

基于时延敏感无线传感器网络的最优任播算法

顾云丽^{1,2} 钱焕延¹ 徐昕² 杜杰²

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)¹

(南京信息工程大学 江苏省网络监控中心 南京 210044)²

摘要 任播技术应用在基于休眠唤醒机制的无线传感器网络(WSN)中可以改善其时延较长的问题,但以往技术是针对每一跳候选节点的休眠时延进行优化的,该策略在端对端时延上往往并不最优甚至有时效果很差。针对端对端时延问题提出基于时延敏感 WSN 的最优任播算法。协议中基站采用 AODV 多路径路由由协议获取任播路径信息,采用遗传算法进行最优化计算,并将所得各节点至任播组最优任播路径的信息返回给各节点。该算法具有自适应调节任播路径和全局优化的特点。实验数据表明,与以往算法相比,该算法可以更有效地降低端对端时延。

关键词 无线传感器网络,任播,时延敏感,端对端时延,遗传算法

中图分类号 TP393 文献标识码 A

Optimal Anycast Routing Algorithm for Delay-sensitive Wireless Sensor Networks

GU Yun-li^{1,2} QIAN Huan-yan¹ XU Xin² DU Jie²

(School of Computer Science and Technology, NUST, Nanjing 210094, China)¹

(Jiangsu Engineering Center of Network Monitoring, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)²

Abstract In sleep-wakeup scheduling Wireless Sensor Networks (WSN), anycast technique can significantly reduce time delay. However, previous research work only attends to optimizing the time delay during each hop, this scheme is not optimal even sometimes bad for end-to-end time delay. An optimal anycast routing algorithm for delay-sensitive WSN was proposed to solve the problem of end-to-end time delay. In the algorithm, base stations apply AODV-based multipath routing protocol to acquire anycast routing information, then genetic algorithm is applied to search the optimal anycast paths between each nodes and bases stations, after that, base stations report the information to each nodes. Our algorithm has features of both global optimization and self-adaptivity of switching anycast paths. Experiment results show that our algorithm can reduce end-to-end time delay more efficiently in contrast to previous algorithms.

Keywords Wireless sensor networks, Anycast, Delay-sensitive, End-end delay, Genetic algorithm

1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)节点的工作依赖于有限电源(电池),因此 WSN 的生存期是一个关键参数。在 WSN 路由协议研究领域,已有大量研究成果用于提高 WSN 生存期,如数据融合、周期性休眠唤醒机制^[1,2]等。其中,周期性休眠唤醒机制是目前 WSN 中最节能的方式之一,其策略是当节点无需发送或传递数据分组时,节点安排自己周期性的休眠和唤醒。由于能够节省大量监听能耗,该策略大大提高了网络寿命。但由于该策略下节点并不是时时都处于工作状态,发送者往往不得不等待下一跳节点自然唤醒,这会带来较长的休眠时延。在多跳 WSN 中,在每一跳上会累积休眠时延,最终端对端时延会非常严重。若系统为节省能耗而增加各节点休眠时间,这种休眠时延情况则会更加严重,这对如海啸监测等时延敏感的 WSN 应用是致命的。

本文针对基于休眠唤醒机制的时延敏感 WSN 如何改善

时延问题,提出一种基于遗传算法的最优任播算法,该算法可以有效地降低 WSN 的端对端时延问题,提高网络性能。

2 问题的提出

随着 WSN 规模增大,在单基站(或称 Sink)中,节点汇报其监测数据分组至基站的能耗越来越高,解决办法之一是增加基站的数目并引入任播技术。本文的研究工作是关于任播技术在多基站 WSN 中的应用。任播是 IPv6 提供的一种新型网络服务,指一个发送者与通信组中的任意一个之间的通信。本文标记: A 为某任播地址; $G(A)$ 为共享 A 的任播组员集合(即基站集合); A_i 为 $G(A)$ 中第 i 个组员; M 为 $G(A)$ 组员数目;WSN 共有 N 个传感节点。在多基站的 WSN 采用任播,节点可以将分组传递给任一任播组员(即基站)处,避免 WSN 中部分节点能量消耗过快而导致网络生存期过短。如 Tan^[3] 将任播技术应用于 MAC 协议中以减少 WSN 能耗;Hou^[4] 等人将 WSN 体系结构分为两层,给出一个多项式时间启发式最优基站选择算法,各节点按照该算法选择相应最优

