

文章编号: 2095-4980(2019)06-1012-05

WSNs 中基于能效感知的任播路由

尚亚丽

(长春师范大学 教育学院, 吉林 长春 130032)

摘 要: 针对工作周期(DC)的无线传感网络(WSNs), 研究人员试图利用任播技术降低传输时延和能耗, 并进行了深入研究。为此, 提出新的能效任播路由(EEAR)。相比现存的任播路由指标, EEAR 路由引用新的任播路由指标, 称为期望能耗(EEC)。利用 EEC 合理地选择转发节点集, 进而最小化传输数据包的能耗。仿真结果表明, 提出的 EEAR 协议降低了能耗, 同时, 也维持了合理的时延和高的数据包传递率。

关键词: 无线传感网络; 工作周期; 任播路由; 路由指标; 能效; 期望能耗

中图分类号: TP393

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201906.1012

An energy-efficient Anycast routing in Wireless Sensor Networks

SHANG Yali

(Institute of Education, Changchun Normal University, Changchun Jilin 130032, China)

Abstract: Aiming at the Wireless Sensor Networks(WSNs) of Duty Cycle(DC), the researchers have attempted to reduce transmission delay and energy consumption by Anycast technology, and have conducted in-depth research. An Energy Efficient Anycast Routing(EEAR) protocol is proposed in this paper. EEAR adopts a new Anycast routing metric called Expected Energy Consumed(EEC) that is contrary to previous Anycast routing metrics. By using the new Anycast routing metric, the forwarder set is selected reasonably and the expected energy consumed can be minimized along the path of a packet. Simulation results show that EEAR consumes less energy than similar existing protocols, while maintaining a comparable delay and high delivery rate.

Keywords: Wireless Sensor Network; Duty Cycle; Anycast routing; routing metrics; energy-efficient; Expected Energy Consumed

无线传感网络(WSNs)^[1-2]广泛应用于环境监测, 如森林防火监测。在 WSNs 中, 传感节点依据低功耗的无线技术完成通信。同时, 这些节点常用电池供电, 但电池能量有限。一旦节点能量消耗殆尽, 不利于更换电池。因此, 传感节点的能效成为 WSNs 的研究热点之一。

通过减少传感节点工作时间, 可降低节点能耗速度, 如工作周期(DC)策略。在 DC 策略中, 传感节点在大多数时间内无线电是处于关闭状态, 即休眠状态。仅在唤醒状态时才进行通信。而无线电的关闭、开启由媒介接入控制(Medium Access Control, MAC)协议控制, 如 S-MAC^[3], T-MAC^[4]。然而, 这些 MACs 采用同步控制策略, 增加开销, 并且还需维持时钟同步。文献[5]提出基于异步的 MACs(X-MAC)协议, X-MAC 协议规定数据包的携带节点重复发送短的唤醒包, 直到接收节点唤醒并接收到它的响应。而通过提高数据传输技术, 也能减少能耗, 如任播(Anycast)技术。Anycast 是指数据包只传输给转发节点集内的某一个节点, 其能够降低能耗和时延。Anycast 技术允许传感节点动态选择可靠链路^[6-7], 提高了数据传输的可靠性。然而, 现存的 Anycast 技术并没有考虑能耗问题。

目前, 研究人员针对 WSNs 的 Anycast 技术进行大量研究, 如地理随机转发(Geographic Random Forwarding, GRF)策略^[8]、基于聚敛转发的 MAC(Convergent packet forwarding based MAC, C-MAC)协议、自适应——Anycast MAC(An Adaptive Anycast MAC, A²-MAC)协议。但是, 这些协议并没采用实质的 Anycast 路

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-08-18

基金项目: 2015 年吉林省教育厅“十二五”社会科学研究规划项目(吉教科文合字[2015]第 278 号)

