy and extending the network lifecycle. The simulation results are consistent with the theoretical analysis and show that the proposed protocol has better performance in energy consumption and data transmission capacity.

Keywords Cognitive wireless sensor network, Stability, Energy efficiency, Network life cycle

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)广泛应用在自动化领域,如空气污染监测、森林火灾报警、健康监测、目标跟踪、环境监测、山体滑坡检测和战场监测等^[1],成为了改善人们生活质量的关键性解决方案。由于无线传感器网络与蓝牙、无线麦克风和微波炉频段使用的标准在同一范围内,使得接收到的信号干扰增大,严重降低了性能,因此频繁过载^[2]。认知无线电(Cognitive Radio, CR)允许使用无线电进行机会性频谱接入,并在设备中引入智能技术以便自主监控频谱使用,并决定哪个频段是空闲的,从而减轻无线干扰。配备CR技术的传感器网络通常被称为认知无线传感器网络^[3]。

由于传感器网络中部署了大量传感器节点且每个能量有限,因此有效利用节点能量至关重要。WSN主要使用分层算法,根据分层算法构建的高效拓扑结构有效地控制和消耗有限的能量。常见的分层路由算法包括LEACH^[4]和

HEED^[5]。文献[6]提出了基于LEACH的动态多跳技术(DMHTLEACH)协议,簇头(Cluster Head, CH)之间通过多跳路由方式将数据传输到动态技术基站(BS)。文献[7]提出了高能LEACH算法,考虑了每个节点的能量和位置因素,优化了簇头选择和数据传输模式。然而,其在簇首选择阶段和数据传输阶段,没有考虑路由过程的稳定性。如果路由过程失效,要想完成数据传输,则必须重新建立路由。文献[8]依据动态源路由协议(Dynamic Source Routing, DSR),提出了基于稳定性的信道分配算法,在路由过程进行信道分配。显然,稳定性和能量是研究WSN的两大重要因素。

本文提出了一种在认知无线传感器网络中基于稳定性的能效路由协议,该协议通过引入稳定性因子来选择路径,优化了路由传输过程。本文的主要贡献如下:

1) 将认知功能用于无线传感器节点,通过引入稳定性因子,采用授权用户占用信道模型建模来降低节点传输过程中

到稿日期:2017-10-16 返修日期:2018-02-11 本文受国家自然科学基金(61102062),教育部科学技术研究重点项目(212145),重庆市科委自然科学基金(cstc2015jcyjA40050)资助。

朱江(1977-),男,博士,教授,主要研究方向为认知无线电、通信理论与技术, E-mail: zhujiang@cqupt.edu.cn(通信作者);雷云(1992-),男,硕士生,主要研究方向为认知无线电, E-mail: 276110952@qq.com;王雁(1991-),女,硕士生,主要研究方向为认知无线电。

信道被占用的概率,减少链路失效的次数。

2)针对能量消耗过快的问题,结合稳定性因素,提出了关于传感器节点剩余能量的成本函数,通过不断调整稳定性因子来研究路径选择与系统能量消耗的关系且保证较小的能量消耗,延长网络生命周期。

1 系统模型

系统模型是建立在传感器网络中的节点具有认知功能的基础之上,如图1所示。

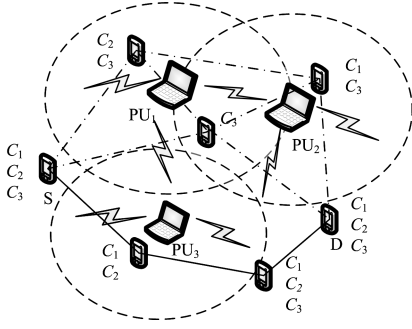


图1 认知无线传感器网络模型

Fig. 1 Cognitive wireless sensor network model

认知无线传感器网络由 M 个授权用户和 N 个传感器节点共同组成,所有节点的功能相同,且具有认知功能。无线电信号在各个方向的能量衰减趋势相同,且能感知自己的剩余能量。图1中的 PU_1, PU_2, PU_3 分别表示3个授权用户,每个授权用户都有对应的频段,分别用 C_1, C_2, C_3 表示。当频段被占用时,授权用户具有优先使用权。图1中的虚线区域代表授权用户的频率通信范围,当节点距离超过通信范围时,通过相邻节点进行数据转发。剩余节点表示普通的认知节点,只有当授权用户不工作时,认知节点才能使用机会频谱。每个传感器节点可以通过频谱感知^[9]获得机会频谱^[10](Spectrum Opportunities, SOP),当授权用户工作时,旁边标记的信道就是对应的 SOP 频段,同一时间不同节点所拥有的机会频谱通常不同,而每个节点在不同时间获得的 SOP 也不同。

