

EasiARS: 多模通信传感网的动态 WiFi 链路接入及自适应组网方法

彭康^{1,2} 赵泽¹ 陈海明¹ 李栋¹ 石海龙¹ 崔莉¹

¹(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

²(中国科学院大学 北京 100049)

(pengkang@ict.ac.cn)

EasiARS: Dynamic WiFi Link Access and Adaptive Networking Based on Multi-Mode Communication in Wireless Sensor Networks

Peng Kang^{1,2}, Zhao Ze¹, Chen Haiming¹, Li Dong¹, Shi Hailong¹, and Cui Li¹

¹(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

²(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract In some wireless sensor networks (WSNs) applications, gateway nodes use WiFi to access upper layer network. However, due to the instability of wireless link quality, it has a lot of work to find a stable and reliable gateway disposition by using fixed gateways in traditional WSNs structure. In this paper, we propose a novel method for dynamic WiFi link access and adaptive networking called EasiARS, which is applicable to the scenarios where WiFi link quality is instable and all devices including gateways and nodes are energy constrained. EasiARS is based on WiFi and ZigBee multi-mode communication. It contains a low-overhead real-time WiFi coverage detection method, a roles switching method and a clustering and networking method in WiFi coverage area. EasiARS makes it feasible to rapidly deploy WSNs systems in dynamic WiFi link environment. While system is working, nodes adjust their roles and transmission strategy according to the WiFi link quality, which ensures WSNs upload data stably and balance the energy consumption in WiFi coverage area. Experiments verify that, EasiARS achieves the purpose that nodes can switch to suitable roles and transmit stably in dynamic WiFi link environment. Compared with single fixed gateway method, EasiARS leads to a reduction up to 90% in packet loss rate under different WiFi link quality, and an improvement of 67% in network lifetime compared with fixed multi-gateway method, meanwhile reduces the burden of WiFi link quality testing and evaluation before deployment.

Key words wireless sensor networks (WSNs); multi-mode communication; WiFi detection; adaptive networking; energy balance; roles switching

摘要 在使用 WiFi 接入上层服务的无线传感器网络应用中,由于 WiFi 链路的不稳定性,使用固定位置的网关难以适应长期稳定可靠接入的要求.提出一种基于 ZigBee 和 WiFi 双模通信节点的,适用于不稳定 WiFi 链路下的网络设备自适应接入及组网方法 EasiARS (adaptive roles switching),该方法包括实时低开销的 WiFi 覆盖环境探测和更新方法、节点自适应角色分配方法、网关和节点均为能量受限设备情况下的 WiFi 覆盖区内分簇和数据传输方法. EasiARS 可以在外部 WiFi 网络环境动态变化的情况

收稿日期:2014-07-23;修回日期:2014-12-31

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项基金项目(XDA06010403);国家国际科技合作专项基金项目(2013DFA10690);国家自然科学基金项目(61202412,61100180)

通信作者:崔莉(lcui@ict.ac.cn)

下进行传感网设备的快速部署,并根据 WiFi 链路的状态自适应地调整节点角色和传输策略,使数据稳定传输并均衡 WiFi 覆盖区内节点的能量消耗.实验验证表明,在 WiFi 链路状态变化下,使用 EasiARS 的传感网能够自适应地切换节点的工作角色,形成合适的网络拓扑结构,保证数据的稳定上传,与采用单个固定位置网关的方法比较,随着 WiFi 链路不同程度的变化,EasiARS 的网络丢包率最多可降低 90%;与采用多个备选网关的方法比较,使用 EasiARS 的网络生存期提高了 67%,并减少了部署前期对 WiFi 链路质量测试和评估的工作负担.

关键词 无线传感器网络;多模通信;WiFi 探测;自适应组网;能量均衡;角色切换

中图法分类号 TP393

随着无线通信尤其是 WiFi 的迅速发展,WiFi 网络凭借其接入快速方便的特点被广泛运用.很多物联网系统也通过网关接入 WiFi 的方式实现感知网络的接入^[1].但 WiFi 无线链路的质量容易受到障碍物、信道环境等影响,而且提供 WiFi 接入的设备(access point,AP)也可能出现不能正常工作的情况,如因施工移动了 WiFi 接入设备的位置或因供电原因暂时关闭等.这种 WiFi 覆盖区域的不确定性和无线链路的不稳定性导致了网关设备不能长期稳定地接入,感知网的数据也无法稳定上传.在对实时数据要求严格的应用中,也不能通过缓存策略满足应用需求.另外,在网关和节点设备能量均受限的应用中,由于网关接入不稳定且承担较大的通信量,导致其能量迅速耗尽,无法保证感知网络的生存期.

目前传感网应用中多使用固定的网关接入外部 WiFi 网络^[2],这种方式在 WiFi 网络稳定的情况下可稳定工作;但外部网络不稳定时,很难保证通过一次性部署达到长期稳定接入和传输的目标.为达到稳定数据上传的目的,网关的部署位置需要随着 WiFi 覆盖区域及链路质量的变化而改变.因影响 WiFi 链路质量的外部因素很多,难以通过人力检测的方法随时探测 WiFi 质量来随时更换网关和节点的部署位置.针对网关不能长期接入电源的应用场景,网关作为能耗最高的设备很大程度上决定了网络生存期,文献[3-4]中采用太阳能或其他方式的间接供能方式,此类方法都有适用的特定场景,如应用在光线较暗的室内或较封闭的环境则由于不能使用太阳能而不适合使用.

针对以上问题,本文在节点支持 ZigBee 和 WiFi 双模通信的架构基础上,提出用于 WiFi 链路不稳定且设备能源受限的应用环境中的节点角色自适应及数据传输方法 EasiARS(adaptive roles switching).该方法实现了一种实时性低开销的 WiFi 链路状态探测和更新方法,在网络第 1 轮工作周期随机抽取

均匀分布的节点进行 WiFi 强度的扫描,其他节点利用网内 ZigBee 通信结合 WiFi 和 ZigBee 的衰减特性进行本地 WiFi 强度的最低阈值更新,在后续的工作周期中,参与簇头竞争的节点通过对比本地最低阈值和历史状态来分析 WiFi 链路状态的变化,并决定是否进行全网 WiFi 链路状态的更新.在获得外部网络链路状态的信息之后,节点根据网络状态调整工作角色,形成合适的网络拓扑结构稳定地接入到 WiFi 网络当中.为了提高网络的生存期,本文还提出用于网关和节点设备能量均受限的 WiFi 覆盖区内节点分簇和数据传输方法.通过实验验证,EasiARS 能够对传感网进行快速的部署,并在传感网运行期间根据 WiFi 链路质量分布情况形成合适的网络拓扑结构,稳定数据传输,均衡设备能量负载.

本文的贡献主要有 3 点:

- 1) 提出用于能量受限传感网设备的 WiFi 覆盖区域探测和更新方法,具有实时性低开销的特点;
- 2) 区别于固定网关和节点角色的传感器网络应用架构,本文提出了一种同质化的无线传感器网络体系结构,采用节点角色自适应方法,实现了传感网对外部 WiFi 网络环境的自适应接入;
- 3) 针对网关和节点都是能量受限设备的应用情景,提出一种 WiFi 覆盖区内节点分簇和数据传输方法,均衡了 WiFi 覆盖区的节点能耗,提高了传感器网络的生存期.

1 相关工作

就目前查阅的相关工作,我们还未发现类似本文采用节点动态切换工作角色的方法实现 WiFi 网络稳定接入和数据传输的方法.在相关领域,我们借鉴一些问题的解决方法,作为本文的相关工作进行对比研究.

1.1 多网关多路径路由的方法

在 Mesh 网络应用中,文献[5]从 multi-gateway, multi-path 的角度对网络的服务质量进行保证. 在本文的应用场景中可以通过在多个可能具有 WiFi 较好链路的位置部署多个备用网关,根据网络情况选择合适的网关进行上传. 文献[5]在一定规模的应用中可以达到较好的 WiFi 接入效果,但对于较大规模的传感网应用或者较为复杂的部署环境,要找到合适位置、合适数量的网关部署方法,需要大量的部署前期准备和测试工作,而且随着备选网关数量的增多及网络协议复杂度的提高,网络通信量的增加会带来更多能量的消耗. 当网关无法接入电源的时候,由于网关能量的快速耗尽,无法保证长期稳定的网关接入质量. 另外,在长期应用中因人为因素和自然因素等,很难估计 WiFi 链路状态的变化情况,一旦 WiFi 环境出现较大变化,如因供电原因需要关闭某个位置的 AP,或 AP 移动了位置,或部署区域内障碍物增加,则不能保证最初部署网关的可靠性,使用该方法不能做到强壮的网络自适应.

