

# 无线传感器网络中一种抗无线局域网干扰的信道分配机制

张招亮<sup>1,2)</sup> 陈海明<sup>1)</sup> 黄庭培<sup>1,2)</sup> 崔 莉<sup>1)</sup> 赵 泽<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>(中国科学院计算技术研究所 北京 100190)

<sup>2)</sup>(中国科学院研究生院 北京 100049)

**摘 要** 无线传感器网络(WSN)易受到与其共享信道的无线局域网(Wifi)干扰,造成通信可靠性及吞吐量下降.当具有不同优先级的多个 WSN 受到 Wifi 干扰时,如何按优先级分配信道,并兼顾整体通信可靠性及吞吐量是一个重要问题.针对该问题,作者提出了一种抗 Wifi 干扰的信道分配机制 EasiCAP(Channel Allocation for wireless sensor networks with Priority).该机制利用基于干扰强度和活跃比率的干扰特征模型(External Interference Model, EIM)度量 WSN 中各信道的 Wifi 干扰;同时,采用以接收端为中心的模型(Internal Interference Model, IIM)度量各 WSN 之间的干扰.然后,各 WSN 根据 EIM 和 IIM 度量的结果,采用局部化贪婪信道分配算法独立、实时地选择信道,通过保持信道、切换信道及抢占信道操作实现按优先级分配信道,并尽可能降低所有网络所受干扰之和.实际测量和仿真结果表明,EasiCAP 可为各 WSN 提供与其优先级相对应的通信可靠性和吞吐量;而且该机制下的平均通信可靠性及吞吐量也比现有方法高.此外,EasiCAP 未带来过大的开销.

**关键词** 无线传感器网络;信道干扰;无线局域网;差异化的服务质量;包接收率;物联网

**中图法分类号** TP393 **DOI 号:** 10.3724/SP.J.1016.2012.00504

## A Channel Allocation Scheme to Mitigate Wifi Interference for Wireless Sensor Networks

ZHANG Zhao-Liang<sup>1,2)</sup> CHEN Hai-Ming<sup>1)</sup> HUANG Ting-Pei<sup>1,2)</sup> CUI Li<sup>1)</sup> ZHAO Ze<sup>1,2)</sup>

<sup>1)</sup>(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190)

<sup>2)</sup>(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

**Abstract** Wireless sensor networks will suffer severe performance degradation in communication reliability and throughput when interfered by co-located Wifi devices. When multiple sensor networks with different priority are interfered by Wifi devices, it is of great significance to allocate channels according to their priority as well as take into consideration the overall communication reliability and throughput. To address this problem, a channel allocation scheme to mitigate Wifi interference, called EasiCAP (Channel Allocation for wireless sensor networks with Priority), is presented. The scheme employs an external interference model, which is based on interference signal strength and activity ratio, to measure Wifi interference in each channel of sensor networks. In addition, a receiver-centric interference model is used to gauge internal interference amongst different sensor networks. Based on the measurements of external interference and internal interference, each sensor network independently selects its working channel in real time via a

收稿日期:2011-08-26;最终修改稿收到日期:2011-12-29.本课题得到国家“九七三”重点基础研究发展规划项目基金(2011CB302803)、国家自然科学基金(61100180)、“新一代宽带无线移动通信网”国家科技重大专项(2010ZX03006-003-02)资助.张招亮,男,1982年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、Ad-Hoc网络、网络安全及算法分析. E-mail: zhangzhaoliang@ict.ac.cn. 陈海明,男,1981年生,博士,助理研究员,主要研究方向为无线传感器网络和 Ad-Hoc网络的协议设计与性能评价. 黄庭培,女,1980年生,博士研究生,主要研究方向为无线传感器网络、Ad-Hoc网络及物联网. 崔 莉,女,1962年生,博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为传感器技术、无线传感器网络及物联网. 赵 泽,男,1978年生,博士研究生,助理研究员,主要研究方向为无线传感器网络和无线通信.

localized greedy algorithm in order to assign channels according to priority and also reduce the overall interference of all sensor networks as much as possible. Then, the sensor network performs one of the three operations, i. e., channel keeping, channel swapping, and channel pre-empting, based on the channel selection decision. Testbed experiments and simulations are conducted to verify the effectiveness of the proposed scheme. The experimental results demonstrate that EasiCAP can provide differentiated communication reliability and throughput corresponding to the network priority. Also, it has higher average communication reliability and throughput than existing schemes. Furthermore, it does not introduce significant overhead.

**Keywords** WSN; channel interference; Wifi; differentiated quality of service; packet reception rate; Internet of Things

## 1 引言

无线传感器网络(Wireless Sensor Networks, WSN)<sup>[1]</sup>应用日益广泛,已在军事、农业、交通、医疗等诸多领域产生了重要影响.近年来,随着研究的深入,许多室内应用如智能家居<sup>[2]</sup>、环境监测<sup>[3]</sup>、火灾预警<sup>[4]</sup>等已受到人们重视.目前,无线传感器网络主要基于 802.15.4 协议,工作在 2.4 GHz 的 ISM 频段,然而室内环境中已有的大量基于 802.11 协议的无线局域网(简称为 Wifi)设备,也使用该频段.两者采用不同的物理层技术,且 Wifi 的功率比 WSN 的功率大 1~2 个数量级.研究已证实<sup>[5]</sup>,当 Wifi 网络和 WSN 网络部署在同一环境中,且 Wifi 信道与 WSN 信道重叠时, Wifi 通信会对 WSN 产生较大干扰,严重影响 WSN 的通信可靠性.在最坏情况下, WSN 的丢包率将高于 90%<sup>[5]</sup>.所以,近年来,如何提高 WSN 抗 Wifi 干扰能力已成为一个重要研究方向<sup>[6-9]</sup>,而信道分配是其中的一个基本问题.

目前,在 Wifi 干扰下的 WSN 信道分配问题上已有一些初步的研究成果<sup>[6,10-11]</sup>.然而,现有研究仅局限于单个 WSN 的信道选择,而未考虑多个 WSN 与 Wifi 共存时的信道分配问题.随着传感器网络的应用和推广,可能同一环境中部署多个 WSN(或独立子网络<sup>[3,12]</sup>),且各个 WSN 对通信可靠性有不同的要求,即各个网络具有不同优先级.例如,在一个智能楼宇应用中,可能同时部署火灾预警、健康监护及环境监测等几种传感器网络.其中,火灾预警网络的可靠性要求高于健康监护网络的可靠性要求,而后者又高于环境监测网络的可靠性要求.因而,火灾预警网络的优先级高于健康监护网络的优先级,而后者又高于环境监测网络的优先级.当这些具有不同优先级的多个 WSN 同时受到 Wifi 干扰时,如

何为它们分配信道以保证相应的通信可靠性是无法避免的一个重要问题.