表1 常用参数

Table 1 Common paramter

参数	描述
T	固定的时隙
T_s	信道占用时间
T_{tx}	数据传输的时间
c_k	信道
\tilde{T}_{off}^p	活动周期的平均持续时间
\tilde{T}_{on}^p	空闲周期的平均持续时间
a_p	活跃因子
$P_s(n_i, n_j, c_k)$	稳定性
P_{rr}	稳定性因子
$E_{Fu}(l, m)$	数据融合消耗的能量
$E_{Tx}(l, d)$	传输 l 位数据消耗的能量
$D(i, j)$	链路延迟
d_Q	排队延迟
$Dete(x, s)$	源节点到目的节点产生的总延迟
$cost_{ij}$	成本函数

1.1 稳定性模型

对于传感器网络,每条路由都会受到链路稳定性的影响。

一旦授权用户的活动导致链路的某个传输信道失效,必然造成整个路由失效,此时必须重新建立路由。而重建路由往往会消耗额外的能量,浪费更多的资源,因此路由稳定性是衡量性能指标的主要因素。授权系统在任何时刻都可以进行对信道的占用和退出,称为连续授权信道占用模型;授权系统在指定时隙的开始或结束时刻占用信道或者退出当前占用的信道,称为时隙授权信道占用模型。

研究表明,呼叫模型能很好地反映认知传感器模型中授权用户的行为规律。在这个模型中,授权系统的流量负荷被建模为连续的开关过程,授权用户的传输过程服从 Poisson 分布(独立同分布),此过程可以看作由独立同分布的“开”周期和“关”周期组成的交替更新过程,且开(或关)周期性变化。持续时间可以建模为参数为 λ_1 (或 λ_2) 且服从指数分布的随机变量。对于连续授权信道占用模型而言,授权系统是否占用此信道取决于节点最近一次对信道的感知结果,而与某一时刻感知到的信道占用状态无关联。即使当时感知到信道被占用,在帧内依然有机会占用该信道,而不干扰授权用户,因此认知用户可以在不属于其覆盖区域或者当属于覆盖区域并且授权用户不活动时通过使用信道进行发送,若发生这两种情况之一,则信道就可用于该认知用户。

图2给出了授权用户对信道的占用模型^[11]。 $T = T_s + T_{tx}$,认知用户只能在信道 c_k 空闲的时间,即固定的时隙 T 内,进行路由传输数据, T_s 为信道占用时间,信道空闲时间即授权信道没有占用相应信道 c_k 的时间, T_{tx} 为数据传输的时间。

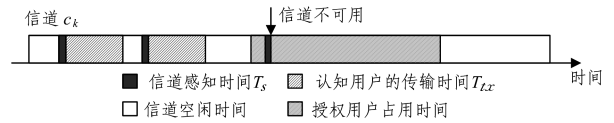


图2 授权用户占用信道模型

Fig. 2 Model of authorizing user to occupy channel

将授权用户随机使用信道 c_k 的行为抽象为 ON-OFF 模型,其中 \tilde{T}_{on}^p 是活动周期的平均持续时间, \tilde{T}_{off}^p 是空闲周期的平均持续时间,授权用户在其许可信道上不传输数据的概率为 $1 - a_p$, a_p 为该模型中授权用户 p 的活跃因子。

$$a_p = \tilde{T}_{on}^p / (\tilde{T}_{on}^p + \tilde{T}_{off}^p) \quad (1)$$

针对路由的稳定性,本文引入稳定度因子 P_{rr} :

$$P_{rr} = \prod_{\forall (n_i, n_j) \in r} P_s(n_i, n_j, c_k) | c \in \{X(n_i) \cap X(n_j)\} \quad (2)$$

其中, $X(n_i)$ 代表节点 n_i 的 SOP 信息, $X(n_i) \cap X(n_j)$ 代表了链路 (n_i, n_j) 的所有可用信道。对于链路 (n_i, n_j) , 记 $P_s(n_i, n_j, c_k)$ 为链路 (n_i, n_j) 能够在信道 c_k 上成功传输数据的概率, $P_s(n_i, n_j, c_k)$ 的值越大,该链路能够成功传输的数据包数目就越多。