由指标, 而只是依据节点的地理位置决策路由。文献[9]提出收集树协议(Collection Tree Protocol, CTP)。在 CTP 中, 每个节点维持路由指标值, 其估计节点离信宿的“距离”。通常利用期望传输次数(Expected Transmission Count, ETX)测量这个“距离”。节点形成通往信宿的路由指标梯度, 然后, 选择具有更低的路由指标的节点转发数据包。每个节点选择具有最低路由指标的节点作为它的父节点, 从而形成树结构。文献[10]针对 DC 的 WSNs, 提出启发式时延边界(Heuristic Latency Bounding, HLB)算法。HLB 算法强调了组播时延, 并利用最小化活动时隙, 降低传播时延。该算法运行复杂, 并不适用于低功耗的 WSN 网络。

为此, 本文提出新的能效任播路由(Energy-efficient Anycast Routing, EEAR)。EEAR 路由引用基于期望能耗作为任播路由指标, 并通过此指标构建转发节点集, 再从中任意选择一个节点作为数据包的转发节点。仿真数据表明, 提出的 EEAR 路由能够有效降低能耗。

1 系统模型

EEAR 路由是基于 DC 的异步 MAC 协议, 如图 1 所示。每个节点周期的广播 beacon 包, 节点通过交互 beacon 包, 获取邻居节点信息。在广播 beacon 间隔 T_F , 节点 i 的潜在转发节点进行休眠, 休眠时间从 $[0.5T_W, 1.5T_W]$ 中随机选择。其中 T_W 是由网络设定的唤醒间隔, 即节点的期望休眠时间。假定节点 i 需要传输数据包, 节点 i 也称为源节点。当节点 i 被唤醒, 并随机监听 $X_{\min}$ 时间^[11], 然后广播 beacon 包, 等待节点 i 的潜在转发节点唤醒。而 $X_{\min}$ 的期望值可依据式(1)计算:

$$E[X_{\min}] = \frac{T_W}{|F_i| + 1} \quad (1)$$

式中: F_i 为节点 i 的转发节点集, $|F_i|$ 为转发节点集内的节点数。

如图 1 所示, 节点 i 的转发节点集 $F_i = \{j_1, j_2\}$ 。源节点 i 在潜在的转发节点(节点 j_1, j_2)唤醒之前, 等待了 $X_{\min}$ 时间, 再传输 beacon 包。假定节点 j_2 先唤醒, 因此 $X_{\min} = X_2$ 。所以, 节点 i 就向节点 j_2 发送数据 DATA。一旦收到, 节点 j_2 就回应 ACK 包。

2 EEAR 路由

2.1 构造转发节点集

EEAR 路由引用期望的能量消耗作为构建转发节点集的指标。令 N_i 表示节点 i 的一跳邻居集。而转发节点集属于一跳邻居集的子集, 即 $F_i \subseteq N_i$ 。

最初, 源节点先计算 N_i 内节点的权重因子, 并消耗能量和数据包接收率(Packet Reception Rate, PRR)。令 W_j 表示节点 $j \in N_i$ 的权重因子, 其定义如式(2)所示:

$$W_j = E_j^{\text{com}} + \frac{2}{p_{ij}}, \quad j \in N_i \quad (2)$$

式中: E_j^{com} 为节点 j 所消耗的能量; p_{ij} 为链路 l_{ij} 的数据包接收率。引用衰落传播模型, 可依距离估计链路 p_{ij} 值, 具体可参照文献[11]。

依据权重因子, 对 N_i 内节点进行升序排序。令 $\hat{N}_i$ 为排序后的邻居集。先将 $\hat{N}_i$ 的第一个节点加入 F_i , 然后再计算节点 i 的期望能耗值, 其定义如式(3)所示:

$$EEC_i^k = \frac{\sum_{j \in F_i} W_j}{|F_i|} + \frac{T_W / T_F}{|F_i| + 1} \quad (3)$$

式中 EEC_i^k 为 k 次所计算期望能耗的值。例如, 将 $\hat{N}_i$ 内第一个节点加入 F_i 时, 所计算的期望能耗值表示为 EEC_i^1 , 即 $k=1$ 。