具有不同优先级的多个 WSN 的信道分配问题面临着以下两个挑战:(1) WSN 度量 Wifi 干扰较为困难,这是因为 Wifi 和 WSN 物理层技术不同,两者无法直接通信;(2) 通信质量较好的信道个数有限,各 WSN 除需要按优先级分配信道外,同时需要兼顾所有 WSN 的整体通信质量,允许不同 WSN 共享同一信道.这是因为 802.15.4 协议具有 16 个可用信道,每个信道的带宽是 2 MHz,信道间隔为 3 MHz,而每个 Wifi 的信道带宽为 22 MHz,因此,4 个使用不重叠信道的 Wifi AP(Access Point)就可以将所有 802.15.4 的信道覆盖.实验发现, WSN 与 Wifi 信道重叠的现象普遍存在.例如,通过侦听分析,作者所在实验室附近存在 13 个 AP,且工作时间内通常约有近 40 台 Wifi 设备同时与这些 AP 通信,严重影响了所有的 802.15.4 信道的通信质量.在此环境中,仅有少量干扰较小的信道.因而,以独占方式分配信道只能满足少量优先级高的 WSN,而会使优先级较低的 WSN 因所分配信道的通信质量过低而无法正常工作.更为合理的作法是允许不同的 WSN 共享干扰较少的信道,以兼顾 WSN 的整体通信质量.

针对具有不同优先级的多个 WSN 的信道分配问题,本文提出了一种信道分配机制 EasiCAP. EasiCAP 首先根据外部干扰强度和活跃比率来构建外部干扰模型(EIM),并基于该模型,利用在线采集的 RSSI(Received Signal Strength Indicator)值来度量 WSN 各信道的 Wifi 干扰大小.此外, EasiCAP 利用以接收端为中心的內部干扰模型(IIM)来度量 WSN 之间的内部干扰.然后,基于 EIM 和 IIM 模型的度量结果, EasiCAP 采用贪婪思想进行实时信道分配,目标是按优先级分配信道,同时尽可能降低所

有 WSN 所受的总干扰。

本文的主要贡献如下：

(1) 通过实验分析了 Wifi 对 WSN 的干扰, 并发现: 可以基于 RSSI 计算出干扰强度和活跃比率, 以此来度量 Wifi 干扰大小. 并基于此, 提出了一种度量 Wifi 干扰大小的外部干扰模型 EIM. 此外, 引入以接收端为中心的干扰模型来评价 WSN 之间的干扰。

(2) 证明了 Wifi 干扰下具有不同优先级的多个 WSN 的信道分配问题为 NP-难问题; 并提出了一种局部化(基于局部信息的)贪婪信道分配算法. 其思想是通过保持信道、切换信道、抢占信道等 3 种操作尽可能地降低 WSN 的总带权干扰, 以达到按优先级分配信道并兼顾所有 WSN 的整体通信质量的目标。

(3) 通过实验床测试和仿真实验, 验证了所提出的信道分配机制的有效性。

## 2 相关工作

目前, 在 Wifi 干扰的度量、Wifi 干扰下 WSN 的信道分配及抗 Wifi 干扰机制等方面已有一些相关研究。

由于 WSN 无法与 Wifi 进行通信, 难以相互协作测量干扰, 所以对 Wifi 干扰程度的度量不同于传统 WSN 内部的干扰度量<sup>[13]</sup>. Shin 等人<sup>[14]</sup>建立了 802.15.4 在 IEEE802.11b 干扰下的包接收率的理论公式, 但要求获得 Wifi 的包长和到达时间等参数, 实际应用较为困难. Musaloiu-E 等人<sup>[10]</sup>提出了一种通过计算高于某阈值的 RSSI 读数个数来评价 Wifi 干扰的方法, 但未考虑 Wifi 的信号强度。

Yi 等人<sup>[6]</sup>通过控制 WSN 与 Wifi 之间的距离和频率间隔来降低 WSN 所受干扰, 并提出了一种跳频方案以减少干扰. Musaloiu-E 等人<sup>[10]</sup>提出以采集数据路径为单位实施动态跳频以降低 Wifi 干扰. Sha 等人<sup>[11]</sup>提出了一种以期重传次数 ETX 为依据、面向接收节点的跳频方案 ARCH. 以上研究在缓解 Wifi 干扰方面取得了较好的效果, 但上述研究仅关注 Wifi 干扰下单个 WSN 的信道选择问题, 而没有考虑在 Wifi 干扰下多个 WSN 之间如何分配信道. 本文将该问题一般化, 主要考虑解决具有优先级的多个 WSN 在 Wifi 干扰下的信道分配问题, 这样就可将无优先级的情况视为优先级相等的情况。

此外, 相关研究还提出了一些采用编码和信道

访问控制技术来降低 Wifi 干扰的方法, 如动态增加冗余<sup>[7]</sup>和前向纠错码(FEC)、动态调节帧长<sup>[9]</sup>及利用忙音技术<sup>[8]</sup>. 这些方法可以和信道分配技术结合起来, 更好地增强 WSN 的抗干扰能力. 本文将 EasiCAP 与这些方法相结合的策略作为未来的研究工作。

## 3 Wifi 干扰分析

本节通过实验分析 Wifi 干扰对 WSN 通信质量的影响及 Wifi 干扰的特征. 实验场景如图 1 所示, 将一对传感收发节点和一对 Wifi 收发设备放置在实验室的走廊中, 将 Wifi 的信道设置为 802.11 的信道 11, 该信道频段与 802.15.4 的信道 21~24 重叠。