在链路 (n_i, n_j) 中,信道 c_k 的稳定性与节点 n_i 和节点 n_j 的所处位置及授权用户 p 的活跃因子 a_p 有关,记授权用户 p 的传输范围为 A_p , $n_i \in A_p$ 表示节点 n_i 不在授权用户 p 的覆盖范围内。那么链路 (n_i, n_j, c_k) 的稳定性 $P_s(n_i, n_j, c_k)$ 可表示为:

$$P_s(n_i, n_j, c_k) = \begin{cases} 1, & n_i \notin A_p \ \& \ n_j \notin A_p \\ 1 - a_p, & n_i \in A_p \ \text{or} \ n_j \in A_p \end{cases} \quad (3)$$

1.2 能量模型

无线传感器网络简化为无线电硬件能量耗散模型。为了

接收 l 位数据,无线电花费的能量如下:

$$E_{R_x}(l) = E_{\text{elec}} \times l \quad (4)$$

其中, E_{elec} 是电子能耗因子。

由于感测数据相关,簇头可以融合其他簇头收集的数据,并将其组合成单个固定长度的分组。簇头将 m 个成员的 l 位数据进行融合所消耗的能量为:

$$E_{F_u}(l, m) = m \times E_{\text{fuse}} \times l \quad (5)$$

其中, E_{fuse} 是数据融合因子。

节点发射 l 比特的数据到距离为 m 的位置,消耗的能量由发射电路损耗和功率放大损耗两部分组成,即:

$$E_{T_x}(l, d) = \begin{cases} l \times E_{\text{elec}} + l \times \epsilon_{fs} \times d^2, & \text{if } d < d_0 \\ l \times E_{\text{elec}} + l \times \epsilon_{mp} \times d^4, & \text{if } d \geq d_0 \end{cases} \quad (6)$$

其中, E_{elec} 是电子能量消耗因子, ϵ_{fs} 和 ϵ_{mp} 是维持一定信噪比所需的放大器, $d_0 = \epsilon_{fs} / \epsilon_{mp}$ 是发射器和接收器之间的参考距离。

1.3 计算端到端的时延

数据在传输过程和传播过程中均会产生时延,链路延迟 $D(i, j)$ 是指数据包从节点 i 到节点 j 的链路进行遍历时延迟的度量。根据定义,链路延迟 $D(i, j)$ 为:

$$D(i, j) = (d_Q + d_T + d_p) \quad (7)$$

其中, $d_T = l / \psi$ 和 $d_p = d_{ij} / \gamma$, l 是数据包的大小(单位为位), ψ 是链路带宽(单位为 bps), d_{ij} 是从簇头 i 传输数据到簇头 j 的物理链路的长度, γ 是介质中的传播速度(单位为 m/s), d_Q 的值可以使用与队列理论相关的规则来计算。节点队列被认为是 $M/M/1$ 类型^[12]。在这种类型的队列中,输入是泊松类型,输出是指数随机变量,并且服务量是 1。基于以下等式计算此队列中的排队延迟 d_Q :

$$d_Q = \frac{1}{\mu - \lambda} \quad (8)$$

其中, μ 是服务速率, λ 是新数据包的进入速率。在数据传输和传播过程中,用 $Dete(x, s)$ 表示从源节点 x 收集的数据包传输到基站期间产生的时延,根据定义, $Dete(x, s)$ 为:

$$\begin{aligned} Dete(x, s) &= \sum_{i, j \in \{x, U, s\}} D(i, j) \\ &= \sum_{i, j \in \{x, U, s\}} \left(\frac{1}{\mu - \lambda} + \frac{l}{\psi} + \frac{d_{ij}}{\gamma} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

其中,假定对于所有节点 μ, λ, ψ 和 γ 是相同的常数; l 是数据包大小(单位为位); ψ 是链路带宽(单位为 bps); d_{ij} 是从簇头 i 到簇头 j 的物理链路的长度; γ 是介质中的传播速度(单位为 m/s); U 是从簇头 x 到基站的过程中的中继节点的集合。

1.4 链路路由消耗

簇头节点 i 和节点 j 之间的链路成本函数如下:

$$\begin{aligned} cost_{ij} &= \sum_{\theta \in \{R_x, F_u, T_x\}} E_{\theta}^{ij} + \rho \times cost(E_{R_x}^i) \\ &= (E_{R_x}^i + E_{F_u}^i + E_{T_x}^i) + \rho \times cost(E_{R_x}^i) \end{aligned} \quad (10)$$