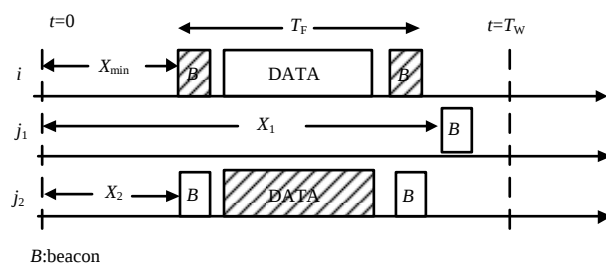


Fig.1 System model
图 1 系统模型

将 $\hat{N}_i$ 内第 2 节点试图加入 F_i , 因此, $|F_i|=2$, 计算 EEC_i^2 值。再将 EEC_i^2 值与 EEC_i^1 进行比较, 如果 EEC_i^2 大于 EEC_i^1 , 则停止将 $\hat{N}_i$ 内的节点加入 F_i 。否则, 继续添加, 直到后一次所计算的期望消耗值大于前一次。这意味着, 新添加的节点增加期望能耗^[12]。因此, 需要停止向转发集 F_i 内添加节点。

式(3)中, 其第一项表示多跳路由的平均期望能耗值, 第二项表示节点 i 在一跳时延内所消耗的能量, 即在等待转发节点唤醒所消耗的能量。

以图 2 为例, 图 2 显示了网络拓扑结构, 并标出链路的 PRR 和节点的能耗值。假定节点 F 为源节点 ($i=F$), 而 $N_i=\{E,C,D\}$ 。依据权重因子对 $N_i=\{E,C,D\}$ 进行升序排序, 排序后为 $\hat{N}_i=\{C,D,E\}$ 。先将 $\hat{N}_i$ 内第一个节点加入转发节点集, 即 $F_i \leftarrow C$, 然后计算 $EEC_i^1=104.5$ (假定 $T_w/T_f=100$)。再将 $\hat{N}_i$ 内第二个节点加入转发节点集, 即 $F_i=\{C,D\}$, 并计算 $EEC_i^2=88.55$ 。 EEC_i^2 小于 EEC_i^1 , 说明加入节点 D 降低了 EEC 。重复执行, 将节点 E 加入, 再计算 $EEC_i^3=91.5$, 而 EEC_i^3 大于 EEC_i^2 , 说明加入节点 E 提高了 EEC 。因此需要终止添加节点, 节点 E 不能作为转发节点, 最终, 节点 F 的转发节点集为 $\{C,D\}$ 。

2.2 选择下一跳转发节点

所有节点遵照 2.1 节过程, 维持一个转发节点集。源节点将最先接收到 beacon 包的节点作为下一跳转发节点。当选定了下一跳转发节点后, 节点就将数据包传输至此节点, 进而完成任播。

3 性能仿真

利用 NS2++ 软件建立仿真平台。传感节点分布于 $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ 的网格空间, 如图 3 所示。源节点位于空间的右上角, 而信宿位于空间的左下角。箭头线表示数据包从源节点传输到信宿传输某一条路径, 星形表示潜在的转发节点, 圆圈表示传感节点。

传感节点产生数据包的过程服从泊松分布, 其分布参数为 λ 。为了更好地分析路由性能, 分别考虑节点数 N 、唤醒间隔 T_w 对路由性能的影响, 包括平均能耗、平均端到端时延和数据包传递率。此外, 本文依据文献[3]设定唤醒间隔 T_w 值, 默认 T_w 值为 2 s 。

4 数据分析

4.1 节点数对路由性能的影响

首先分析节点数对平均能耗、平均端到端时延和数据包传递率的影响, 如图 4 所示。仿真参数: 默认的唤醒间隔 $T_w=2\text{ s}$, $1/\lambda=30\text{ s}$ 。传感节点数 N 从 25 变化至 400。