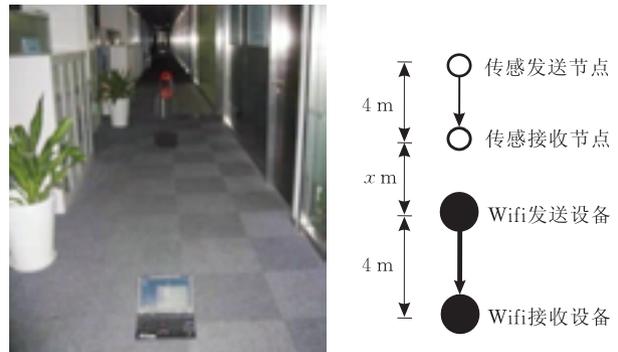


图 1 Wifi 干扰分析的实验场景

首先, 分析 Wifi 设备以不同速率发送数据包时, 传感节点在不同的 802.15.4 信道上的包接收率 PRR(Packet Reception Rate). 图 2 给出了 Wifi 发送设备距离传感接收节点 2m, 并分别以 3 种不同的速率发送数据包时, 传感接收节点的 PRR 统计结果. 从该图可以看出, 在 Wifi 干扰下, 不同 802.15.4 信道的质量可能相差很大. 例如, 当 Wifi 速率为 3 Mbps 时, 22~25 信道的 PRR 分别为 6.69%、12.03%、73.97%和 97.14%. 此外, Wifi 速率越高, 传感节点的 PRR 越低. 调整 Wifi 设备与 WSN 节点之间的距离, 所得的结果与图 2 类似。

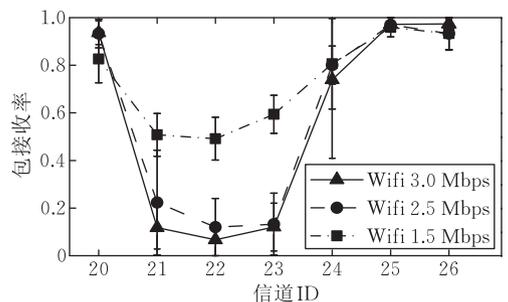


图 2 不同 Wifi 干扰下的包接收率

然后,在同样的实验场景下统计分析传感发送节点所采集的 RSSI 值.将 Wifi 发送设备与传感接收节点之间的距离调整为 4 m, Wifi 发送设备的发送速率设置为 2.5 Mbps,图 3 给出了传感发送节点在不同信道上所采集的 RSSI 值,这些 RSSI 值为滤除噪声后的均值.对比图 3 和图 2 的曲线可以发现,  $PRR$  越高,非噪声 RSSI 均值越低,且两种值之间具有很高的相关性.图 4 统计了非噪声 RSSI 值比率及对应  $PRR$ .从图中可以看出非噪声 RSSI 值比率与  $PRR$  存在很强的相关性,且  $PRR$  随着非噪声 RSSI 值比率的增加而降低.

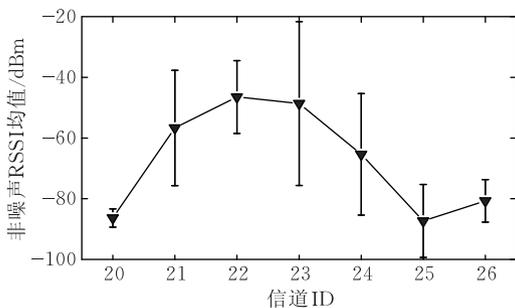


图 3 不同信道的非噪声 RSSI 均值

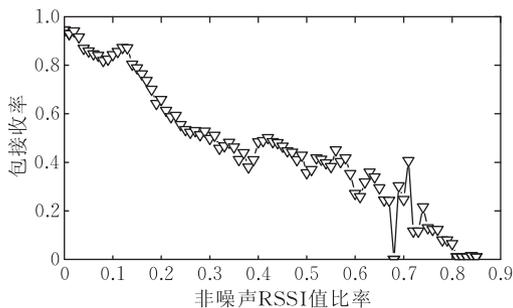


图 4 不同非噪声 RSSI 值比率对应的包接收率

实验结果表明:(1)存在 Wifi 干扰的环境中,不同的 802.15.4 信道的通信质量可能相差很大,且传感节点的通信质量随 Wifi 通信量的增加而降低,因为不同的 WSN 对通信可靠性的要求不一样,所以,应使可靠性要求较高的 WSN 获得更好的信道.(2)非噪声 RSSI 均值和非噪声 RSSI 值比率与包接收率之间存在较强的相关性.因而,本文提出一种 Wifi 干扰模型,结合这两种值来衡量 Wifi 干扰的大小.

## 4 抗 Wifi 干扰的信道分配

本节描述 EasiCAP 的设计与实现. EasiCAP 的框架如图 5 所示.普通节点部分含外部干扰模型抽取和干扰检测两个模块. Sink(汇聚节点)部分含信

道分配和干扰检测控制两个模块.外部干扰模型抽取模块通过测量信道以获得 Wifi 干扰模型,并将该模型提供给干扰检测模块.在 WSN 运行过程中,干扰检测控制模块在一定条件下触发并控制干扰检测模块,通过干扰检测模块获得信道当前的内部和外部干扰状态,并将这些状态信息提供给信道分配模块,信道分配模块实现信道的动态分配.

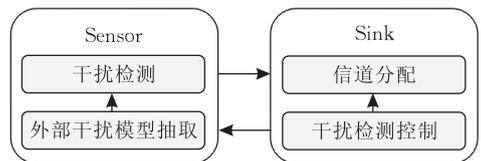


图 5 EasiCAP 的框架图

### 4.1 外部干扰模型

为了评价 Wifi 对 WSN 的干扰大小,外部干扰模型抽取模块先构建 EIM 以度量 Wifi 干扰大小.

包接收率  $PRR$  是评价干扰大小的有效指标,由前面的实验结果可知,包接收率  $PRR$  与非噪声 RSSI 均值和非噪声 RSSI 值比率有较强的相关性.因此,本文提出一种基于非噪声 RSSI 均值与非噪声 RSSI 值比率的干扰特征描述方法,并建立干扰特征与  $PRR$  之间的映射关系,用于评价外部干扰的大小.为便于理解,以下将非噪声 RSSI 均值与非噪声 RSSI 值比率分别定义为干扰强度和活跃比率.

记  $\mathbf{U}_{\text{rssi}}$  为以周期  $T_s$  采集的一组 RSSI 值所组成的向量.用  $|\mathbf{U}_{\text{rssi}}|$  表示所采集的 RSSI 的个数.通过一个噪声阈值  $Noise_{\text{thr}}$  来判断采集的 RSSI 值是否为噪声,即当 RSSI 值小于等于  $Noise_{\text{thr}}$  时,将该值视为信道噪声.本文的实现以目前常用的 TI CC2420 芯片为参考,取  $Noise_{\text{thr}}$  值为  $-90$  dBm.为便于讨论,以下默认信号和噪声的强度都以 dBm 为单位.