其中, $E_{R_x}^i$ 表示簇头从成员接收数据所花费的能量; $E_{F_u}^i$ 是簇头融合来自 m 个成员的数据所花费的能量; $E_{T_x}^i$ 是将数据从簇头 i 传送到簇头 j 的能量; ρ 是节点剩余能量因子。

$$T(n) = \begin{cases} \left(\frac{p}{1 - p(r \bmod l/p)} \right) \left[\frac{E_{\text{current}}}{E_{\text{avg}}} \times \frac{d(i, BS)}{d_{\max}(i, BS) - d_{\min}(i, BS)} \right], & n \in G \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (14)$$

$cost(E_{R_x}^i)$ 是为了达到整个网络能量消耗均衡而考虑传感器剩余能量的成本函数。成本函数 $E_{R_x}^i$ 是基于传感器剩余能量的小变化可导致成本函数的值的大变化的原理。指数函数 $f(x) = \exp(1/x^2)$ 是可以满足此原则的函数类型。使用 $E_{R_x}^i$ (传感器 i 的剩余能量) 替换 x , 成本函数最终的表达式如下:

$$cost(E_{R_x}^i) = \exp(1/(E_{R_x}^i)^2) \quad (11)$$

簇头节点 x 到基站的最低成本路线简化为:

$$\min_{R_k \in R} cost(R_k) \quad (12)$$

其中, R_k 是第 k 条路由, $R(X, S)$ 是从簇头节点 x 到汇聚节点的路由集合, 其稳定性约束条件由 P_{rr} 限定, 如式(13)所示:

$$P_{rr} \geq P_m, R_k \in R(X, S) \quad (13)$$

只有满足式(13)的路由才能作为候选路由。假设 $P_m = 0.6$, 那么只有 $P_{rr} \geq 0.6$ 时才可以作为候选路由, 然后排除不符合稳定性约束条件的路由。

2 基于稳定性的时延能效路由实现

为了在无线传感器网络传输数据过程中延长网络的生命周期, 本文采用基于稳定性的能效路由方案。

2.1 数据包的格式

如图 3 所示, RREQ 数据包的结构如下:

- 1) 数据包类型(Type)、包存活跳数(TTL)、源节点 IP 地址(S-Addr)、目的节点 IP 地址(D-Addr)。
- 2) R-Table: 路径 k 所经过的所有节点的节点 ID, 即 $R\text{-Table}^k = \{ID_s^k, ID_m^k, ID_{nj}^k, \dots, ID_d^k\}$ 。
- 3) SOP: 当前节点 SOP 列表。
- 4) P: 稳定性因子。
- 5) N: 当前最少的能量消耗。

图 3 中, B 代表 byte, RREQ 数据包一共占 26 字节。

Type	TTL	S	D	R-Table	SOP	P	N
1B	1B	4B	4B	4B	4B	4B	4B

图 3 RREQ 结构图

Fig. 3 Structure of RREQ

2.2 簇的建立

算法的开始为邻居发现阶段, 邻居发现阶段由基站通过某一功率电平向所有节点广播广告消息来发起。每个节点向其邻居广播 (ID, E) 消息并从邻居节点收集数据, 其中 ID 是节点标识符, E 是节点剩余能量。每个节点将其能量水平与已经从其接收到广播消息的节点能量水平进行比较。如果传感器节点具有较少的能量, 则将其选择为群集成员(即非簇头), 否则为簇头。

改进的算法考虑了每个节点的能量和位置因素, 以优化 CH 选举和数据传输模式。它将节点的当前能量和位置因子引入到阈值中, 以进一步减少 CH 的随机性分配, 并优化 CH 选举。考虑到 LEACH 和 LEACH-C 的 CH 选择随机性, 本文综合了节点位置和能量信息来优化阈值公式^[13]。

其中, p 表示节点成为 CH 节点的概率, r 是当前轮次, G 表示最后 $\frac{1}{p}$ 轮中没有成为 CH 的节点列表, mod 是模数运算符号, E_{current} 是节点 i 的当前能量, E_{avg} 是传感器网络的平均能量, $d(i, BS)$ 是节点从 i 到 BS 的距离, $d_{\text{max}}(i, BS)$ 和 $d_{\text{min}}(i, BS)$ 表示从节点 i 到 BS 的最大距离和最小距离。为了避免选择较低能量节点作为 CH, 本文将节点的当前能量和网络的平均能量引入阈值公式, 使能量大于网络平均能量的节点变为 CH。同时, 该公式考虑了节点的位置因子。综合分析, 改进的算法从上述两个方面优化了 CH 选举。