1.2 ZigBee 与 WiFi 协同工作

在移动网络应用中,有一部分论文提出使用 ZigBee 探测 WiFi AP 的方法,如文献[6]中提出的 ZiFi,利用 WiFi 和 ZigBee 工作在相同频段的特性,提出 CMF (common multiple folding) 算法对 ZigBee 采样的 RSS(received signal strength)序列进行匹配分析,获取周围是否存在 WiFi AP 的信息. 该方法利用低功耗的 ZigBee 采样代替频繁的高功耗的 WiFi 扫描,降低了手机在移动应用中的能量耗损. Ansari, Ang, Mähönen^[7]在 WiSpot 中提出使用 ZigBee radio 阵列进行相邻信道的同时扫描,该方法通过硬件改进和多信道同步感知算法使利用 ZigBee 探测 WiFi AP 有了更快的速度和更高的准确率. Li, Zhu, He^[8]在 WiBee 中提出使用传感器网络对目的 WiFi AP 的位置作出探测,该方法使用网格形式部署的传感器网络用 ZigBee 采样 RSS 序列,然后将这些采样序列发送回手机端或者笔记本,由 PC 端进行 RSS 序列组的分析得出传感网所在区域内 WiFi 的强度分布,继而判断 WiFi AP 所处的位置. 以上方法都通过相应的硬件改进和算法设计利用 ZigBee 采样分析获取了 WiFi AP 的信息,这些方法对于降低手机或者笔记本等移动设备频繁扫描 AP 信息的功耗起到了一定的作用. 但上述方法都将 RSS 采样序列的存储和计算放在手机或笔记本上,前端的模块仅负责数据采集,这种使用集中式

计算的模型需要后端处理系统具有较强的计算能力和存储能力,而且随着前端网络的扩大,数据的传输开销和后端的存储、计算开销都会急剧增加. 传感网节点计算和存储能力都极为有限,不适合采用集中式的处理方式. 另外上述文献中的方法在信道干扰较为严重或同时存在 WiFi AP 较多的情况下,正确率和分辨率都很难达到稳定应用的要求. 因此上述方法并不适用于无线传感器网络.

在另一部分的相关研究中,结合 ZigBee 通信有较低功耗和 WiFi 通信具有较高带宽的特点, Jin, Noubir 和 Sheng 在文献[9]中提出了 WiZi-Cloud, 在手机端和 WiFi 路由器上添加 ZigBee 的通信单元,使用 ZigBee 作为轻量级的连接方式,同时根据不同的流量需求选用不同通信单元,达到降低能耗的目的. Pering, Agarwal, Gupta 等人^[10]在 coolspots 中也采用类似的思想切换 WiFi 和蓝牙. 上述方法有效地利用了多模通信的优势,但这些研究仅考虑了“终端-接入点”一对一的连接模式,如要应用在较大的网络范围内还有很多工作需要补充,而且这些方法都改变或增加了基础设施的软硬件结构(如 WiZi-Cloud 中的路由器、coolspots 中的 coolspots 基站),这在大规模的应用展开中是不推荐的.

1.3 分簇路由的方法

在分簇路由方面已有很多的研究,在大规模的传感网应用中,分簇传输的方法能够有效地降低通信能耗,如 LEACH^[11]. 为了解决分簇路由中的热点(hot spots)问题, HEED^[12], UCR^[13], EC^[14], EECS^[15]等在分簇路由方法的基础上针对节点、能量均衡问题做了改进,其性能的对比可以参考文献[16]. 但这些研究工作提出的网络模型中,网关都具有无限的能源供给且能够稳定有效地提供服务. 本文讨论的应用场景中网关为能量受限设备,且由于网关接入网络的不稳定性,网关的位置和提供的服务质量都是不确定的,因此上述方法都不完全适用.

2 EasiARS 方法概述

EasiARS 方法的核心思想是采用同质化的感知网络体系结构以尽可能小的能量代价获取外部网络环境信息,并及时调整网络拓扑结构以适应环境. 本文方法在传感网分簇方法的基础上提出,但 EasiARS 并不限于使用在分簇网络中.

2.1 应用场景与网络模型

EasiARS 用于整个传感网(包括网关和传感器

节点)部署于能量无法供给的区域,并且提供网络接入的 WiFi AP 设备不能保证长期稳定工作,同时 WiFi 链路质量也受环境影响处于不稳定状态. 在任一时时刻保证至少有 1 个 WiFi 接入点正常工作(如果所有 AP 都不工作,也可以执行缓存策略,但会影响数据的实时性),实现传感网一次性部署长期稳定有效的目的.

针对上述应用情景,提出下面网络参数及模型:

- 1) 网络中的节点以密度 ρ 均匀分布;
- 2) 所有节点的能量都是受限的,无一例外,每个节点的初始能量设置为 E_{init} ;
- 3) 每个节点都有唯一的标志符 ID ;
- 4) 每个节点的通信功率可控,最大可通信半径为 R_{max} ;
- 5) 节点都以固定的周期 T 采集环境数据,然后组成包长为 l 的数据包发送.

节点的 ZigBee 通信能耗模型采用文献[3, 11-12]中的常用模型,另外补充 WiFi 的通信能耗模型:

$$E_{tx}^{ZigBee}(l, d) = lE_{elec}^{ZigBee} + l\epsilon_d a = \begin{cases} lE_{elec}^{ZigBee} + l\epsilon_{fs}d^2, & d < d_0, \\ lE_{elec}^{ZigBee} + l\epsilon_{mp}d^4, & d \geq d_0, \end{cases} \quad (1)$$

$$E_{rx}^{ZigBee}(l) = lE_{elec}^{ZigBee}. \quad (2)$$

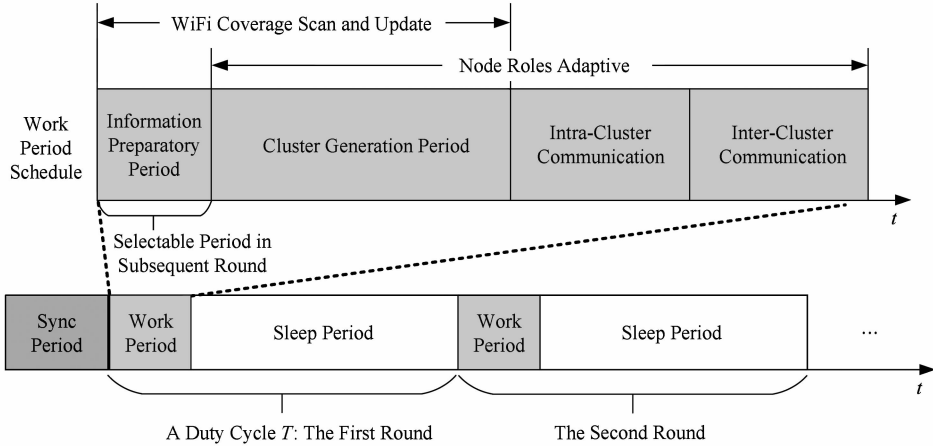


Fig. 1 System workflow and work period schedule.

图 1 系统工作流程和工作周期时间表

同步之后,节点进入周期性的工作状态,每轮采集周期分为工作周期和休眠周期,工作周期可分为信息准备阶段、簇的生成阶段、簇内通信阶段和簇间通信阶段.

在第 1 轮工作周期的信息准备阶段,随机选取一定比率的节点作为参与竞争簇头的节点,并利用这些节点完成 WiFi 链路质量的探测,在后续的工作周期中其他的节点利用这些历史信息完成 WiFi 覆盖区域的验证和更新. 在簇的生成阶段,参与竞争

WiFi 发送数据能耗包括传输数据报文的能耗、建立 TCP 连接的通信能耗和与 AP 建立连接的通信能耗:

$$E_{tx}^{WiFi}(l) = lE_{elec}^{WiFi} + E_{tcp} + E_{as}, \quad (3)$$

其中, d 为发送节点和接收节点之间的距离.

2.2 EasiARS 工作机制

本节描述 EasiARS 在分簇传感网应用中的工作机制.

定义 1. 传感器网络中某一个簇的簇头为备选网关时,该簇为网关簇.

定义 2. 传感器网络中某一个簇的簇头为普通节点时,该簇为非网关簇.

系统的整个工作流程如图 1 所示. 节点上电之后,加入网络与系统中已经工作的节点进行同步. 本文提出了一种面向实际应用的轻量级系统状态同步方法,该方法直接同步节点的状态,即新加入的节点会在获得网络运行状态之后将自身的运行状态配置成网络的运行状态,将自己的工作阶段跳跃至网络的同步状态,实现节点在任何时间加入网络进入同步工作且不影响网络中正在运行着的大部分节点的正常时序. 在 4.2 节中,我们会详细论述这种方法.