到稿日期:2012-03-25 返修日期:2012-07-14 本文受国家自然科学基金(61103142)资助。

顾云丽(1978-),女,博士生,讲师,CCF 会员,主要研究方向为网络应用,E-mail: guyunli@hotmail.com;钱焕延(1950-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络应用及网络应用,E-mail: hyqian@mail.njust.edu.cn(通信作者)。

基站并按照给定的一连串的操作程序任播数据流。

关于任播技术在基于休眠唤醒机制的时延敏感 WSN 中的应用这一研究领域还比较新颖。若在休眠唤醒机制下应用任播技术,节点在选择下一跳节点时可以选择候选路径中最先醒来的节点,这可以大大降低休眠等待时间,相关的研究成果有:Wang^[5]针对休眠唤醒机制时延较长以及 WSN 传输不可靠性等缺点,提出一种基于单播、任播和多播技术的编码数据分组传输机制,从理论上分析节点休眠概率和链路失效概率对网络性能的影响,权衡可靠性与时延两方面因素,提高传输可靠性并减少时延;Kim^[6]等学者讨论在 MAC 层如何最优规划各节点的休眠唤醒时间,优化端对端时延;Ashraf^[7]提出 Any-MAC 协议,讨论任播技术在 WSN 异步 MAC 协议中的应用,并将该成果应用在已有的 X-MAC 和 NPM 协议中。

以上文献大多研究的是如何规划安排错开路径中节点的休眠时间,这样分组在每一跳都可以减少休眠等待时间,但每一跳时延的最优化不一定导致端对端时延的最优化。图 1 中, S 是源节点, A₁, A₂ 和 A₃ 是任播组员,存在的任播路径有 P₁=S-n₁-n₂-n₃-A₁, P₂=S-n₄-n₅-A₁ 和 P₃=S-n₆-A₂。我们以变量 r_i 表示节点 i 的唤醒率,唤醒率是指单位时间内节点从唤醒开始至休眠结束这样一个周期的次数。在每一个休眠唤醒周期,每个节点至少需保证时长为 Δt 的唤醒状态(工作状态),当节点有发送传递等任务时,可以额外增加相应工作时间。我们以向量 r=(r₁, r₂, …, r_N) 表示 WSN 各节点的唤醒率(WSN 系统唤醒率向量)。图 1 中, r=(10, 10, 1, 8, 8, 6), 以往协议的策略会选用最先醒来的候选节点作为下一站,这显然会更高概率地选用任播路径 P₁, 其次是路径 P₂, 但从图中可知端对端时延效率是 P₁<P₂<P₃。因此,每一站选择最先醒来节点的任播策略的优化性能并不一定很好,该策略只是简单优化每一跳休眠等待时延,既没有考虑到路径跳数,也没有优化整体端对端时延。而文献[7,8]采用规划安排错开各节点休眠时间的策略,该策略要求所有节点都必须严格按照指定计划发送分组,但 WSN 节点易失效又容易出现时钟偏移现象,还有为了均衡能耗 WSN 有时会采用其他路径发送数据,那么就重新规划所有节点休眠安排,因此该策略在大型或动态性较大的 WSN 中实际部署会比较困难,因此其优化效果并不一定理想。

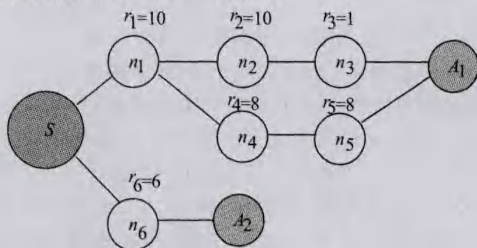


图 1 基于休眠唤醒机制的 WSN 任播示意图

3 WSN 模型

由于 WSN 数据流量通常很小,多采用按需驱动路由协议。本文采用 AODV 协议寻找和维护路由信息,并将其进行一些简单的改动来满足多路径路由的目的。其基本思想为:节点有发送需求且当地路由表无任播路径信息时,发送 RREQ 查找路由;查找过程中避免路由环;目标节点(基站)保留所有路径不同的 RREQ 并返回相应 RREP 给源节点;源节