2.3 路由发现

Step1 簇头在发送数据之前, 将自身的 SOP 信息写入 RREQ 数据包内, 同时将 P 值和 N 值分别设置为 0 和 1, 然后源节点向所有相邻节点广播一个路由请求分组 RREQ。

Step2 相邻节点在收到 RREQ 数据包后, 根据包中的 SOP 信息, 结合自身的 SOP 列表进行选择, 建立其与上一跳节点之间的链路。如果本节点是首次收到 RREQ 消息, 则计算该链路的 P_r 和 cost_{ij} , 且分别赋给 P 和 N 。节点对 RREQ 数据包进行更新, 更新过程包括将新的 P 值和 N 值记录到 RREQ 中, 同时把本节点的节点 ID 和 SOP 信息分别写入 RREQ 数据包的 R-Table 和 SOP 列表中, 最后将 RREQ 转发至其相邻节点。

Step3 若本节点不是首次收到 RREQ 数据包, 则建立多个链路, 每个链路都有对应的链路稳定性值 $P_s(n_i, n_j, c_k)$, 然后通过式(1)对每个链路计算源节点到当前节点的路径稳定度因子 P_r , 如果计算出的 P_r 值不满足式(13), 则丢弃该链路, 如果所有链路都不满足式(13), 则该节点将丢弃该 RREQ 包。

Step4 若存在符合条件的链路, 则依次计算出源节点到本节点经过的相应链路能量消耗 cost_{ij} , 然后将 P 值和 cost_{ij} 赋给自身记录的 P 值和 N 值, 同时对 RREQ 数据包进行同样的操作, 最后将 RREQ 广播出去。

次用户处理 RREQ 消息的具体流程如图 4 所示。

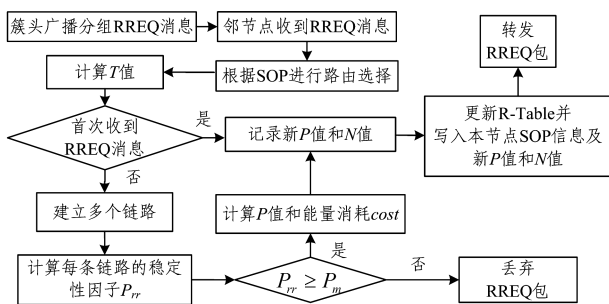


图4 次用户处理 RREQ 消息的流程图

Fig. 4 Flowchart of secondary user processing RREQ message

2.4 路由建立

Step1 RREQ 数据包广播一段时间之后, 目的节点将收到多个 RREQ 消息。首先使用深度优先搜索(DFS)算法^[14]计算从簇头节点 x 到基站 s 的可能路线的数量。每个 RREQ 消息均包含相应链路的 R-Table 和 N 值。然后, 目的节点针

对每条路由计算最后一跳的稳定性 $P_s(n_i, D, c_k)$ 和能量消耗 N 值, 以及完整路径的稳定性因子 P_r 和路由消耗 cost_{ij} 。

Step2 首先排除不满足式(13)的路由, 然后根据 k-最短路径^[15]方法对剩余每条链路的 cost_{ij} 进行选择, 最后选取 k 个最小成本路由。

Step3 在确定最小成本路由 R_k (初始 $k=1$) 之后, 算法使用式(9)计算该路由的端到端延迟 $\text{Dete}(R_k)$ 。然后, 检查该端到端延迟是否可以满足指定的阈值 Δ 。如果满足, 则选择 R_k , 否则, 删除 R_k 并将其添加到不满足延迟约束的路线。最后删除不满足延迟界限 Δ 的最小路由。

Step4 目的节点选定目标路由后, 生成 RREP 数据包, 根据 RREP 数据包记录的路由信息, 目的节点沿着逆向目标路由路径向源节点回复一个路由应答分组 RREP, 源节点收到 RREP 后, 路由就此建立。

路由建立阶段的具体流程如图 5 所示。

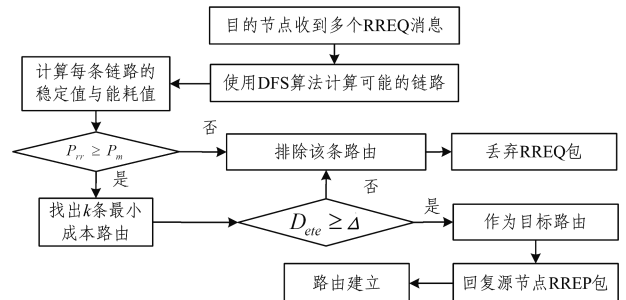


图5 路由建立阶段流程图

Fig. 5 Flowchart of stage of route establishment

2.5 数据传输以及路由维护

一旦创建了群集间多跳路由, 数据传输就会开始。每个成员关闭无线电直到它被分配传输时间, 每个集群选择一个簇头, 簇头将接收到的所有数据融合到单个分组中来提高能量效率, 然后通过不同的相邻簇头不断转发数据到基站, 直到下一次分簇开始。