**定义 1.** 干扰强度.记  $\mathbf{U}_{\text{large\_rssi}}$  为  $\mathbf{U}_{\text{rssi}}$  去除噪声后的  $\mathbf{U}_{\text{rssi}}$  向量,则干扰强度为

$$P = \sum_{i=1}^{|\mathbf{U}_{\text{large\_rssi}}|} \frac{\mathbf{U}_{\text{large\_rssi}}(i)}{|\mathbf{U}_{\text{large\_rssi}}|} \quad (1)$$

**定义 2.** 活跃比率.记  $\mathbf{U}_{\text{active}}$  为 0/1 向量;当且仅当  $\mathbf{U}_{\text{rssi}}(i) > Noise_{\text{thr}}$ ,  $\mathbf{U}_{\text{active}}(i) = 1$ ;否则,  $\mathbf{U}_{\text{active}}(i) = 0$ ,则活跃比率为

$$A = \sum_{i=1}^{|\mathbf{U}_{\text{active}}|} \frac{\mathbf{U}_{\text{active}}(i)}{|\mathbf{U}_{\text{active}}|} \quad (2)$$

**定义 3.** 干扰特征.  $\mathbf{U}_{\text{rssi}}$  的干扰特征为二元组  $(P, A)$ .

EIM 模型的构建及外部干扰的计算过程如下:

(1) 令  $P_{\text{min}}$  和  $P_{\text{max}}$  分别为可能出现的最小和最

大干扰强度,  $A_{\max}$  为可能出现的最大活跃比率. 以网格划分参数  $P$  和  $A$  的取值空间, 网格在  $P$  轴方向的取值范围为  $[P_{\min}, P_{\max}]$ , 单元宽度为  $\Delta P$ ; 在  $A$  轴方向的取值范围为  $[0, A_{\max}]$ , 单元宽度为  $\Delta A$ . 让每个网格点对应一个干扰特征, 并建立一个特征映射矩阵  $\mathbf{F}$  用于存储所有干扰特征  $(P, A)$  所对应的  $PRR$  估计值. 给定特征  $(P, A)$  的一组测量值  $PRR_1, PRR_2, \dots, PRR_s$ , 该特征对应的  $PRR$  估计值为

$$\widehat{PRR} = 1/s \sum_{i=1}^s PRR_i.$$

(2) 因 Wifi 和 WSN 之间无法相互通信与协作计算  $PRR$  估计值, 故需以离线方式建立特征映射矩阵  $\mathbf{F}$ . 此外, 为统一评价指标, 选择一个参考接收功率  $Power_{\text{ref}}$ , 以此为基准衡量所有节点受到的外部干扰大小. 为此, 利用一对 Wifi 设备对传感节点进行离线训练, 具体来讲, Wifi 设备以一定的发射功率和发送速率广播数据包, 以形成各种程度的干扰. 选择一对传感节点, 将其中一个作为主测节点, 另一个作为参考节点, 通过调整这两个节点之间的距离使主测节点发送的信号到达参考节点时的功率为  $Power_{\text{ref}}$ . 在一个  $T_m$  时段内, 主测节点以周期  $T_s$  读取 RSSI 值 (本文实现中取  $T_s = 1 \text{ ms}$ ); 然后, 在接下去的一个  $T_m$  时段内, 主测节点持续广播  $t$  个测试包, 由参考节点统计出包接收率  $PRR$  的估计值并发送给主测节点. 从而, 主测节点可计算出一组  $(P, A, PRR_i)$  值. 当为各干扰特征  $(P, A)$  收集足够数量的测量值后, 主测节点建立特征映射矩阵  $\mathbf{F}$ . 稍后, 将分析所需采集的  $PRR$  测量值的数目  $s$ .

(3) 在建立了特征映射矩阵  $\mathbf{F}$  之后, 各节点基于  $\mathbf{F}$  计算出各信道的外部干扰指数. 假设任意节点  $u$  在线采集的信道  $c$  的干扰特征为  $(P, A)$ , 定义干扰特征  $(P_i, A_i)$  和  $(P, A)$  之间的距离为

$$d((P_i, A_i), (P, A)) = \sqrt{\left(\frac{P - P_i}{\Delta P}\right)^2 + \left(\frac{A - A_i}{\Delta A}\right)^2} \quad (3)$$

令  $\mathbf{F}$  中距  $(P, A)$  最近的  $K$  个干扰特征分别为  $(P_1, A_1), (P_2, A_2), \dots, (P_K, A_K)$ , 干扰特征  $(P, A)$  对应的干扰状态的  $PRR$  估计值为

$$\widehat{PRR}(P, A) = \frac{\sum_{i=1}^K d((P_i, A_i), (P, A))^{-1} PRR_i}{\sum_{i=1}^K d((P_i, A_i), (P, A))^{-1}} \quad (4)$$

取节点  $u$  在信道  $c$  的外部干扰指数为

$$I_{\text{out}}(u, c) = 1 - \widehat{PRR}(P, A) \quad (5)$$

该值为丢包率的估计值, 可较好地反映信道  $c$  的

Wifi 干扰大小.

为确保所建立的特征映射模型具有较高的准确度同时降低模型建立的代价, 以下定理给出为保证  $PRR$  的估计准确度所需的最少  $PRR$  测量值数目.

**定理 1.** 对于干扰特征  $(P, A)$ , 仅需采集

$$s \geq \frac{z_{\alpha/2}^2 (1 - \overline{PRR})}{te^2 \overline{PRR}} \quad (6)$$

个  $PRR$  样本就能以  $1 - \alpha$  的概率保证  $PRR$  的估计误差在  $\pm e$  范围内, 其中,  $z_{\alpha/2}$  为  $N(0, 1)$  分布的  $\alpha/2$  上分位数,  $t$  为统计各个  $PRR$  时所涉及测试包的数目.