点收到基站回复的 RREP, 建立到各基站的多条任播路径;当节点需调整其唤醒率时需通知各基站, 基站根据各节点发布的唤醒率信息计算各节点至基站的最优任播路径, 并将此信息通知各节点, 最优计算见后文。

WSN 中每个节点都有自己的唤醒率, 高唤醒率显然会导致高能耗, 我们设置的节点的唤醒率与其剩余能量率有关, 当节点能量率低于一定阈值时, 相应降低其唤醒率。

以往大多文献关注的是每一跳时延优化, 本文关注的是端对端时延, 本文定义端对端时延为源节点发送至任一基站第一个分组所经过的时延。通常事件监测 WSN 的监测数据量很小, 往往一个分组即可, 因此本文定义符合事件检测 WSN 的实际应用需求。即使在需求多个分组的 WSN 应用中, 本文定义仍然基本符合实际需求。我们规定每一个节点完成一个发送任务后, 需额外维持唤醒状态一段时间, 这样后续分组仍然可以以较短的时延到达目的地, 因此后续分组的时延甚至会低于第一个分组。

对于任播路径 $P=S-n_0-n_1-n_2-\dots-n_L$, 其端对端时延 D_P 计算如下:

$$D_P = \sum_{i=0}^L (D_t(n_i) + D_s(n_i)) \quad (1)$$

式中, S 是源节点, $n_L \in G(A)$, $D_t(n_i)$ 是在节点 n_i 处的传输时延, $D_s(n_i)$ 是等待节点 n_i 被唤醒的等待时延。当节点处于唤醒状态时, 等待时延为 0; 当节点处于休眠状态时, 平均等待时延为 $(1-r_i \Delta t) / 2r_i$ 。因此, 可得 $D_s(n_i)$ 的期望值如下:

$$D_s(n_i) = (1-r_i \Delta t)^2 / 2r_i \quad (2)$$

当 $r_i \in [0, 1/\Delta t]$ 时, 可计算出 $D_s(n_i)$ 单调递减, 由此可知增加节点唤醒率可减少该节点的休眠等待时延。图 1 中, 设 $\Delta t=0.02$ 单位时间, 则 P_1, P_2 和 P_3 的端对端时延的期望值(忽略传输时延)分别为 0.5442, 0.1202, 0.06453。由此可见, 以往文献最先醒来节点优先选择策略的端对端时延表现并不好, 只有综合考虑所有任播路径的节点情况才能找到理想优化结果, 但该问题是一个单 QoS 约束多路径任播路由问题, 根据文献[8]可知, 这是一个 NP 难题, 无法得到有限多项式解, 而遗传算法只需目标函数和相应的适应度函数就可全局寻优, 因此本文采用遗传算法来解决该优化问题。

4 遗传算法优化求解

通常情况下, 传感器节点能量少, 计算能力弱, 而基站能量充足, 计算能力强, 因此本文将最优计算迁移至基站。各基站采取前文所述 AODV 多路径路由方法来获得各节点至基站的多条任播路径信息; 通过各节点发布的唤醒率消息基站可以时时获得各节点的最新唤醒率; 采用遗传算法求解各节点至基站的最优任播路径, 并将该信息返回给各节点。当节点能量低于一定阈值需降低唤醒率时, 需在下次休眠前将该信息通知至基站, 各基站收到该通知信息后, 需重新计算最优任播路径并重新通知各节点。遗传算法优化步骤如下。

4.1 编码

由于各任播路径中间节点数不固定, 长度不一致, 本文采用可变长度编码方案。用节点编号表示染色体基因, 源节点到各基站的路径也采用相应节点编号序列表示, 即构成一条染色体。很显然, 染色体的第一个基因是源节点, 最后一个基因是任一基站。由于禁止出现路由环, 每个节点在一条染色体中只能出现一次, 即染色体中不能出现重复的基因。