最后是路由维护阶段, 当某节点收到来自其下一跳节点的 RREP 消息时, 它将立刻停止数据包的发送, 并将该 RREP 消息反向发送至源节点, 源节点收到 RREP 消息后将重新启动路由请求过程, 寻找新的路由。

2.6 收敛性分析

定理 1 算法的收敛性总是在有限的时间内完成, 如果 $\exists K(x, s)$ 从簇头 x 到接收端 s 都可以找到满足端到端延迟约束条件的 k 个最小成本路径选择方案或在稳定性限制条件下没有成本路由的线路。

证明: 若没有从簇头到基站的路由存在, 则该算法在找到满足端到端延迟约束 k 个最小成本路由之后立即停止。若存在, 则通过 k-最短路径算法找到 $k\text{-SR}(x, s, k)$ 。那么, $\forall 1 \leq k \leq K(x, s)$, 若 $\exists R_k | \text{Dete}(R_k) \leq \Delta$, 则算法将以满足延迟要求的 $\text{SeR} = R_k$ 停止, 否则不停止, 不存在满足终端延迟约束的路由 ($k = K(x, s)$, $\text{SeR} = \emptyset$), 这意味着以后数据不会到达基站。

3 仿真实验与分析

采用 OPNET 软件对本文提出的协议进行仿真验证。在一个大小为 $100\text{m} \times 100\text{m}$ 的场景中模拟 100 个节点的无线传感器网络。以主用户为中心,将认知用户的最大传输距离设为 30m,该主用户的覆盖半径为 40m。主用户活动服从 ON-OFF 模型,通过分簇进行多跳路由建立无线传感器网络。

表 2 仿真参数

Table 2 Simulation parameter

仿真参数	参数值
仿真区域/ m^2	100×100
主用户个数 M	3
次用户个数 N	100
最大传输距离/m	30
主用户覆盖半径/m	40
数据包大小/bytes	4000
稳定性约束条件	0.6
授权用户活动因子	0.3~0.7
服务速率	6
新数据包的进入速率 λ	3
基站节点坐标	(50,50)
链路带宽 ϕ/bps	40
介质中的传播速度 $\gamma/(\text{m/s})$	50
电子能量消耗因子 $E_{\text{elec}}/(\text{nJ/bit})$	50
数据融合因子 $E_{\text{fuse}}/(\text{nJ/bit})$	5

通过对基于稳定性的路由协议^[8]、基于能量改进的路由协议^[7]和本文提出的协议进行对比,得到了如图 6 所示的对比结果。

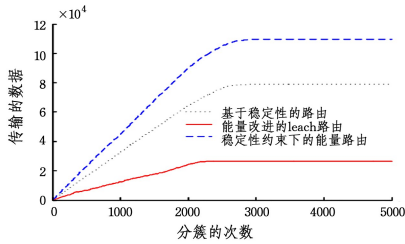


图 6 传输数据与分簇次数的关系

Fig. 6 Relationship between transmission data and number of clusters

图 6 给出了不同分簇次数下数据的传输能力,分簇次数就是路由的重建次数,路由的数据传输能力是路由性能的重要指标。每次给簇头分配固定数据包,进行 5000 次重建,来对比不同路由由算法数据传输的大小。从图 6 可以看出,随着次数的不断增加,3 种路由方案的数据量都在增加,当分簇次数达到 2500 时,传输的数据不再增加,这是由于 2500 次分簇形成了一个相对平衡的网络,传输数据相对稳定。同时,链路可用性受主用户活动影响的概率增大,路由的稳定性降低,因此路由切换次数与数据重传次数也将增大。与对比路由相比,稳定性约束下的能量路由由消耗的能量在不同的重建次数下依然保持着最大的传输数据能力。

图 7 给出了分别使用基于稳定性的路由、能量改进的 leach 路由和稳定性约束下的能量路由 3 种策略方法时认知无线传感器网络环境下网络生存周期的情况。从图 7 可以看出,随着分簇的不断进行,死亡节点的个数不断增加,直到能