从图 4(a)可知, 提出的 EEAR 路由的能耗最低, 而 HLB 的能耗最大。原因在于: EEAR 路由通过期望能耗值选择转发节点, 避免了能耗过高的节点, 优先选择能耗低的节点参与路由, 平衡了网络能耗。HLB 算法强调时延, 在决策路由时并没有考虑能耗。图 4(b)显示了 EEAR, CIP 和 HLB 的数据传输时延。可以看出, 相比 CIP, EEAR 有效地控制时延, 但 HLB 算法的时延更低。这主要是因为: HLB 算法旨在降低时延, 并通过最小化节点活动时隙, 减少数据传输时延。图 4(c)描绘了 EEAR 路由的数据包传递率随节点数变化曲线, 可以看出, HLB 算法的数据包率最低, 且随着节点数增加而下降。原因在于: HLB 算法只强调时延, 并没有考虑节点能耗问题。这就降低了路由稳定性, 最终导致数据包率的下降。

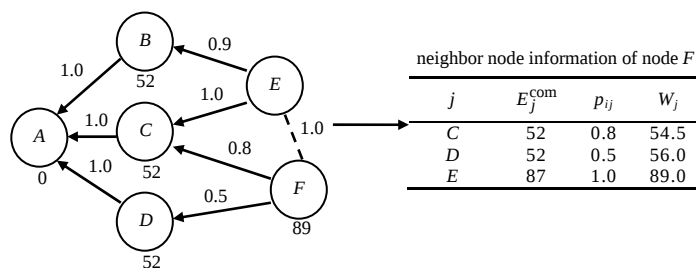


Fig.2 An example of building a forwarding nodes set
图 2 构建转发节点集的示例

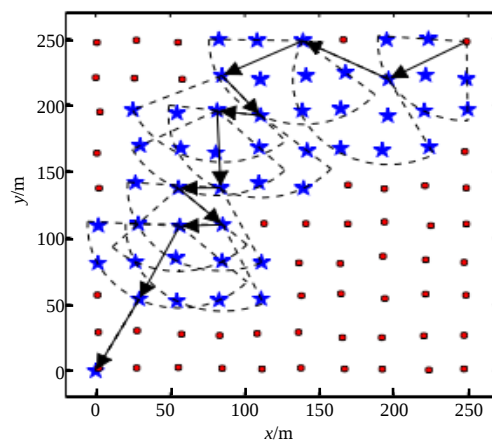


Fig.3 Network model
图 3 网络模型

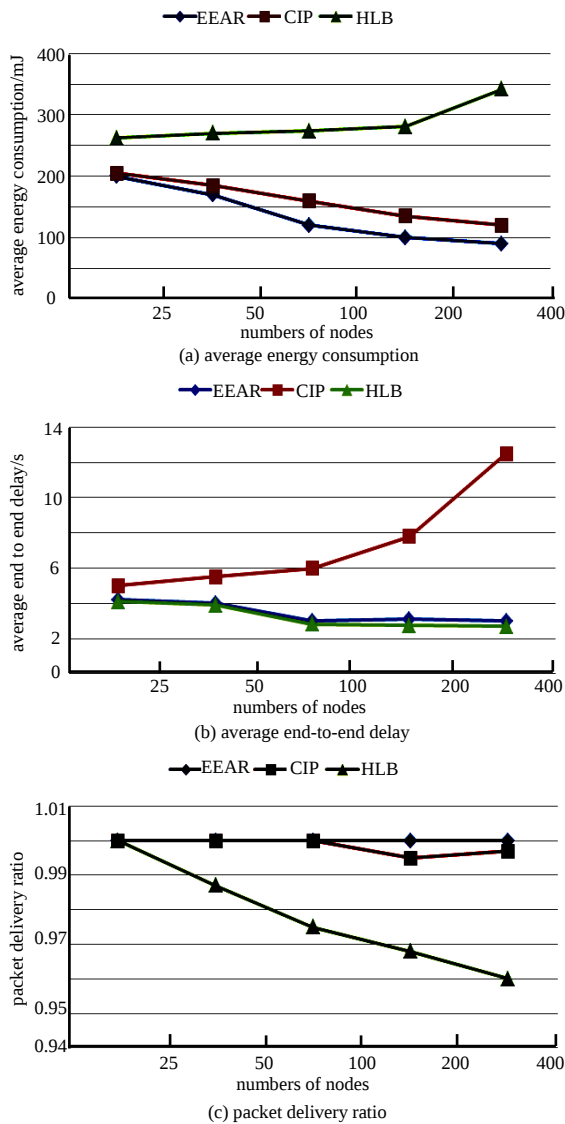


Fig.4 Effect of node number on routing performance
图4 节点数对路由性能的影响