4.2 初始种群

源节点到各基站的路径可以形成多条染色体,我们随机选择多条染色体作为任播路径的初始种群。在选取初始种群时,为了避免早熟现象,在源节点至各基站之间的一定宽度路径上随机生成一组初始种群;同时为了提高初始群体的优良因子,我们也人工选取一定比例的跳数较短的任播路径和唤醒率向量较大的任播路径加入初始种群。

4.3 适应度函数

适应函数是遗传算法在不断进化过程中用来评价个体优劣的标准。本文的适应度函数设置为端对端时延最小化优化,即 $\min D(P)$ 。

4.4 交叉

交叉方式在遗传算法中起着核心作用,其目的是父母个体把各自的优良基因遗传给下一代。新产生的任播路径的优劣依赖于交叉操作,考虑到遗传算法在路由应用的特殊性,我们采用非常规码的交叉方法,步骤如下:在随机产生的两个个体中随机设置一个或多个交叉点,将染色体分成多个基因块,然后以一定交叉概率在交叉点处相互交换两个个体的部分染色体,从而产生出两个新的个体。在选取交叉点时,首选两个个体中出现相同的基因处为交叉点,如果没有相同基因,则选择基因相似处为交叉点。由于路径不能出现路由环,因此删除新产生的个体中重复的基因。

4.5 变异

变异是对群体中的个体串的某些基因作变动,其目的是保持群体的多样性,以便产生更加满足适应度函数的个体。本文采用的变异方法是,对任播路径中基因块的变换,采用基因块中的基因的顺序交换和基因块中基因的变化来模拟基因的变异,因此,不同于传统的二进制变异运算,本文变异操作可以随机获取新的链路。

5 实验与分析

我们以最短-最短路径算法(Shortest-Shortest Path, SSP)^[9]和简化的 ANY-MAC^[7]算法(简化为最大唤醒率优先算法,Maximum Wakeup Rate First, MWRT)作为对照算法来比较本文算法的性能。

在仿真环境下,随机产生若干节点和 3 个任播组员,链路随机生成,假设节点能量的最大值为 e ,每个节点的初始能量设置区间为 $[0.3e, e]$,当节点能量为最大值 e 时,该节点的唤醒率为 10;节点能量每下降 $0.1e$,唤醒率相应减 1; $\Delta t = 0.02$ 单位时间;分组大小为 512Byte,传输速率为 80kB/单位时间,即一跳传输时延为 0.00625 单位时间。为方便讨论,忽略节点排队时延,也不讨论传输碰撞等情况。

增大网络规模,即增加节点数(40~100),任播组员数目维持不变,网络空间相应增加,观察各算法所采用的任播路径中各节点至基站的端对端时延的均值,结果如图 2 所示。

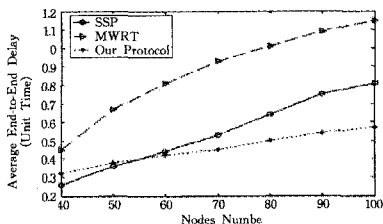


图 2 节点数目与端对端时延

由图 2 可知,当节点数目较少即网络规模较小时,任播路径数目也较少,SSP 路径实际是理论最优路径的概率很高,而本文算法采用的遗传算法是一个近似最优解算法,可能优化结果与理论最优结果有些差异,但与 SSP 相比效率相差并不大。随着网络规模增大,任播路径数目增多,各节点任播路径距离也相应增加,各算法端对端时延都相应增加,但 SSP 路径实际是理论最优路径的概率降低,本文算法优势逐渐体现。而 MWRT 只对每一跳睡眠等待时延进行优化,尤其是在网络规模增大时,其选择的路径是理论最优路径的概率越来越低,因此在各个阶段优化效果并不太好。

为模拟节点能耗对传输时延的影响,我们以 10s 为一个周期,若在上一个周期节点 n_i 有发送或传递数据分组的行为,则设定下一个周期节点 n_i 的能量下降 $0.1e$,唤醒率也相应减 1。观察 0s~70s 期间在各算法所采用的任播路径中各节点至基站的端对端时延的均值,结果如图 3 所示。