的节点会根据所处网络环境相互竞争并形成网关簇和非网关簇,在形成簇的过程中完成簇内剩余节点的 WiFi 强度最低阈值的更新. 这种探测和更新方法将在 3.2 节中详细描述. 该方法通过少量必要的节点进行探测验证,仅在网络覆盖环境产生变动时才启动大范围的备选节点更新扫描,有效地降低了扫描 WiFi 带来的功耗,同时保证了在外部网络变动情况下的及时更新.

在簇的生成阶段,参与竞争的节点根据本地

WiFi RSSI(received signal strength indication)确定竞争半径,根据簇头节点类型,传感网内的节点被划分在网关簇或非网关簇内;在簇间通信阶段,数据由非网关簇向网关簇汇聚,在网关生成和路由更新的过程中,网关簇的簇头根据位置相邻关系和能量差值划分成网关节点和非网关节点.网关节点的角色确定是受网关簇内的剩余能量影响的.考虑到网关角色的确定与网关能量均衡的不可分割性,本文将两者结合在3.3节详细描述.该方法使传感网根据外部网络环境状态和内部能量状态形成合适的网络拓扑结构,完成数据的稳定传输并均衡节点能耗.

3 EasiARS 设计与实现

3.1 多模节点架构设计

传统的传感网部署应用模式是数据由传感器节点发送到网关,再由网关上传到上层网络,整个网络形成了一个以网关为数据汇聚点的网状或星型结构.考虑到无线链路的不稳定性和环境的限制性,一旦网关无法有效地接入上层网络,会导致整个网络的数据都无法上传.

为降低这种结构的传感器网络对环境的紧耦合性,本文设计了一种支持 WiFi 和 ZigBee 的双模通

信节点,消除硬件上的功能划分,架构如图 2 所示.该节点在传统节点的基础上增加了 WiFi 的通信单元.因 WiFi 通信需要 TCP/IP 协议栈支持,其运行消耗的内存资源和能量都比 ZigBee 通信高.节点在网络中大部分情况是以 ZigBee 作为主要通信模式, WiFi 通信单元仅在探测 AP 和接入 AP 上传数据时才需要启动.考虑到降低主控 CPU 运行程序的复杂度和内存消耗,将 WiFi 通信的控制部分和 TCP/IP 协议栈部分交由协处理器执行,而包含 ZigBee 通信控制代码的程序由主控处理器执行.为了降低节点的基础能耗,由主处理器控制协处理器及其相关模块的电源供给,在不需要 WiFi 通信单元的功能时,主处理器控制电源管理芯片(本文采用 TPS2061)工作在 StandBy 模式下,协处理器和 WiFi 通信单元不再有电源供给,这种状态下节点额外消耗的电流仅有 TPS2061 的 Leakage current 为 0.5~1μA.当需要使用 WiFi 通信单元的功能时,主处理器控制其上电,发送给协处理器需要执行的任务或需要上传的数据,协处理器依照命令执行相应操作,并返回状态.这种可动态加载和卸载的模块化设计,使节点既可以实现多模通信功能的集成,又不增加额外的冗余功耗.

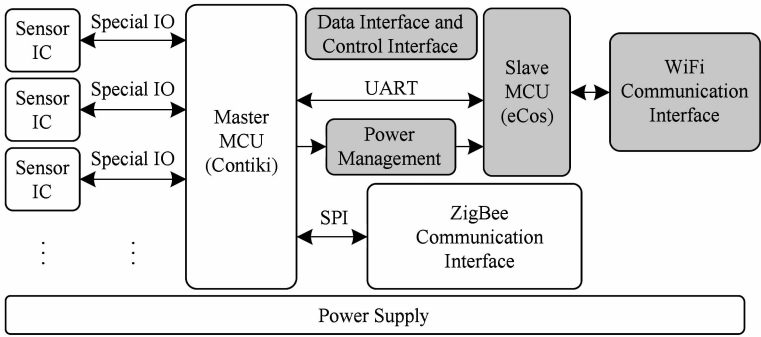


Fig. 2 Muti-mode node architecture.
图 2 多模节点体系架构

3.2 WiFi 覆盖区域扫描和更新方法

WiFi 的信号强度具有区域性分布特征,每个区域的抽样扫描强度可代表该节点所在区域一定范围内的 WiFi 覆盖情况.在 WiFi 链路稳定的情况下,频繁重复地扫描 AP 信息会产生不必要的能量消耗.本文提出了抽样扫描、动态验证和实时更新的方法,在保证及时获取 WiFi 链路质量变化的前提下,减少执行扫描 WiFi 信息的节点数量,降低用于 WiFi 扫描和网内信息共享的能量开销.

在图 1 所示第 1 轮工作周期的信息准备阶段,

选出的节点用来扫描该区域的 WiFi 强度,同时作为参与第 2 阶段竞争簇头的备选节点.与 LEACH^[11]等方法的备选簇头生成方式类似,节点参与扫描的概率与目前工作的轮数 N_{round} 和初始设定的簇头比率 P 有关,节点 i 成为簇头的对比参数为^[11]

$$T = \frac{p}{1 - p \left(N_{round} \bmod \frac{1}{p} \right)} \times \delta. \tag{4}$$

当 $N_{round} = 1/p$ 的时候, δ 会重新置 1.当节点本轮的随机数值小于 T 时,节点成为备选节点,参与

第 1 轮信息准备阶段的 WiFi 扫描, 并参与下一阶段的簇头竞争, 当节点竞争成功, $\delta=0$. 随机值大于 T 的节点继续休眠, 直到第 2 阶段的竞争结束, 并将自身描述中的 T 更新. T 的更新和 P 值对网络的影响在文献[11,13]等文章中已有分析, 本文不作细致讨论, 而是直接引用文献中的结论.

每个节点在运行期间维护自身的属性描述, 属性包括可选择的 WiFi SSID(service set identifier) 匹配表、本地 WiFi RSSI、节点当前能量 $E_{\text{remain}}^{\text{local}}$ 、自身运行状态 $tick$ 、当前系统 N_{round} 信息等. 当节点刚上电, 即 $N_{\text{round}}=0$ 时, 其 WiFi RSSI 的描述为 INT_MIN; 当节点成为备选节点时, 在信息准备阶段扫描 WiFi AP 状态, 将获得的 AP 信息与 SSID 匹配表进行匹配, 并将匹配信息更新到节点描述中.

在后续的工作周期中, 备选节点不再像第 1 轮一样全部开启 WiFi 通信单元进行扫描, 而是将上一轮同一簇内的簇头发送过来的 WiFi 描述信息作为自己本轮是否进行扫描的参考. 没有成为备选节点的节点在簇的生成阶段根据簇头在簇内的广播信息更新自己的 WiFi RSSI 最低阈值. 因 WiFi 和 ZigBee 均工作在 2.4 GHz, 其频谱特性相似, 而空间自由传输模型的 RSSI 衰减估算如下:

$$L = 32.44 + 10k \lg S_{\text{dis}} + 10k \lg F, \quad (5)$$

其中, S_{dis} 为距离, 单位为 km; F 为频率, 单位为 MHz; k 为衰减因子. 实际应用环境中, 由于环境影响理论衰减值和实际值会有一定差距, 但是从估算公式可以看出, 当 2 种信号具有相同的频率和距离时, 在相同的环境中两者的衰减程度是一致的. 该关系如式(6)所示:

$$L_{\text{WiFi}} \propto L_{\text{ZigBee}}. \quad (6)$$

我们可以利用源节点到目的节点 ZigBee 信号的衰减来估算本地 WiFi RSSI 的最低阈值. 在簇的生成阶段, 簇头会将自身扫描到的 WiFi 强度和 ZigBee 发送功率发送给本簇内的其他节点, 簇内其他节点接收到该信息之后, 将信息包中源节点位置的 WiFi 强度和源节点 ZigBee 射频发送功率提取出来; 同时读取射频芯片中寄存器 RSSI 的 RSSI_VAL 值作为接收该信息包的 ZigBee 接收强度.