证明. 假设用测试包  $pkt_{i_1}, pkt_{i_2}, \dots, pkt_{i_t}$  来测量  $PRR_i$ , 并用标志变量  $x_{ij}$  来表示各个测试包是否发送成功, 即  $x_{ij} = 1$  表示  $pkt_{ij}$  发送成功, 则  $PRR_i$  为  $x_{ij} (j = 1, 2, \dots, t)$  的统计均值, 即

$$PRR_i = \sum_{j=1}^t x_{ij} / t.$$

所以,

$$\overline{PRR} = \sum_{i=1}^s \frac{PRR_i}{s} = \sum_{1 \leq i \leq s, 1 \leq j \leq t} \frac{x_{ij}}{st}.$$

可将各个包是否发送成功  $x_{ij}$  看作独立同分布的 0-1 型随机变量, 其中  $p(x_{ij} = 1) = \overline{PRR}$ . 由二项分布的 Wald 的置信区间估计可知,  $s$  个样本的  $1 - \alpha$  置信区间为

$$\overline{PRR} \pm z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\overline{PRR}(1 - \overline{PRR})}{st}},$$

准确度要求置信区间在  $(1 \pm e)\overline{PRR}$  范围内, 故

$$z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{\overline{PRR}(1 - \overline{PRR})}{st}} \leq e \overline{PRR},$$

可得

$$s \geq \frac{z_{\alpha/2}^2 (1 - \overline{PRR})}{te^2 \overline{PRR}}. \quad \text{证毕.}$$

例如, 当  $\alpha = 0.1, e = 0.05, \overline{PRR} = 0.5, t = 50$  时,  $s$  的最小值为 22. 在实现时, 先取特征  $(P, A)$  的少量  $PRR$  样本获得一个初步估计值  $\overline{PRR}$ , 再计算  $s$  的最小值.

在一个真实 WSN 中, 选取 3 对节点, 每对节点之间的接收信号强度为  $Power_{\text{ref}}$ , 利用所建立的 EIM 模型度量 Wifi 干扰下的丢包率, 并与 LS SVM(RBF 核)模型及文献[14]的理论模型(theoretical physical model)进行比较. 比较的指标是度量的绝对估计误差. 图 6 给出了各种模型产生的绝对误差的累计分布. 由图可知, 特征映射模型产生的误差最小, 能以约 80% 的概率保证绝对误差小于 7%.

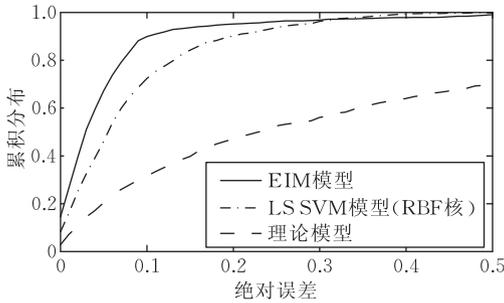


图 6 丢包率估计的绝对误差

## 4.2 干扰检测

本小节介绍干扰检测模块及干扰检测控制模块。它们的主要作用是在 WSN 运行过程中检测当前各信道的外部干扰及各 WSN 之间的内部干扰。

对于 WSN 之间的内部干扰, EasiCAP 借鉴文献[15]思想, 但采用以接收端为中心的干扰模型(IIM)。若 WSN  $N_i$  的节点  $u$  被邻居 WSN  $N_j$  干扰, 则邻居 WSN  $N_j$  对节点  $u$  产生的内部干扰指数为  $I_{in}(u, N_j) = |\{v | v \in N_j \wedge u \in D(v, R_v^+)\}|$ , 其中,  $D(v, R_v^+)$  是以节点  $v$  为中心, 以  $R_v^+$  为半径的圆盘。  $R_v^+ = (1+r)R_v, r > 0, R_v$  为通信半径。这里假设当节点  $v$  发送数据包时, 在  $R_v^+$  范围内的节点均被干扰。通常认为  $v$  的通信范围  $R_v$  为包接收率 PRR 达到一定值(如 90%)的区域。为判断  $u$  是否在  $v$  的干扰范围内,  $v$  节点发送常量  $M_{beacon}$  个 Beacon 包。将 PRR 大于等于  $M_{beacon}^- / M_{beacon}$  的区域视为干扰区域, 其中,  $M_{beacon}^-$  为常量。即只要  $u$  节点收到  $v$  节点发送的任意  $M_{beacon}^-$  个 Beacon 包, 则认为节点  $u$  被节点  $v$  干扰, 而整个 WSN 所受  $N_j$  的干扰大小定义为

$$I_{in}(N_i, N_j) = \sum_{u \in N_i} I_{in}(u, N_j) \quad (7)$$

WSN 中的节点在运行过程中将自己统计的 PRR 周期性地附加在数据包内, 传送给 Sink。当 Sink 检测到 PRR 的平均值降低某个百分比阈值  $PRR_{thr}$  时, 由于干扰检测控制模块启动干扰检测。干扰检测的具体流程如下:

(1) Sink 向全网洪泛干扰检测启动消息, 各节点( $u$ )收到检测启动消息后, 依次检测各可用信道的干扰大小。如图 7 所示, 各信道的检测时间分为两段, 在  $T_{out}$  内, 各节点周期性采集 RSSI 值; 在  $T_{in}$  内, 各节点广播  $M_{beacon}$  个带有网络标识及优先级的 Beacon 消息; 其它 WSN 节点在收到 Beacon 消息后, 广播  $M_{beacon}$  个 Beacon 回应消息。  $T_{out}$  和  $T_{in}$  之间有一个保护时间。

(2) 检测完信道  $c$  后, 首先根据采集到的 RSSI

值建立  $\mathbf{U}_{rssi}$  向量; 然后按照 4.1 节所述方法计算信道  $c$  的外部干扰指数  $I_{out}(u, c)$ ; 接着进行下一个信道的检测。

(3) 当检测完所有信道后, 各节点回到原工作信道, 与此同时, 各节点利用收到的 Beacon 回应消息计算各邻居 WSN ( $N_j$ ) 相对于自己的内部干扰指数  $I_{in}(u, N_j)$ 。

(4) 各节点将测量结果  $I_{out}(u, c)$  及  $I_{in}(u, N_j)$  传送至 Sink。 Sink 根据这两个结果进行信道分配。