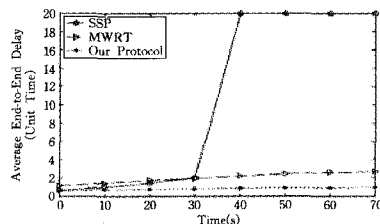


图 3 时间与端对端时延

由图 3 可知,随着时间流动,任播路径中各节点能量耗失,唤醒率降低,各算法时延都相应增加。但 SSP 算法在 30s 后,SSP 路径上出现节点能量耗尽的现象,而 SSP 算法又不更改任播路径,出现时延无穷大的现象;而本文算法和 MWRT 可以根据各节点唤醒率的变化自适应更换任播路径,因此时延效果相对比较稳定,但本文算法由于采用端对端时延优化策略,性能上要优于 MRWT。

结束语 以往基于休眠唤醒机制的任播技术多针对每一跳休眠时延进行局部优化,很难保证端对端时延全局优化效果。本文提出一种基于时延敏感 WSN 的最优任播算法,基站采用 AODV 多路径路由协议获取任播路径信息,利用基站能量充足、计算能力强的特点,采用遗传算法计算各节点至基站的最优任播路径并返回该信息至各节点。实验结果表明,由于具有自适应调节任播路径和全局最优的特点,本文算法可以比以往算法更有效地降低端对端时延。

参考文献

- [1] Park T, Park K, Lee M. Design and analysis of asynchronous wakeup for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(11): 5530-5541
- [2] Liang Y, Cao J, Zhang L, et al. A biologically inspired sensor wakeup control method for wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2010, 40(5): 525-538
- [3] Tan H, Chan M. A2-MAC: An adaptive, anycast MAC protocol for wireless sensor networks[A]//Proc of 2010 IEEE Wireless Communications and Networking Conference[C], 2010
- [4] Hou Y, Yi S, Sherali H D. Optimal base station selection for anycast routing in wireless sensor networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2006, 55(3): 813-821

该水印用来标识作品版权信息,防止对数字产品的非法拷贝和篡改;并且可鉴别数字作品的所有者。嵌入水印可以采用不同的水印保护方案,同时也要考虑不同类型的多媒体数字作品需要不同的水印嵌入算法。

第二次水印信息是根据内容发行商 CP 身份标识 ID 进行计算而来。该水印信息可用于标识 CP 的合法身份。

第三次水印信息与第二次类似,是根据购买者 B 身份标识 ID 进行计算而来。该水印可用来追查非法为盗版提供数字内容的购买者。

第四次水印为随机生成的完整性标识水印。该水印用来保护数字作品的完整性,防止非法篡改。

前三次水印选用鲁棒性水印,可以抵抗各种水印算法的攻击;根据不同的应用目的,采用了两类鲁棒性水印,前两次水印用于内容拥有者的身份标识,第三次水印则是作为用户指纹;第四次水印选用脆弱水印算法,可以抵抗各种“伪鉴别”攻击。

4. 实用性

基于数字水印技术的数字版权管理系统极大程度上依赖于数字水印的特性。模型中既包含鲁棒性水印,也需要脆弱水印。框架比较全面地考虑并解决了数字作品版权管理存在的问题,适合于各种网络环境,它选取合适的水印算法,还可用于各类多媒体数字产品的版权保护,所以可以应用于实际的 DRM 工程实现。

结束语 多媒体数据在网络上的发布、传播过程中,容易受到剽窃、盗用,严重地侵犯了数字产品所有者或者数字媒体出版商的利益。针对这样的问题,出现了数字版权管理技术和方案。但是,传统的基于密码学的 DRM 系统及新兴的基于数字水印技术的 DRM 系统都存在缺陷。

研究分析一般的数字作品版权保护系统后,本文提出了基于加密和数字水印两种技术的多媒体版权保护模型,它包含版权注册、版权转让、在线交易、验证和仲裁等功能模块,能满足各个实体的需求,可以抵抗各种水印和密码攻击,具有较好的实用性和安全性。

在该模型中,带有版权的数字作品先后共加载 4 次水印,其中包括鲁棒性水印和脆弱性水印。将数字水印用作版权保护手段,利用数字水印技术的一些特性,不仅能保护版权不受侵犯,还能追踪侵权者,发现盗版者。客户端对多媒体信息加密时采用全文件加密方式;解密时为保证音视频流畅播放,采用双缓冲区机制;同时为防止授权用户获得数字内容明文,缓冲区采用安全存储机制。