如图 3 所示, 在 WiFi 覆盖区内形成了一个以 G1 作为簇头的网关簇, 在 WiFi 覆盖区外形成了以 G7 为簇头的非网关簇, G2 和 G8 分别是 G1, G7 簇内的一个普通节点. 假设 G2 在 G1 与 AP 连线的反向延长线上, 设这个点为 Virtual G2, 根据 G1 点扫描到的 WiFi 强度和 G1 到 Virtual G2 点的 ZigBee 衰减, 可以估算出 Virtual G2 点的 WiFi 接收强度,

该强度可以作为 G2 本地 WiFi 接收强度的最低阈值. 在估算过程中, 为更准确地估算 ZigBee 的信号衰减, 在获取源节点的 ZigBee 发射功率 $P_{\text{src}}^{\text{ZigBee}}$ 后, 还需考虑由于射频电路等因素造成的衰减, 把这部分因素带来固有的偏差设为 δ_{cir} , 可通过实验提前测试出该值大小, 本地 WiFi RSSI 的估算公式为

$$RSSI_{\text{loc}}^{\text{WiFi}} = RSSI_{\text{src}}^{\text{WiFi}} - k(P_{\text{src}}^{\text{ZigBee}} - \delta_{\text{cir}} - RSSI_{\text{loc}}^{\text{ZigBee}}). \quad (7)$$

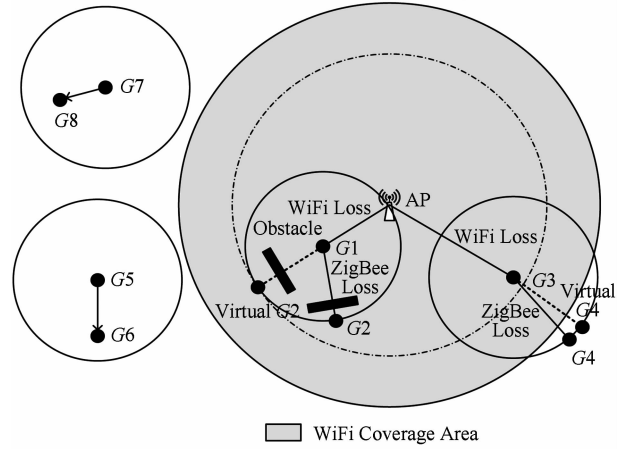


Fig. 3 Schematic of local WiFi RSSI estimation method.

图 3 本地 WiFi 强度估计方法示意图

本地 WiFi RSSI 的估计方法实现如算法 1 所示:

算法 1. 本地 WiFi RSSI 强度估计.

在簇内通信阶段

- ① WHILE 簇内通信阶段没有结束
- ② IF 收到簇头发出的广播包
- ③ 解析接收到的数据包, 获取源节点的 ZigBee 发送强度 $src_ZigBee_txpower$ 和源节点处的 WiFi 信号接收强度指示值 src_WiFi_RSSI ;
- ④ 从 RSSI 寄存器中读取本地 ZigBee 接收强度指示值 $local_ZigBee_RSSI$;
- ⑤ 使用式(7)估算本地的 WiFi 信号接收强度最低阈值;
- ⑥ IF 新估算出的本地 WiFi 信号接收强度高于节点自身描述中的本地 WiFi 信号接收强度(历史扫描值或估算的最低阈值)
- ⑦ 更新节点自身描述中的本地 WiFi 信号接收强度;
- ⑧ END IF
- ⑨ END IF
- ⑩ END WHILE

G2 节点如果从未扫描过 WiFi,就会将该最低阈值保存到你属性描述的本地 WiFi RSSI 中,作为后续轮的验证参考.而 G7 点因本身未扫描到可用 AP,会通知其簇内点将本地 WiFi RSSI 值设为 0.在后续轮的信息准备阶段,当 G8 作为簇头竞争节点醒来时,因其自身 WiFi RSSI 参考值为零,如果其没有收到来自其他节点的 WiFi 区域更新信息,就说明从上一轮到本轮工作期间内,WiFi 覆盖区域和链路状态没有发生明显变化,不至于影响到传感网的正常接入,因此不会执行 WiFi 扫描操作.

在后续轮的工作中,当节点作为备选网关时(如图 3 中的 G2),如果其属性中的本地 WiFi RSSI 高于预设的 TCP 传输所需强度阈值,就会扫描 WiFi 进行验证;如果实际获取的 WiFi RSSI 不低于本地描述,则验证通过,该节点将本地 WiFi RSSI 更新为实际扫描值.反之说明 WiFi AP 的位置出现了变动或者链路收到较大的干扰,此时需重新确定该区域内的 WiFi 覆盖情况,该节点在其通信范围内广播一条 WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG,其余参加竞争的节点(如 G8)收到后会转发本条消息并开启 WiFi 进行扫描,并更新本地的 WiFi RSSI 描述.为防止节点重复扫描,节点在一轮工作周期中仅在首次收到该信息时才会进行扫描和更新操作.本地的 WiFi 链路探测及覆盖信息更新方法如算法 2 所示:

算法 2. 本地 WiFi 链路质量探测及覆盖信息更新方法.

在信息准备阶段:

- ① 取(0,1)之间的随机数 *Prob*;
- ② IF *Prob*<对比参数 *T*
- ③ IF 节点描述中的本地 WiFi 信号接收强度 *local_WiFi_RSSI* 为初始值 *INT_MIN* 或高于设定的阈值
- ④ 启动 WiFi 扫描寻找匹配的 AP;
- ⑤ IF 新扫描到的 WiFi 信号接收强度 *new_WiFi_RSSI* 小于 *local_WiFi_RSSI*
- ⑥ 广播 *WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG*;
- ⑦ 设置 *WiFi_cover_changed_flag*=1;
- ⑧ END IF
- ⑨ 将 *local_WiFi_RSSI* 的值更新为 *new_WiFi_RSSI*;
- ⑩ END IF
- ⑪ ELSE

- ⑫ WHILE 信息准备阶段没有结束
- ⑬ IF 接收到 *WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG* 并且 *WiFi_cover_changed_flag*=0
- ⑭ 转发 *WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG*;
- ⑮ 设置 *WiFi_cover_changed_flag*=1;
- ⑯ 启动 WiFi 扫描寻找匹配的 AP,更新 *local_WiFi_RSSI*;
- ⑰ END IF
- ⑱ END WHILE
- ⑲ END IF
- ⑳ 设置 *WiFi_cover_changed_flag*=0,更新对比参数 *T*.

本文研究中所考虑的引起 WiFi 链路状态变化的因素有 2 种:1)由于 WiFi AP 自身情况引起的变化,如 WiFi 路由器的供电不稳定或位置移动;2)由于周围环境的干扰,如障碍物遮挡、信道环境等影响.这些变化在特定应用场景中会有一定的时间规律性,我们可以保存每个簇内的 WiFi 链路状态变化情况,根据历史数据找出其变化规律,这样可以采用更加主动的策略,进一步降低系统的能耗,这部分内容可作为本文未来的研究工作.

3.3 节点角色的确定与数据传输

在获取 WiFi 覆盖信息之后,每个节点需要根据自身所在的网络环境和周围节点的状态确定自己的角色,角色分类和功能如表 1 所示,本节将具体描述各个节点的角色是如何确定的.

Table 1 Classification of Node's Roles and Features

表 1 节点角色分类及相应功能描述

Role	Responsibility
Non-gateway Cluster Node	Sensor Data Collection, Data Transmission
Non-gateway Cluster Head	Sensor Data Collection, Intra-cluster Data Aggregation, Data Forwarding
Gateway Cluster Gateway Head	Sensor Data Collection, Intra-cluster and Inter-cluster Data Aggregation, Associate with WiFi AP and Upload Data
Gateway Cluster Head	Same as Non-gateway Cluster Head
Gateway Cluster Node	Same as Non-gateway Cluster Node

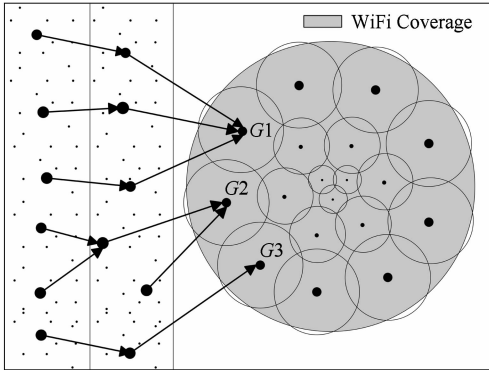
3.3.1 非网关簇内节点角色的确定

在没有 WiFi 覆盖的区域,由 2.2 节定义可知该区域生成的簇均为非网关簇.在非网关簇内,簇头

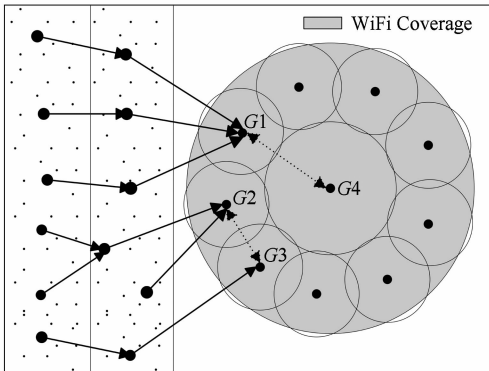
和普通节点仅启用 ZigBee 进行通信, 相当于传统传感网中的传感器节点. 非网关簇的生成方法在文献[11-15]中已有讨论. 在此不详述.