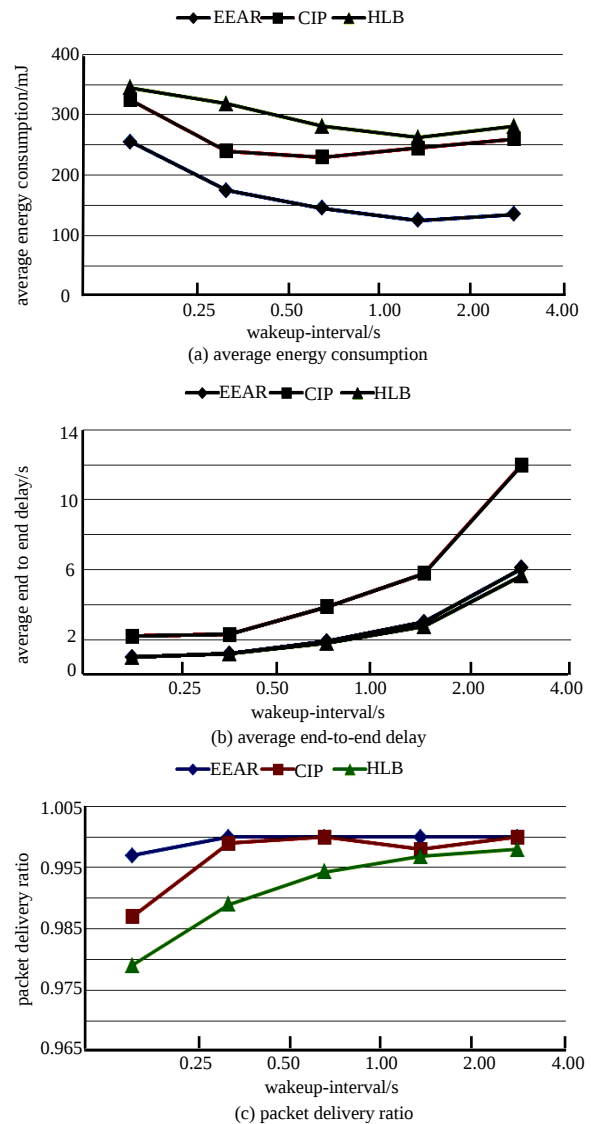


Fig.5 Effect of Wakeup-Interval on routing performance
图5 唤醒间隔对路由性能的影响

4.2 唤醒间隔对路由性能的影响

接下来, 分析唤醒间隔 T_w 对平均能耗、传输时延和数据包传递率的影响。仿真参数: $N=100, 1/\lambda=30\text{ s}$ 。唤醒间隔 T_w 取 0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 如图 5 所示。

观察图 5(a)数据不难发现, 相比 CIP 和 HLB, EEAR 路由有效地均衡了网络能耗, 降低了平均能耗。在 T_w 的变化期间, EEAR 路由均保持最低能耗, 且 $T_w=2\text{ s}$ 时的能耗最低。图 5(b)显示了 3 个路由的平均端到端传输时延随 T_w 的变化情况。从数据可知, CIP 的时延仍保持最高, 而 HLB 的时延仍最低, 这与图 4(b)相似, 并且数据传输时延随唤醒间隔 T_w 的增加而上升。 T_w 的增加, 直接延长发送节点的等待时间, 必然增加数据的传输时延。最后, 分析了数据包传递率随 T_w 的变化情况, 如图 5(c)所示。由图可知, T_w 的增加提升了数据包传递率, 原因在于: T_w 越大, 网络资源的使用频率越低, 越有利于快速地传输数据包。此外, 相比 CIP 和 HLB, EEAR 路由仍保持高的数据包传递率。