量全部消耗,相比于其他两种方法,基于稳定性的能量路由策略的节点死亡较慢,生命周期略长于一般的路由。

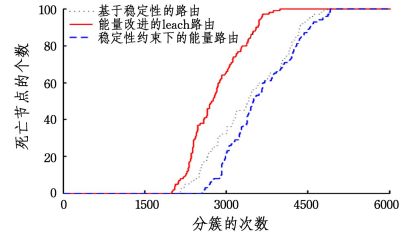


图 7 生存周期与重建次数的关系

Fig. 7 Relationship between life cycle and number of reconstruction

图 8 给出了不同 P_m 值下的总能量消耗情况,初始时 P_m 较小,链路还没有趋于稳定,且能量消耗也在增加。当 P_m 值从 0.4 增加到 0.8 时,能量消耗趋势服从凹变化,先减小到拐点时达到最小,然后再开始增大。而当 P_m 在 0.6~0.7 之间时,稳定值达到最优,当 P_m 值达到最大时,一些能量消耗小的路由被排除,导致性能下降。

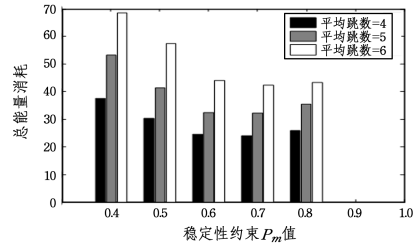


图 8 不同稳定性约束 P_m 值下总能量消耗的比较

Fig. 8 Comparison of total energy consumption under different stability constraints P_m

能量效率是衡量路由性能的重要指标,如果认知无线传感器网络的能量消耗过快,将造成能量效率低,从而导致传感器网络的生命周期太短而无法传输数据。如图 9 所示,从整体趋势观察,3 条路由的能量消耗都随着授权因子的增大而不断增加,但是与其余两条路由相比,授权因子对于基于稳定性的路由的能量消耗基本没有影响,这是由于授权用户占用信道导致链路失效。从整体情况来看,基于稳定性的路由在整个过程中优于其他路由。

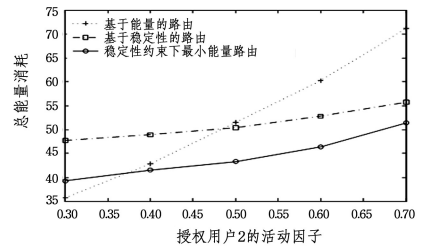


图 9 授权用户 2 的活动因子对总能量消耗的影响

Fig. 9 Influence authorization user 2 activity factor on total energy consumption

从图 10 中看出,链路失效与跳数的变化成正相关,随着跳数的增加,只有基于稳定性的路由的总能量消耗的整体趋势趋于稳定,变化不大。因此,要尽量减少不必要的链路失效次数,以避免节点能量的消耗。

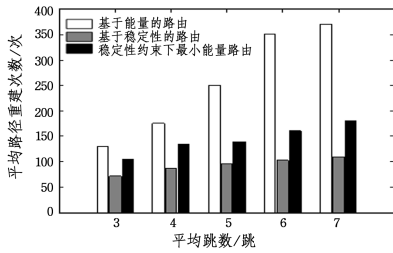


图 10 不同平均跳数下的路由重建次数的比较

Fig. 10 Times of routing reconstruction under different average hop counts

结束语 本文提出一种基于稳定性的能效路由的协议,综合考虑了时延、稳定性、能量三大重要因素。能量消耗主要考虑了节点在传输过程中的能量消耗以及簇首节点在接收和融合其他节点发来的数据所消耗的能量。在稳定性方面,通过采用 ON-OFF 模型对授权用户进行建模,计算链路的稳定性 $P_s(n_i, n_j, c_k)$,通过实例分析得出了稳定性对路由总能量消耗的重要影响。最后,实验结果表明,提出的完整算法模型在能量、稳定性方面明显优于其他两种算法。

参考文献

[1] LEE H R, CHUNG K Y, JHANG K S. A Study of Wireless Sensor Network Routing Protocols for Maintenance Access Hatch Condition Surveillance[J]. *Journal of Information Processing Systems*, 2013, 9(2): 69-78.

[2] TRAGOS E Z, FRAGKIADAKIS A, ASKOXYLAKIS I, et al. The impact of interference on the performance of a multi-path metropolitan wireless mesh network[C]// *IEEE Symposium on Computers and Communications*. IEEE Computer Society, 2011: 199-204.