3.3.2 网关簇内节点角色的确定

因网关簇需要接收更多非网关簇的信息, 作为网关的节点还需开启 WiFi 进行数据上传, 网关簇的能量消耗要比非网关簇快很多. 使用仅考虑普通节点能耗的分簇方法如 UCR 会导致在 WiFi 覆盖区内生成过多的网关簇, 如图 4(a) 所示, 虽然中继消耗的能量减少, 但当 WiFi AP 的连续覆盖范围较大时, WiFi 覆盖区域的边缘网关簇由于既要接收外围非网关簇的数据, 又要频繁开启 WiFi 通信单元进行上传, 能量会迅速耗尽. 而靠近覆盖区域中心的网关簇接收不到外围的非网关簇数据, 仅需要上传簇内的数据, 外围网关簇相对中心网关簇能量消耗不均衡. 因网关覆盖区内的节点角色分配与数据传输紧密相关, 本节将结合 WiFi 覆盖区内网关簇的生成及相邻网关簇的数据传输论述网关簇内节点角色的确定.



(a) UCR cluster



(b) EasiARS cluster

Fig. 4 Gateway-cluster generation in UCR and EasiARS.

图 4 UCR 与 EasiARS 网关簇生成情况

网关簇中的备选簇头节点参与竞争的半径与其自身描述中的 WiFi RSSI 值有关, 该值越大, 其竞

争半径会越大. 竞争半径为

$$R_{\text{gate}} = \left(1 + C_{\text{gate}} \frac{RSSI_{\text{gate}}}{RSSI_{\text{max}}}\right) R_0. \quad (8)$$

$R_0 = C_{\text{normal}} R_{\text{max}}$ 是我们预先设定的一个通信半径, R_{max} 为节点通信可达的最远距离, 这里需要满足式(9), 因为任何节点的竞争半径都不可能超过最大通信半径.

$$1 + \frac{RSSI_{\text{gate}}}{RSSI_{\text{max}}} \times C_{\text{gate}} < \frac{1}{C_{\text{normal}}}. \quad (9)$$

C_{gate} 为预设的 WiFi 强度值影响因子, 其值越大, 节点所处位置的 WiFi 强度值对其竞争半径的影响就越大. 如图 4(b) 所示, 假设在 $G4$ 的位置有一个 WiFi AP, 形成了一个圆形的 WiFi 覆盖区域, WiFi 覆盖区域内生成若干网关簇, 由式(8)所示, 越靠近 WiFi AP 中心区域的网关密度就越小, 远离中心区域的网关密度就越大. 优势在于, 越靠近中心的节点, 其接收外部非网关簇的信息就越少, 生成较大的簇, 可使簇内的通信量增大. 处于边缘的网关需要接收更多非网关簇的信息, 其密度越大需要接收的非网关簇的扇形区域就越小, 减少了每个网关簇头的接收信息量. 通过均衡簇内和簇间通信量, 达到平衡 WiFi 覆盖区内的节点能量消耗.

另外, 在相邻的网关簇中, 如果每个网关簇的簇头都作为网关启动 WiFi 进行上传, 网关在上传有效数据之前都要与 AP 建立连接, 并与服务器建立 TCP 连接. 假设一个区域内有相邻的 n 个网关簇簇头, 每个簇头接收到外围非网关簇发送来的 m 个包长为 l 的需上传的数据包, 如果这些簇头均直接开启 WiFi 进行上传, 从接收到上传的整个过程中需要消耗能量为

$$\begin{aligned} E_{\text{total}} &= \sum_{i \in \text{gate_CH}} E_{\text{consumption}}^{gate_i} = \\ &= \sum_{i \in \text{gate_CH}} (E_{\text{rx}}^{\text{inner_cluster}} + E_{\text{rx}}^{\text{intra_cluster}} + E_{\text{tx}}^{\text{WiFi}}) = \\ &= \sum_{i \in \text{gate_CH}} ((\rho R_{\text{gate_i}}^2 l E_{\text{elec}}^{\text{ZigBee}} + m_i l E_{\text{elec}}^{\text{ZigBee}}) + \\ &\quad (\rho R_{\text{gate_i}}^2 + m_i) l E_{\text{elec}}^{\text{WiFi}} + E_{\text{tcp}} + E_{\text{as}}). \end{aligned} \quad (10)$$

这种传输方式需要消耗多次与 WiFi AP 建立连接和建立 TCP 连接的能量, 如果将相邻网关簇的信息汇聚到一个网关簇头上, 再开启 WiFi 进行上传, 可以充分利用 WiFi 较高的带宽, 并以一定 ZigBee 通信的代价节省该部分能量, 并可有效平衡相邻网关簇簇头的能量. 该方法最终确定了节点中网关簇网关簇头和网关簇非网关簇头的角色.

如图 5 所示, 网格阴影的区域表示当前剩余能量相对较低的网关簇. 以网关簇簇头 $G2$ 为例, 当 $G2$

点接收到外围非网关簇的 m 个信息之后,如果其存在相邻的网关簇(如图 5 中的 $G1, G3, G4$ 所在簇),需要决定是将 m 个信息通过 WiFi 单元上传还是通过 ZigBee 单元转发给相邻网关簇簇头. $G2$ 节点通过 WiFi 单元上传需消耗 $E_{tx}^{WiFi}(m)$ 的能量,转发给相邻网关簇簇头需要消耗 $E_{tx}^{ZigBee}(m)$ 的能量,相邻簇头增加 $E_{ZigBee}^{(m)} + E_{tx}^{WiFi}(m)$ 的能耗,当满足:

$$mE_{elec}^{WiFi} + E_{tcp} + E_{as} > mE_{elec}^{ZigBee} + m\epsilon_{fs}d^2, \quad (11)$$

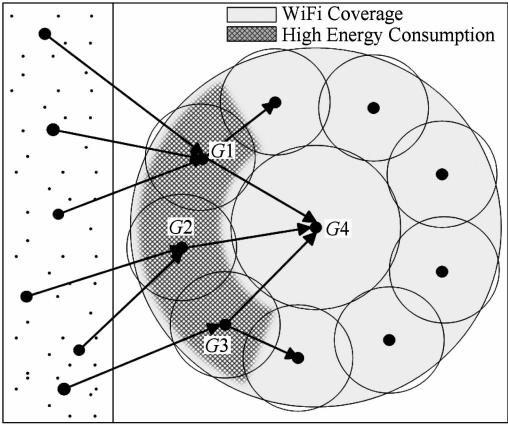


Fig. 5 Data transmission between adjacent uneven energy gateway-clusters.

图 5 能量不均匀的相邻网关簇间的数据传输

并且该节点的剩余能量与相邻簇头的剩余能量具有 $E_{neighbour}^{remain} - E_{remain}^{local} > E_{threshold}$ 关系时,就将这 m 个信息转发给相邻簇头. 如图 5 中 $G4$ 节点,由 $G4$ 节点开启 WiFi 上传数据,此时该节点的角色为网关簇非网关簇头,相邻簇头的角色为网关簇网关簇头.

3.4 EasiARS 性能分析

本节将讨论 EasiARS 在动态 WiFi 链路环境下的理论性能,从节点角色更新的实时适应性、WiFi 链路环境对节点扫描频率与通信量的影响 2 个方面进行分析.

EasiARS 为了实现低能耗下的实时适应,仅在 WiFi 链路变化对网络传输产生影响的情况下才进行部分区域的重新扫描,并根据扫描结果更新角色,即 WiFi 链路状态的变化仅在传感网进入工作周期时对本轮的角色分配产生影响. 因网络中至少有一个 AP 可用,所以无论该 AP 移动到部署区域的任何位置,总会在该 AP 附近形成网关簇并生成网关簇头,而非覆盖区的节点会形成非网关簇并在簇间通信阶段形成由非网关簇指向网关簇的数据路由.

基于 3.2 节对 WiFi 环境探测的策略描述,在不同链路环境下,节点执行 WiFi 扫描的频率、执行

扫描操作的节点数量、网内通信量均不同. 我们首先讨论 WiFi 覆盖环境极为稳定和极不稳定的 2 种边界情况.