5 结论

为降低节点能耗, 提出能效的任播路由 EEAR。EEAR 路由引用了期望能耗值选择转发节点集, 再从中选择

下一个节点转发数据包。仿真数据证实,EEAR路由有效地降低了能耗。后期,用WSN试验台测试EEAR路由的性能,并分析其通信开销性能,这将是未来研究工作的方向。

参考文献:

- [1] NIAYESH G, ABU B K, MOHD H S Z, et al. Collaborative mobile sink sojourn time optimization scheme for cluster-based wireless sensor networks[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 4(7): 23–31.
- [2] 江禹生, 冯砚毫, 管芳, 等. 无线传感网非测距三维节点定位算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2016, 39(5): 140–147. (JIANG Yusheng, FENG Yanhao, GUAN Fang, et al. Rang-free three-dimensional node location algorithm for the wireless sensor network[J]. Journal of XIDIAN University(Natural Science Edition), 2012, 39(5): 140–148.)
- [3] YE W, HEIDEMANN J, ESTRIN D. Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2004, 12(3): 493–506.
- [4] DAM T V, LANGENDOEN K. An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks[C]// ACM Sen System. Los Angeles, CA, United states: Association for Computing Machinery, 2015: 23–31.
- [5] BUETTNER M, YEE G V, ANDERSON E, et al. X-MAC: a short preamble MAC protocol for duty-cycled wireless sensor networks[C]// ACM Sen System. Boulder, CO, United states: Association for Computing Machinery, 2016: 45–51.
- [6] SCHAEFER G, INGELREST F, VETTERLI M. Potentials of opportunistic routing in energy-constrained wireless sensor networks[J]. EWSN, 2017, 3(8): 27–37.
- [7] UNTERSCH S, RENNER C, TURAU V. Opportunistic, receiver-initiated data-collection protocol[J]. EWSN, 2016, 2(5): 78–81.
- [8] ZORZI M, RAO R R. Geographic random forwarding for ad hoc and sensor networks: multihop performance[J]. IEEE Transactions on Mobile Computing, 2017, 2(4): 337–348.
- [9] FONSECA R, GNAWALI O, JAMIESON K, et al. The Collection Tree Protocol(CTP)[EB/OL]. (2006–01–10) [2019–07–24] Available: <http://www.tinyos.net/tinyos-2.x/doc/html/tep123.html>.
- [10] CHEN Q, GAO H, CHENG S, et al. Centralized and distributed delay-bounded scheduling algorithms for multicast in duty-cycled wireless sensor networks[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2017, 25(6): 3573–3586.
- [11] 曹斌, 刘栓. IEEE 802.15.4 传感网络一种降低RDC路由协议[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(11): 170–176. (CAO Bin, LIU Shuan. On a routing protocol to reduce RDC in IEEE 802.15.4 sensor networks[J]. Journal of Southwest China Normal University(Natural Science Edition), 2016, 41(11): 170–176.)
- [12] 全杰, 杜治高, 钱德沛. 基于 Inter-Flow 网络编码的多 Sink 无线传感网络 Anycast 路由[J]. 计算机研究与发展, 2014, 51(1): 161–172. (TONG Jie, DU Zhigao, QIAN Depei. Inter-flow network coding based Anycast routing protocol for multi-sink wireless sensor networks[J]. Journal of Computer Research and Development, 2014, 51(1): 161–172.)

作者简介:



尚亚丽(1975–), 女, 长春市人, 讲师, 主要研究方向为网络教育应用. email: 76166810@qq.com.