[3] ARAUJO A, BLESIA J, ROMERO E, et al. Security in cognitive wireless sensor networks. Challenges and open problems [J]. *Eurasip Journal on Wireless Communications & Networking*, 2012, 2012(1): 1-8.

[4] HEINZELMAN W, CHANDRAKASAN A, BALAKRISHNAN H. Energy-Efficient Protocol for Wireless Microsensor Networks[C]// *Hawaii International Conference on System Sciences*. 2000: 3005-3014.

[5] YOUNIS O, FAHMY S. HEED: a hybrid, energy-efficient, dis-

tributed clustering approach for ad hoc sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 2004, 3(4): 366-379.

[6] MAO L, ZHANG Y. An energy-efficient LEACH algorithm for wireless sensor networks[C]// *Chinese Control Conference*. 2017: 9005-9009.

[7] ALNAWAFI E, MARGHESCU I. DMHT-LEACH: Dynamic multi-hop technique for wireless sensor networks[C]// *International Symposium on Signals, Circuits and Systems*. IEEE, 2017: 1-4.

[8] LIU J, REN P Y, XUE S L, et al. Primary-user behavior based joint routing and channel allocation algorithm in cognitive radio networks [J]. *Journal on Communications*, 2011, 32(11): 183-190. (in Chinese)

刘婧, 任品毅, 薛少丽, 等. 认知无线网络中基于授权用户行为的联合路由和信道分配算法[J]. *通信学报*, 2011, 32(11): 183-190.

[9] JAEWOO S, SRIKANT R. Improving Channel Utilization via Cooperative Spectrum Sensing With Opportunistic Feedback in Cognitive Radio Networks [J]. *Communications Letters IEEE*, 2015, 6(19): 1065-1068

[10] HUA N, CAO Z G. Routing of cognitive radio networks: A survey [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2010, 38(4): 910-918. (in Chinese)

滑楠, 曹志刚. 认知无线网络路由研究综述[J]. *电子学报*, 2010, 38(4): 910-918.

[11] CALEFFI M, AKYILDIZ I, PAURA L. OPERA: Optimal Routing Metric for Cognitive Radio Ad Hoc Networks [J]. *IEEE Transaction on Wireless Communications*, 2012, 8(11): 2884-2894

[12] GROSS D. *Fundamentals of Queuing Theory*[M]. J. Wiley & Sons, 2008.

[13] HARSHA P M, KANAKARAJU R. Network lifetime enhancement of clustering approach using handoff mechanism in WSN [C]// *IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology*. IEEE, 2017.

[14] SEDGEWICK R. *Algorithms in C++: Graph Algorithms* (3rd ed.) [M]. Pearson Education, 2002.

[15] DE E, MARTINS V, PASCOAL M M B. Deviation Algorithms for Ranking Shortest Paths[J]. *International Journal of Foundations of Computer Science*, 1999, 10(3): 247-261.

(上接第 96 页)

[28] FAWCETT T. An Introduction to ROC Analysis[J]. *Pattern Recognition Letters*, 2006, 27(8): 861-874.

[29] NEWMAN M E J. Finding Community Structure in Networks Using the Eigen Vectors of Matrices[J]. *Physical Review E*, 2006, 74(3): 036104-036113.

[30] GIRVAN M, NEWMAN M E J. Community Structure in Social and Biological Networks[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2002, 99(12): 7821-7826.

[31] ULANOWICZ R E, BONDAVALLI C, EGNOTOVICH M S. Network Analysis of Trophic Dynamics in South Florida Ecosystem[R]. FY 97: The Florida Bay Ecosystem, 1997.

[32] ACKLAND R. Mapping the US Political Blogosphere: Are Conservative Bloggers more Prominent? [C] // *Blog Talk Downunder 2005 Conference*. Sydney, 2005.

[33] DONG Y X, KE Q, WU B. Link Prediction Based on Node Similarity[J]. *Computer Science*, 2011, 18(7): 162-164. (in Chinese)

东昱晓, 柯庆, 吴斌. 基于节点相似性的链接预测[J]. *计算机科学*, 2011, 18(7): 162-164.

[34] LV L Y. Link Prediction on Complex Networks[J]. *Journal of University of Electronic Science and Technology of China*, 2010, 39(5): 651-661. (in Chinese)

吕琳媛. 复杂网络链路预测[J]. *电子科技大学学报*, 2010, 39(5): 651-661.