在 WiFi 覆盖环境极为稳定的情况下,每轮被选作网关簇簇头的节点会根据自己保存的上一轮参考 WiFi RSSI 值进行验证扫描,在稳定环境下该扫描值将大于或等于上一轮的参考值,验证通过. 这种情况下每轮需要进行 WiFi 扫描的节点仅为本轮网关簇内的网关簇头. 假设整个传感网系统中 WiFi 覆盖率为 P_{cover} ,节点总数量为 N ,簇头生成比例为 T ,则需要进行 WiFi 扫描的节点数量为 $P_{cover} \times T \times N$. 这些节点都验证扫描通过之后,不会产生 WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG 信息,其他节点也不会进行 WiFi 信息更新,因此由 WiFi 探测更新引起的额外通信量为 0.

在 WiFi 覆盖极端不稳定的环境下,假设原来处于 WiFi 覆盖区的簇现在均没有可靠 WiFi 信号提供接入,当原网关簇中被选作簇头的节点进行扫描验证时扫描值将小于参考值,此时 WiFi 环境的变化足以使原来的网络拓扑结构不能再正常工作,此时节点广播 WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG 信息,仅有处于非网关簇的簇头节点在第一次收到该信息之后会进行转发并启动 WiFi 扫描. 这种情况下需要额外进行扫描的节点是能收到 COVERAGE_CHANGE 信息的非网关簇的簇头节点,在该极端情况下需进行 WiFi 扫描的节点数量为 $(1 - P_{cover}) \times T \times N$,加上原来需要验证扫描的网关簇内的簇头节点,则需扫描的节点总数为本轮实际簇头的总数 $P_{cover} \times T \times N + (1 - P_{cover}) \times T \times N = T \times N$. 而由于 WiFi 覆盖区域变化增加的通信量上限也为 $P_{cover} \times T \times N + (1 - P_{cover}) \times T \times N = T \times N$.

在非极端情况下,部分原 WiFi 覆盖区的链路变化导致该区域网关簇的网关簇头无法接入,则产生的 WIFI_COVERAGE_CHANGE_MSG 会影响与发布该信息的簇的连通区域,而被 WiFi 覆盖区分割开的区域不会进行更新,这样减少了不必要的通信量,加快了角色更新的速度. 此时开启 WiFi 进行扫描的节点数量区间为 $[P_{cover} \times T \times N, T \times N]$,由更新 WiFi 覆盖信息产生的总的通信量在 $[0, T \times N]$ 之间,对于需要进行扫描 WiFi 的每一个节点,通信量为 $O(1)$. 由于簇内普通节点的 WiFi RSSI 参考值是在簇内通信阶段进行更新的,计算该参考值所需的簇头 WiFi RSSI 和 ZigBee 发送强度完全可以在簇内通信的数据包中包含,不需要额外的通信量.

4 实验验证

为验证 EasiARS 方法, 本文设计了多模通信节点并进行实验验证. 实际场景模拟了 2.1 节提出的动态网络场景, 本节将介绍实验验证及性能分析.

4.1 多模通信节点软硬件系统实现

本文设计了多模通信节点 EZ253, 该节点采用 TI 的 CC2530^[17] 作为主控 MCU 和 ZigBee 射频单元, 采用 CC2591^[18] 作为前端放大器. 使用 Roving 的 RN131G^[19] 模块作为协控 MCU 和 WiFi 通信单元. RN131G 对于主 MCU 可视为一个串口设备, 主控 MCU 对协控 MCU 的控制可分为命令模式和数据模式. 协处理器和 WiFi 通信单元的电源由主控 MCU 通过电源管理芯片 TPS2061^[20] 进行控制. 整个系统采用 3.6V 电池供电, 节点的实物如图 6 所示.

EZ253 节点运行 contiki 系统, contiki 是一款开源的实时多任务嵌入式操作系统, 本文将该系统移植到 EZ253 节点上, 重写了 ZigBee 和 WiFi 的数据收发逻辑, 添加了 ZigBee-WiFi 通信模式切换控制模块、节点参数配置模块等, 并完善了电源管理模块.

如图 7 所示, 通过示波器可以观察一次 WiFi 通信(过程①②③)和一次 ZigBee 通信(过程④)的

能耗对比, 图 7 中纵轴为电压参考值. 一次完整的 WiFi 通信包括与 AP 的 association 过程、建立 TCP 连接的过程、WiFi 发送数据的过程. 而通过 ZigBee 通信过程仅包含一次 ZigBee 的通信. 从连接建立时间和通信次数上分析, 传输等量数据 ZigBee 消耗的能量更小. 因此在节点工作期间会优先选择使用 ZigBee 发送到网关, 而不是启动 WiFi 尝试直接上传. 而作为网关的节点, WiFi 通信作为其上传数据的必要途径, 其开销无法避免, 但 EasiARS 方法将 WiFi 通信能耗均摊到不同的节点上, 均衡了能量负载.



Fig. 6 EZ253 multi-mode communication node.
图 6 EZ253 多模通信节点

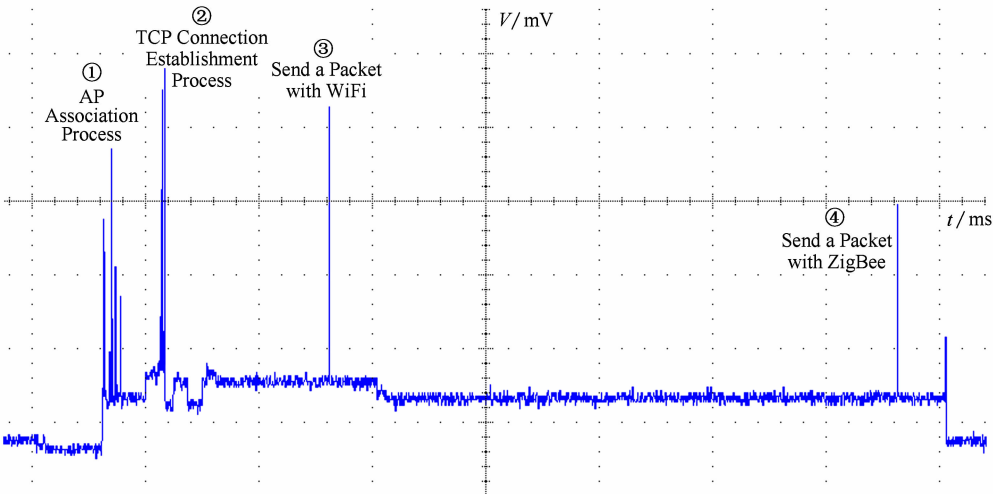


Fig. 7 Comparison of energy consumption between WiFi and ZigBee.
图 7 WiFi 通信和 ZigBee 通信的能耗对比

4.2 面向应用的轻量级节点同步方法

节点同步是系统运行的前提, 本文提出了一种面向实际应用的轻量级系统状态同步方法. 该方法通过同步 MCU 时钟产生的 tick 值直接对系统的状态进行调整, 分为精细调整和状态调整. 精细调整通过调整 tick 值, 使不同步的节点产生不相同时长的

单位时间, 从而达到同时到达某一时刻的目的, 节点在其发送的数据包内均含有自身的实时 tick 信息, 接收信息的节点用该 tick 值与自身 tick 进行比对和更新, 精细调整发生在整个系统的运行期间内, 用来解决节点内的晶振由于在长时间运行产生的漂移. 根据 MCU 及操作系统的时钟精度, 精细调整的

最小精度可达到 $2\mu\text{s}$. 状态调整用来配合应用层程序设计, 系统可根据 *tick* 值的状态直接跳回或越过多个阶段, 达到节点与网络运行状态的同步, 状态调整主要用在节点与网络有较大时差时, 如节点新加入网络、节点经历严重的故障重启之后等.

当网络中还没有节点进入工作周期时, 所有已运行的节点会以 *tick* 值回滚的方式同步到最新加入的节点状态, 以保证网络有一段稳定时期以等待

新节点的加入. 当网络中已有节点进入工作周期之后, 此时新加入的节点不会对已经进入工作周期的节点产生影响, 而是新节点以阶段跳跃的方式将自身状态跳至网络当前状态.

图 8 表示了网络中的 5 个节点在不同阶段的同步方法. 其中 *Node1*, *Node2*, *Node3* 采用的是时间回滚的方法; *Node4* 和 *Node5* 采用的是阶段跳跃的方法.