本文提出的多媒体数字水印版权保护模型,为解决版权管理系统中的一些问题提供了一种可行的方案,在公平性、安全性、实用性等方面具有一定的优势。为使该系统更加完善,

今后还可从以下方面进行进一步的深入研究:数字水印算法;DRM 中关键技术与其他领域先进技术的结合。

参考文献

- [1] Stamp M. Digital Rights Management: The Technology behind the Hype[J]. Journal of Electronic Commerce Research, 2003, 4(3): 102-112
- [2] Jobs S. Thoughts on Music[Z]. February 2007
- [3] Microsoft Windows Media—Digital Rights Management(DRM) [OL]. <http://www.microsoft.com/windows/windowsmedia/forpros/drm/default.aspx>
- [4] Irwin J. Digital Rights Management: The Open Mobile Alliance DRM Specifications[J]. Information Security Technical Report, 2004, 9(4): 22-31
- [5] 宋永豪,谷大武. 数字版权管理技术的安全性综述[J]. 信息安全与通信保密, 2007(9): 140-142
- [6] Jiang Xue-hua. Digital Watermarking and Its Application in Image Copyright Protection[C]//2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Volume 02, 2010: 114-117
- [7] 钮心忻. 信息隐藏与数字水印 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004
- [8] 申丽珍. 多媒体信息版权保护新技术——数字水印[J]. 计算机仿真, 2005, 22(8): 73-76
- [9] 张向华,韦鹏程. 基于信息论的数字水印研究[J]. 计算机科学, 2009(3): 248-249
- [10] 吕建勋,贾世杰. 基于图像的数字水印技术[J]. 计算机技术与发展, 2009, 19(2)
- [11] Zhang Hong-bin, Yang Cheng, Quan Xiao-mei. Image Authentication Based on Digital Signature and Semi-Fragile Watermarking [J]. Comput. Sci. & Technol., 2004, 19(6): 752-759
- [12] 俞银燕,汤帆. 数字版权保护技术研究综述[J]. 计算机学报, 2005, 28(12)
- [13] 范科峰. 数字版权管理技术及应用研究进展[J]. 电子学报, 2007, 35(6)
- [14] 桑军,廖晓峰. 数字图像水印与版权保护——概念与方法[J]. 计算机科学, 2005, 32(1)
- [15] 汪保友,王俊杰,胡运发. 数字水印与版权保护[J]. 计算机应用与软件, 2004(1)
- [16] 胡军全,王继武,张龙军,等. 结合数字签名和数字水印的多媒体认证系统[J]. 软件学报, 2003, 14(6): 1157-1163
- [17] 何佳鸣,张鸿宾. 基于数字水印和传统加密技术的数字版权管理系统框架的研究[J]. 计算机科学, 2008, 35(4A): 254-256
- [18] 陈晓苏,胡蕾,肖道举. 一个基于 PKI 和数字水印的数字版权保护框架模型[J]. 计算机工程与科学, 2005(6): 12-14
- [5] Wang X, Wu K, Wang J, et al. CAPF: Coded anycast packet forwarding for wireless mesh networks[J]. Wireless Networks, 2011, 17(5): 1273-1285
- [6] Kim J, Lin X, Shroff N B, et al. Minimizing delay and maximizing lifetime for wireless sensor networks with anycast[J]. IEEE/ACM Transactions on Networking, 2010, 18(2): 515-528
- [7] Ashraf F, Vaidya N H, Kravets R H. Any-MAC: Extending any asynchronous MAC with anycast to improve delay in WSN[A]// Proc of 8th Annual IEEE Communications Society Conference on SECON[C]. 2011: 19-27
- [8] Chen J C, Chan S H, Li V. Multipath routing for video delivery over bandwidth-limited networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2004, 22(10): 1920-1932
- [9] Xuan D, Jia W, Tu W Q, et al. Distributed Admission Control for Anycast Flows[J]. Transactions on Parallel and Distributed Systems, 2004, 15(8): 673-686

(上接第 87 页)