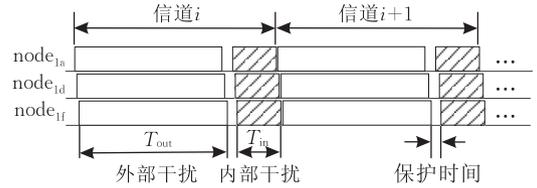


图 7 干扰检测时序图

## 4.3 信道分配

假设各个 WSN 是静止的, 可用一个干扰图  $G=(V, E)$  描述各个 WSN 之间的内部干扰关系。每个 WSN  $N_i$  对应集合  $V$  中一个结点  $n_i$ , 边集  $E$  中存在一条边  $(n_i, n_j)$  当且仅当 WSN  $N_i$  与 WSN  $N_j$  之间可能相互干扰。值得注意的是,  $N_i$  表示实际 WSN,  $n_i$  表示干扰图中  $N_i$  对应的结点。假设有  $k$  个可用信道, 信道分配的问题可对应为每个结点  $n_i$  染色的问题, 但允许相邻结点染同一颜色, 即允许不同 WSN 共享同一个信道。记结点  $n_i$  的染色为  $c_i$ 。即为  $N_i$  分配的信道为  $c_i$ 。当  $(n_i, n_j) \in E$  且  $c_i \neq c_j$ , 即为  $N_i$  与  $N_j$  分配的信道不同, 它们之间不构成干扰。图 8 给出多个 WSN 相互干扰的一个实例及对应的干扰图。

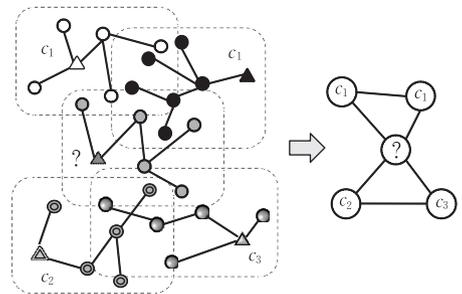


图 8 多个 WSN 相互干扰实例及干扰图

首先, 为了进行信道分配, Sink 需要一个指标统一评价各信道的内外干扰程度。基于前两小节描述的方法, Sink 可获得所在 WSN 的任意节点  $u$  的外部干扰  $I_{out}(u, c)$  和内部干扰  $I_{in}(u, N_j)$ 。 Sink 对任意节点  $u$  在各信道上的外部干扰求均值, 得到当前 WSN ( $N_i$ ) 在各信道的外部干扰:

$$I_{\text{out}}(N_i, c) = \sum_{u \in N_j} \frac{I_{\text{out}}(u, c)}{M_{\text{node}}} \quad (8)$$

其中  $M_{\text{node}}$  为当前 WSN 中的节点个数. 并对所有节点所受相邻 WSN ( $N_j$ ) 的内部干扰求和, 得到当前 WSN ( $N_i$ ) 受  $N_j$  的内部干扰:

$$I_{\text{in}}(N_i, N_j) = \sum_{u \in N_j} I_{\text{in}}(u, N_j).$$

然后, Sink 对  $I_{\text{out}}(N_i, c)$  和  $I_{\text{in}}(N_i, N_j)$  进行归一化.  $I_{\text{out}}(N_i, c)$  的归一化值为

$$I'_{\text{out}}(N_i, c) = I_{\text{out}}(N_i, c) \quad (9)$$

$I_{\text{in}}(N_i, N_j)$  的归一化值为

$$I'_{\text{in}}(N_i, N_j) = \frac{I_{\text{in}}(N_i, N_j)}{M_{\text{node\_max}} \text{Degree}_{\text{max}}} \quad (10)$$

其中  $M_{\text{node\_max}}$  为预置的单个 WSN 中的最大节点数,  $\text{Degree}_{\text{max}}$  为预置的所有 WSN 中的最大节点度, 计算每个节点的度时还需要考虑来自其它 WSN 的可能构成干扰的节点. 并记当前 WSN ( $N_i$ ) 在信道  $c$  所受内部干扰之和为

$$I'_{\text{in}}(N_i, c) = \sum_{c_j = c \text{ and } (n_i, n_j) \in E} I'_{\text{in}}(N_i, N_j) \quad (11)$$

另一方面, 假设链路的通信质量具有双向对称性, 则  $I'_{\text{in}}(N_i, N_j)$  的理论值等于  $I'_{\text{in}}(N_j, N_i)$ . 所以可计算  $N_i$  在信道  $c$  上输出的带权内部干扰之和为

$$\begin{aligned} I'_{\text{in}_p}(N_i, c) &= \sum_{c_j = c \text{ and } (n_i, n_j) \in E} W(N_j) I'_{\text{in}}(N_j, N_i) \\ &\approx \sum_{c_j = c \text{ and } (n_i, n_j) \in E} W(N_j) I'_{\text{in}}(N_i, N_j) \end{aligned} \quad (12)$$

其中  $W(N_j)$  为  $N_j$  的优先级.

具体的优先级分配方法较为灵活. 可借鉴 Internet 区分化服务的思想<sup>[16]</sup>, 按通信可靠性要求将传感器网络应用划分成多个应用类别, 每个应用类别对应一个优先级. 然后, 根据各 WSN  $N_i$  的所属应用类别为其分配对应的优先级  $W(N_i)$ . 因而, 在所有 WSN 都属于同一管理机构的应用场合, 可在部署时根据应用类别静态设置各 WSN 的优先级. 而在不同 WSN 分别属于不同用户的应用场合, 可在 WSN 的 Sink 接入 Internet 时, 由 Sink 注册应用类别, 由接入设备为 WSN 分配相应的优先级.

给定两个 WSN, 记为  $N_i$  和  $N_j$ , 当  $N_i$  的优先级  $W(N_i)$  大于  $N_j$  的优先级  $W(N_j)$  时,  $N_i$  应受到更好的保护. 加权和是一种可以将多个指标综合起来的有效方法. 所以, 用一个外部干扰和内部干扰的加权和刻画  $N_i$  在信道  $c_i$  上受到的总干扰:

$$I(N_i) = W(N_i) [\beta, 1 - \beta] \cdot [I'_{\text{out}}(N_i, c_i), I'_{\text{in}}(N_i, c_i)]^T \quad (13)$$

其中操作  $\cdot$  为求向量内积, 操作 T 为向量转置.  $\beta$  为

一个权值常量, 其值决定了外部干扰和内部干扰的重要程度. 在实际应用时, 因为 Wifi 的干扰范围无法预知, 而各 WSN 中的节点密度是已知的, 所以可以根据节点密度设置合理的  $\beta$  值. 各 WSN 节点密度越高, WSN 之间的内部干扰对 WSN 通信质量的影响就越大,  $\beta$  值应设置得越小.