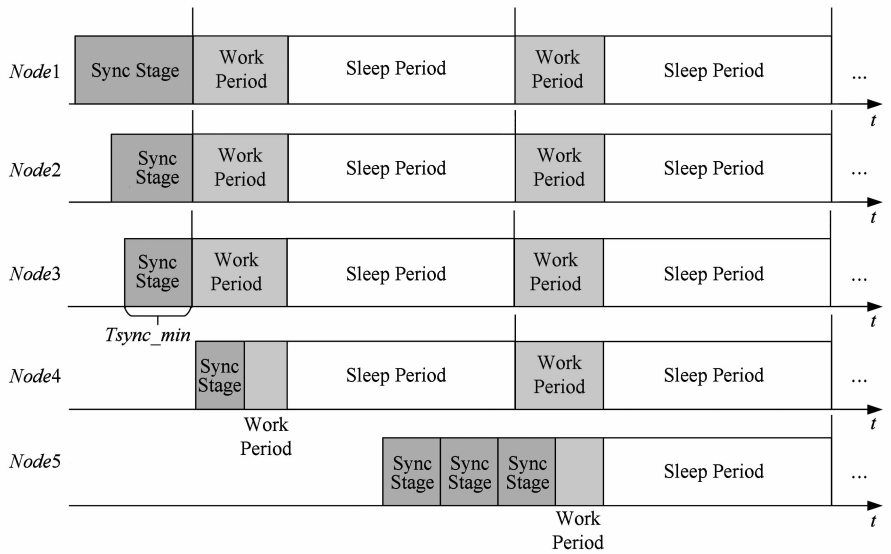


Fig. 8 System status syndronization method based on *tick* value.

图 8 基于 *tick* 的系统状态同步方法

4.3 实验设计与测试

如图 9 场景, 在 *P1* 的位置设置 WiFi 路由器作为可用 AP, 由于室内的环境复杂, 如各种遮挡物以及手机、其他 AP 的干扰等, 每个位置的 WiFi 信号质量差异明显. 我们在不同网格位置布置了 16 个节点, 这些节点采用 EasiARS 方法, 作为第 1 组节点.

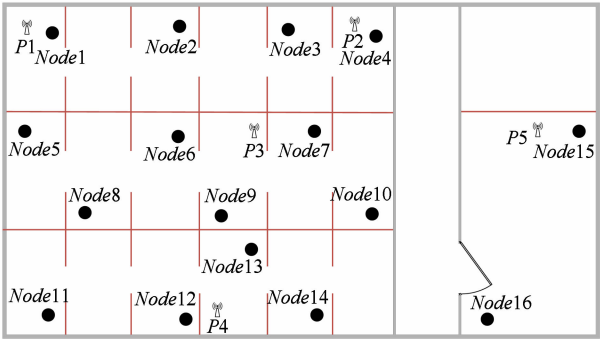


Fig. 9 Experiment deployment scenarios.

图 9 实验部署场景

作为对比, 我们仍使用这些节点作为第 2 组节点, 不同的是将 1 号节点作为网关节点, 放置在距离

路由器 *P1* 较近的位置. 其余节点屏蔽其 WiFi 单元仅作为普通的传感器节点, 这些节点采集数据之后传输给 1 号网关节点. 该组节点组成了一个标准的数据由传感器节点发送到固定网关, 再由该网关连接 WiFi 上传到 PC 端的传感网传输模型.

我们在 PC 端监听通过网关上传的数据包, 从而解析出每个节点的剩余能量以及当前哪些节点作为网关进行上传, 上述实验在单跳环境下进行.

4.3.1 WiFi 动态覆盖环境下的传输稳定性

在第 1 组测试中, 我们设置节点的工作周期为 1 min, 每 2 轮进行一次角色切换, 每隔 30 min 移动一次 WiFi 路由器的位置来改变 WiFi 的覆盖范围, 用来模拟由于外部环境影响带来的 WiFi 链路变化. 如图 9 所示, 图 9 中标注 *P1*~*P5* 为 WiFi 路由器依次放置的位置. 根据 PC 端接收到的数据进行分析, 以网络丢包率和节点的能量消耗作为网络性能的评价指标. 在移动 5 次 WiFi 路由器位置后得到如图 10 所示的网络丢包率对比, 表 2 统计了在 WiFi AP 移动到不同的位置时, 切换成网关进行上传的节点.

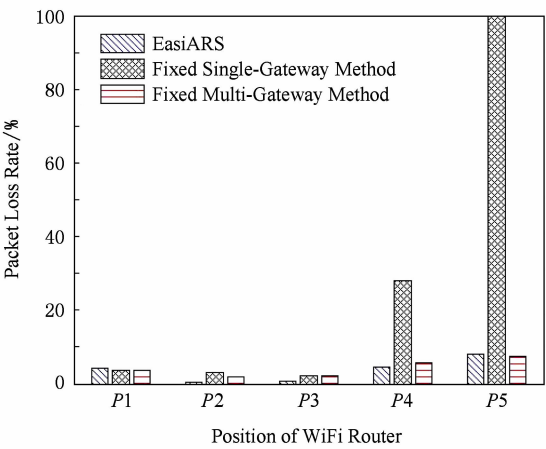


Fig. 10 Comparison of packet loss rate in two experiments.

图 10 2 组实验的丢包率对比情况

Table 2 Position of WiFi Router and Assigned Roles of Nodes

表 2 WiFi 路由器位置与节点角色分布

Position of WiFi Router	Nodes Act as Gateway(Different Time)
P1	Node1, Node2
P2	Node3, Node4
P3	Node6, Node7, Node9
P4	Node12, Node13
P5	Node15, Node16

从表 2 数据分析,第 1 组节点在 WiFi 覆盖范围变化的环境下,能够及时选择合适位置的节点切换成网关角色,使绝大部分的数据包都能够稳定地上传到 PC 端,保证了 WiFi 链路不稳定情况下的数据稳定传输,因实验采用 ZigBee 单跳方式进行传输,所以当 1 号、15 号或 16 号节点作为网关时,会出现较远的节点 ZigBee 单跳传输偶尔有丢包的现象,如果采用多跳路由的方式会有更好的传输效果.而第 2 组实验中的节点,当 WiFi 路由器放置在位置 P1, P2 和 P3 时,放置 1 号网关的位置可以获得较好的 WiFi 信号,数据能够稳定上传,网络丢包率与第 1 组相近;但当 WiFi 路由器移动到 P4 的位置时,因原来放置网关的位置接收不到较好的 WiFi 信号,致使网关不能稳定接入 AP,因此丢包率较高;而当 WiFi 路由器置于 P5 时,因墙壁阻挡且位置较远,1 号网关完全连接不上 AP,数据无法上传.

4.3.2 EasiARS 与多个固定网关方法的对比

本次测试将第 2 组节点的 1 号、9 号、15 号节点作为网关,在每轮工作周期都尝试连接 AP 将收到的传感网数据进行上传.实验采用 ZigBee 单跳传输

模式,因为可能同时有多个网关接收到同一个数据包并上传,所以需要在 PC 端做数据的去重工作.在测试场景中,在节点部署之前需要进行 WiFi 链路质量测试工作,并将网关放置在预估的链路质量较好的位置,本次实验中将作为网关的 3 个节点放置在距离 5 次实验中 AP 位置较近的地方.

从部署速度、丢包率和能耗 3 个方面进行对比:

1) 部署速度.使用多个固定网关的方法,需要在部署前测试 WiFi 链路环境,并对部署之后运行期间的链路状况作出估计.在复杂的实际应用场景中,提前测试和预估每个位置的 WiFi 链路质量是很耗时间和人力的,因此较难快速部署,而且当传感网内的网关和节点不在 ZigBee 的 1 跳传输范围之内时,还需要设计复杂的协议进行可用网关的选取和路由的建立.而 EasiARS 采用了实时 WiFi 链路质量探测和动态角色切换方法,在部署时仅需要保证传感网内的节点在通信范围内,减少了部署前期对 WiFi 链路的测试和预估工作,提高了部署速度.

2) 丢包率.如图 10 中第 1 组和第 3 组的数据所示,2 组节点都能将绝大部分数据上传到 PC 端.但使用多个固定网关方法的丢包率很大程度取决于网关部署位置的 WiFi 链路质量,一旦 AP 覆盖区内没有网关部署(如将上述实验中的 15 号节点作为普通节点),在第 5 个测试场景中,会因为缺少网关可以有效接入到上层网络,丢包率提高至 100%.而使用 EasiARS 方法,会由 WiFi 链路质量较好的 15, 16 号节点充当网关,保证了 WiFi 的有效接入.

3) 能耗.通过 PC 端接收的数据包分析每个节点的通信能耗.根据每个节点的通信量和 WiFi 扫描次数进行能耗的计算,图 11(a)(b)分别表示了 2 组实验在不同位置的 16 个节点的能量消耗,X 轴和 Y 轴表示节点的放置位置,Z 轴为能量消耗值.组 1 节点中在 WiFi 覆盖区中有多个节点有一定几率成为网关负责上传数据,WiFi 覆盖时间较多的区域,节点成为网关的概率较大,能耗均值较高,但总体能量消耗比较均匀.而组 2 测试中普通传感器节点仅负责数据采集和广播,能耗较小,但 3 个网关节点由于每个采样周期都尝试扫描并连接 WiFi 上传数据,能量消耗远高于普通节点,同时也远高于组 1 任意节点的能耗,这样会迅速耗尽网关的能量,进而使传感网数据无法上传.使用 EasiARS 的传感网中,WiFi 覆盖区的节点轮流充当了网关角色,将网关过高的能量消耗分散到多个节点上.以能耗最高的节点能量耗尽作为网络生存期结束,在本实验场

景下,EasiARS 方法的生存期比多固定网关的方法提高了约 67%.