信道分配应使所有 WSN 的加权干扰之和最小. 所以可将带优先级 WSN 的信道分配问题, 即 CAP 问题 (Channel Allocation for WSNs with Priority) 定义如下:

给定一个干扰图  $G = (V, E)$ ,  $k$  个可用信道  $c_1, c_2, \dots, c_k$ , 所有  $I'_{\text{out}}(N_i, c_i)$  及  $I'_{\text{in}}(N_i, N_j)$ , 如何为所有  $N_i$  分配信道  $c_i$ , 以最小化所有 WSN 的带权干扰之和

$$I_{\text{total}} = \sum_{n_i \in G} W(N_i) [\beta, 1 - \beta] [I'_{\text{out}}(N_i, c_i), I'_{\text{in}}(N_i, c_i)]^T \quad (14)$$

以下分析 CAP 问题的复杂度.

**定理 2.** CAP 问题为 NP-难问题.

证明. 可将  $k$  染色问题归约为 CAP 问题. 考虑  $k$  染色问题: 图  $G$  是否可用  $k$  种颜色染色, 使得任意相邻结点被染成不同的颜色. 令 CAP 问题中的任意  $N_i$  在任意信道  $c$  (即颜色) 的外部干扰  $I'_{\text{out}}(N_i, c)$  为 0, 即不存在外部干扰, 并将  $W(N_i)$  设置为 1, 使各 WSN 优先级相同, 权值  $\beta$  置为 0. 所有内部干扰  $I'_{\text{in}}(N_i, N_j) = 1$ . 从而,  $k$  染色问题可转化成 CAP 问题, 求出的解为 0 对应可染, 非 0 对应不可染. 因此,  $k$  可染色问题可归约为 CAP 问题. 已知  $k$  染色问题是 NP-完全问题, 故 CAP 问题是 NP-难问题. 证毕.

由定理 2 知, 求解 CAP 问题最优解的计算复杂度较高. 若采用集中式算法, 则实施较为困难, 且通信代价过大. 所以, EasiCAP 采用局部化方式以贪婪算法求解该问题, 简而言之, 各个 WSN 的 Sink 根据自己收集的信息独立计算  $I_{\text{out}}$  和  $I_{\text{in}}$ ; 根据计算结果, 采用贪婪策略独立选择信道. 这样, 一方面可以降低通信开销, 另一方面也可以保证各个 WSN 运行的独立性.

Sink 选择信道的贪婪思想是使当前 WSN ( $N_i$ ) 在每次进行信道选择时, 都尽可能地降低 WSN 的带权总干扰  $I_{\text{total}}$ , 即最小化  $\Delta I_{\text{total}}$ . 为实现该目的, 定义信道选择的 3 种操作:

(1) 保持信道 ( $N_i \sim c_i$ ). 即  $N_i$  保持当前状态, 继续占用当前信道  $c_i$ , 此时,  $I_{\text{total}}$  的增量为

$$\Delta I_{\text{total}}(N_i \sim c_i) = 0 \quad (15)$$

(2) 切换信道至  $c_h (N_i \rightarrow c_h)$ . 即不论信道  $c_h$  当前是否被其它 WSN 占用,  $N_i$  将工作信道切换至  $c_h$ . 这时,  $I_{\text{total}}$  的增量为

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{total}}(N_i \rightarrow c_h) &= \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_i) I'_{\text{out}}(N_i, c_h), \\ &\quad \mathbf{W}(N_i) I'_{\text{in}}(N_i, c_h), I'_{\text{in-}p}(N_i, c_h)]^T - \\ &\quad \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_i) I'_{\text{out}}(N_i, c_i), \\ &\quad \mathbf{W}(N_i) I'_{\text{in}}(N_i, c_i), I'_{\text{in-}p}(N_i, c_i)]^T \\ &= \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_i) (I'_{\text{out}}(N_i, c_h) - I'_{\text{out}}(N_i, c_i)), \\ &\quad \mathbf{W}(N_i) (I'_{\text{in}}(N_i, c_h) - I'_{\text{in}}(N_i, c_i)), \\ &\quad I'_{\text{in-}p}(N_i, c_h) - I'_{\text{in-}p}(N_i, c_i)]^T \end{aligned} \quad (16)$$

其中  $\mathbf{B}$  为  $[\beta, 1-\beta, 1-\beta]$ .

(3) 抢占  $N_j$  的信道 ( $N_i \leftrightarrow N_j$ ): 在许多情况下, 低优先级 WSN ( $N_j$ ) 会占用干扰较小的信道. 此时,  $N_i$  需要抢占  $N_j$  的信道, 首先进入  $N_j$  所在信道  $c_j$ , 并通知  $N_j$  其信道被抢占, 迫使  $N_j$  退出信道  $c_j$  而进入  $N_i$  的旧信道  $c_i$ . 该操作引起的  $I_{\text{total}}$  的增量为

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{total}}(N_i \leftrightarrow N_j) &= \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_j) I'_{\text{out}}(N_j, c_i), \\ &\quad \mathbf{W}(N_j) I'_{\text{in}}(N_j, c_i), I'_{\text{in-}p}(N_j, c_i)]^T - \\ &\quad \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_j) I'_{\text{out}}(N_j, c_j), \\ &\quad \mathbf{W}(N_j) I'_{\text{in}}(N_j, c_j), I'_{\text{in-}p}(N_j, c_j)]^T + \\ &\quad \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_i) I'_{\text{out}}(N_i, c_j), \\ &\quad \mathbf{W}(N_i) (I'_{\text{in}}(N_i, c_j) - I'_{\text{in}}(N_i, N_j)), \\ &\quad I'_{\text{in-}p}(N_i, c_j) - \mathbf{W}(N_j) I'_{\text{in}}(N_j, N_i)]^T - \\ &\quad \mathbf{B} \cdot [\mathbf{W}(N_i) I'_{\text{out}}(N_i, c_i), \\ &\quad \mathbf{W}(N_i) I'_{\text{in}}(N_i, c_i), I'_{\text{in-}p}(N_i, c_i)]^T. \end{aligned}$$