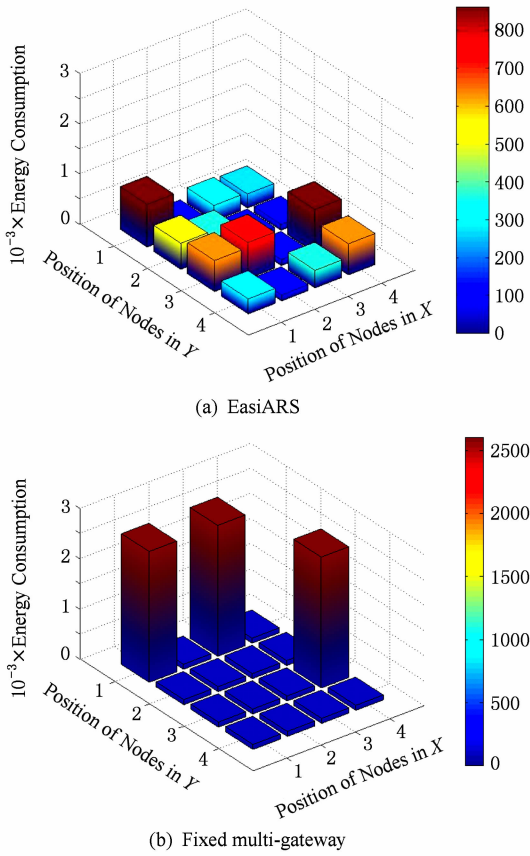


Fig. 11 Comparison of energy consumption in two experiments.

图 11 2 组实验的节点能量消耗对比

5 结 论

针对仅能使用 WiFi 网络进行接入,并且所有设备都能能量受限的无线传感网应用,本文提出的 EasiARS 方法可保证在 WiFi 链路不稳定情况下的接入质量,并使节点的能量消耗均衡,延长了传感器网络的生存期.在实际应用中,本文设计的节点和方法可以进行快速部署和应用,可节省大量的前期环境测试工作.

在下一步工作中,我们将通过仿真环境,评估 EasiARS 方法在大规模节点和多片不连续的 WiFi 覆盖环境下的网络稳定性和能量消耗.

参 考 文 献

[1] Liu Qiang, Cui Li, Chen Haiming. Key technologies and applications of Internet of Things [J]. Computer Science, 2010, 37(6): 1-10 (in Chinese)

(刘强,崔莉,陈海明. 物联网关键技术与应用[J]. 计算机科学, 2010, 37(6): 1-10)

[2] Liu Hongyi, Zhao Fang, Li Chaohui, et al. Design and implementation of an indoor and outdoor environment remote monitoring system based on WiFi sensor network [J]. Journal of Computer Research and Development, 2010, 47 (Suppl II): 361-365 (in chinese)
(刘红义, 赵方, 李朝晖, 等. 一种基于 WiFi 传感器网络的室内外环境远程监测系统设计与实现[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(增刊 II): 361-365)

[3] Raghunathan V, Kansal A, Hsu J, et al. Design considerations for solar energy harvesting wireless embedded systems [C] //Proc of the 4th Int Symp on Information Processing in Sensor Networks (IPSN 2005). Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 457-462

[4] Dutta P, Hui J, Jeong J, et al. Trio: Enabling sustainable and scalable outdoor wireless sensor network deployments [C] //Proc of the 5th Int Conf on Information Processing in Sensor Networks. New York: ACM, 2006: 407-415

[5] Hu Y, He W, Yang S, et al. Multi-gateway multi-path routing protocol for 802.11s WMN [C] //Proc of the 6th IEEE Int Conf on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob 2010). Piscataway, NJ: IEEE, 2010: 308-315

[6] Zhou R, Xiong Y, Xing G, et al. ZIFi: Wireless LAN discovery via ZigBee interference signatures [C] //Proc of the 16th Annual Int Conf on Mobile Computing and Networking. New York: ACM, 2010: 49-60

[7] Ansari J, Ang T, Mähönen P. WiSpot: Fast and reliable detection of Wi-Fi networks using IEEE 802.15.4 radios [C] //Proc of the 9th ACM Int Symp on Mobility Management and Wireless Access. New York: ACM, 2011: 35-44

[8] Li W, Zhu Y, He T. WiBee: Building WiFi radio map with ZigBee sensor networks [C] //Proc of the 31st Annual IEEE Conf on Computer Communications (INFOCOM 2012). Piscataway, NJ: IEEE, 2012: 2926-2930

[9] Jin T, Noubir G, Sheng B. WiZi-Cloud: Application-transparent dual ZigBee-WiFi radios for low power Internet access [C] //Proc of the 30th Annual IEEE Conf on Computer Communications (INFOCOM 2011). Piscataway, NJ: IEEE, 2011: 1593-1601

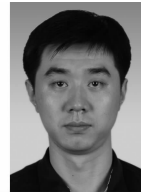
[10] Pering T, Agarwal Y, Gupta R, et al. Coolspots: Reducing the power consumption of wireless mobile devices with multiple radio interfaces [C] //Proc of the 4th Int Conf on Mobile Systems, Applications and Services. New York: ACM, 2006: 220-232

[11] Heinzelman W R, Chandrakasan A, Balakrishnan H. Energy-efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C] //Proc of the 33rd Annual IEEE Hawaii Int Conf on System Sciences. Piscataway, NJ: IEEE, 2000: 1-10

- [12] Younis O, Fahmy S. HEED: A hybrid, energy-efficient, distributed clustering approach for ad hoc sensor networks [J]. IEEE Trans on Mobile Computing, 2004, 3(4): 366-379
- [13] Chen G, Li C, Ye M, et al. An unequal cluster-based routing protocol in wireless sensor networks [J]. Wireless Networks, 2009, 15(2): 193-207
- [14] Wei D, Jin Y, Vural S, et al. An energy-efficient clustering solution for wireless sensor networks [J]. IEEE Trans on Wireless Communications, 2011, 10(11): 3973-3983
- [15] Ye M, Li C, Chen G, et al. EECS: An energy efficient clustering scheme in wireless sensor networks [C] //Proc of the 24th IEEE Int Performance, Computing, and Communications Conf (IPCCC 2005). Piscataway, NJ: IEEE, 2005: 535-540
- [16] Liu A F, Zhang P H, Chen Z G. Theoretical analysis of the lifetime and energy hole in cluster based wireless sensor networks [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2011, 71(10): 1327-1355
- [17] Texas Instruments. CC2530 datasheet [EB/OL]. [2010-10-05]. <http://www.ti.com/lit/gpn/cc2530>
- [18] Texas Instruments. CC2591 datasheet [EB/OL]. [2009-11-18]. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2591.pdf>
- [19] Microchip. RN131 WiFi module product [EB/OL]. [2014-03-31]. <http://www.microchip.com/wwwproducts/Devices.aspx?dDocName=en558369>
- [20] Texas Instruments. TPS2061 datasheet [EB/OL]. [2009-10-29]. <http://www.ti.com/product/tps2061>



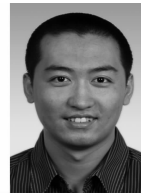
Peng Kang, born in 1989. Master. His main research interests include embedded system, wireless sensor networks, and Internet of things.



Zhao Ze, born in 1978. PhD and senior engineer of the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include embedded system and wireless sensor networks(zhaoze@ict.ac.cn).



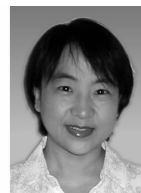
Chen Haiming, born in 1981. PhD, assistant professor at the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. Member of China Computer Federation. His research interests include wireless, ad hoc and sensor networks, and Internet of things (chenhaiming@ict.ac.cn).



Li Dong, born in 1979. PhD and associate professor. Member of China Computer Federation. His main research interests include sensor networks and ad hoc networks(lidong@ict.ac.cn).



Shi Hailong, born in 1986. PhD, assistant professor at the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. His main research interests include Internet of Things and embedded systems (shihailong@ict.ac.cn).



Cui Li, born in 1962. PhD, professor and PhD supervisor in the Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences. Senior member of China Computer Federation. Her main research interests include sensor technology, wireless sensor networks and Internet of things.