虽然  $I'_{\text{out}}(N_j, c_i)$ ,  $I'_{\text{in}}(N_j, c_i)$ ,  $I'_{\text{in-}p}(N_j, c_i)$ ,  $I'_{\text{out}}(N_j, c_j)$ ,  $I'_{\text{in}}(N_j, c_j)$  及  $I'_{\text{in-}p}(N_j, c_j)$  都为未知量, 但因为  $N_i$  与  $N_j$  地理位置相近, 因此其内部干扰值和外部干扰值也接近, 故可以用  $I'_{\text{out}}(N_i, c_i)$ ,  $I'_{\text{in}}(N_i, c_i)$ ,  $I'_{\text{in-}p}(N_i, c_i)$ ,  $I'_{\text{out}}(N_i, c_j)$ ,  $I'_{\text{in}}(N_i, c_j)$  及  $I'_{\text{in-}p}(N_i, c_j)$  分别近似代替以上各未知量, 并用  $I'_{\text{in}}(N_i, N_j)$  代替  $I'_{\text{in}}(N_j, N_i)$ . 从而有

$$\begin{aligned} \Delta I_{\text{total}}(N_i \leftrightarrow N_j) &\approx (\mathbf{W}(N_j) - \mathbf{W}(N_i)) [\beta, 1-\beta] \cdot \\ &\quad [I'_{\text{out}}(N_i, c_i) - I'_{\text{out}}(N_i, c_j), \\ &\quad I'_{\text{in}}(N_i, c_i) - I'_{\text{in}}(N_i, c_j)]^T - \\ &\quad (1-\beta) [\mathbf{W}(N_i) + \mathbf{W}(N_j)] I'_{\text{in}}(N_i, N_j) \end{aligned} \quad (17)$$

$N_i$  的 Sink 根据采集到的本地信息计算各种操作所引起的  $\Delta I_{\text{total}}$ , 从而选择使得  $\Delta I_{\text{total}}$  最小的操作.

EasiCAP 的贪婪信道分配算法如算法 1 所示. 3 个 for 循环的复杂度分别为  $O(k \cdot M_{\text{node-max}})$ ,  $O(k)$  和  $O(M_{\text{wsn}})$ , 其中  $M_{\text{wsn}}$  为总网络数. 所以该信道分配算法的计算复杂度为  $O(k \cdot M_{\text{node-max}} + M_{\text{wsn}})$ .

### 算法 1. 贪婪信道分配算法.

输入:  $\beta, c_1, c_2, \dots, c_k, I'_{\text{out}}(N_i, c_i), I'_{\text{in}}(N_i, N_j), \mathbf{W}(N_i)$

输出: (新信道  $id$ , 被抢占信道的网络  $id$ )

// 根据式(11)、式(12)计算  $I'_{\text{in}}$  及  $I'_{\text{in-}p}$

1. for ( $h=1; h \leq k; h++$ ) {
  - calculate  $I'_{\text{in}}(N_i, c_h), I'_{\text{in-}p}(N_i, c_h)$ ;
  - } /\* for \*/

// 根据式(15)置保持信道的总干扰增量为 0
2.  $\Delta I_{\text{total}}(N_i \sim c_i) = 0$ ;
- // 置最小增量为保持信道的增量, 新信道为  $c_i$
3.  $\text{minDelta} = \Delta I_{\text{total}}(N_i \sim c_i)$ ;  $\text{minChnl} = c_i$ ;
- // 置被抢占信道的网络  $id$  的初始值为 -1
4.  $\text{swapWsnId} = -1$ ;
- // 计算并比较切换信道的总干扰增量
5. for ( $h=1; h \leq k; h++$ ) {
  - if ( $c_h == c_i$ ) continue; // 开始下一轮循环
  - // 根据式(16)计算切换信道的总干扰增量
  - calculate  $\Delta I_{\text{total}}(N_i \rightarrow c_h)$ ;
  - // 更新最小增量及新信道
  - if ( $\text{minDelta} > \Delta I_{\text{total}}(N_i \rightarrow c_h)$ ) {
     $\text{minDelta} = \Delta I_{\text{total}}(N_i \rightarrow c_h)$ ;
  - $\text{minChnl} = c_h$ ;
  - } /\* if \*/
  - } /\* for \*/
  - // 计算并比较抢占信道的总干扰增量
6. for ( $j=1; j \leq M_{\text{wsn}}; j++$ ) {
  - // 根据式(17)计算抢占信道的总干扰增量, 其中
  - //  $N_j (j=1, 2, \dots, M_{\text{wsn}})$  为所有检测到的邻居网络
  - calculate  $\Delta I_{\text{total}}(N_i \leftrightarrow N_j)$ ;
  - // 更新最小增量、新信道及被抢占信道的网络  $id$
  - if ( $\text{minDelta} > \Delta I_{\text{total}}(N_i \leftrightarrow N_j)$ ) {
     $\text{minDelta} = \Delta I_{\text{total}}(N_i \leftrightarrow N_j)$ ;
  - $\text{minChnl} = c_j$ ;
  - $\text{swapWsnId} = j$ ;
  - } /\* if \*/
  - } /\* for \*/
  - // 返回新信道  $id$  及被抢占信道的网络  $id$
7. return ( $\text{minChnl}, \text{swapWsnId}$ ).

如果算法返回的信道  $\text{minChnl}$  与当前工作信道不同, 则从 Sink 开始, 逐层通知下级子节点切换到信道  $\text{minChnl}$ . 若  $\text{swapWsnId}$  不是一, 则切换信道后由 Beacon 消息携带  $\text{swapWsnId}$  及  $c_i$ , 通知编号为  $\text{swapWsnId}$  的 WSN 切换到信道  $c_i$ . 在干扰非常严重的情况下, 少量节点可能会因为无法收到 Sink 的检测启动消息或信道切换消息而变成孤立节点, 因此, EasiCAP 包含一个信道重发现算法让孤立节点搜索 WSN 中其它节点所在信道. 因篇幅有限, 本文省略该算法的具体说明.

## 5 性能评价

本文首先通过一定规模的实验床来验证 EasiCAP 的有效性,并与现有方法进行性能比较.然后,借助仿真实验测试 EasiCAP 在大规模网络中的性能.

### 5.1 实验床评价

本小节通过实验床验证 EasiCAP 的性能.实验地点为作者所在科研楼 7 层.为减少实验环境中已有 Wifi 设备对实验的影响,所有实验都在非工作时间内完成.实验床的部署环境及拓扑结构如图 9 所示,实验床由 16 个传感器节点组成 4 个 WSN,分别为 WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4,每个 WSN 包含 4 个节点.每个节点为作者所在实验室自主开发的 EZ240 节点,配有 CC2420 射频模块,运行 Tinyos 2.1 操作系统.其中,10 号、20 号、30 号和 40 号节点分别为各 WSN 的 Sink.节点之间的最短和最长距离分别约为 1 m 及 6 m.为便于评价,将 WSN 的可用工作信道限制在 802.15.4 的信道 19~24. Wifi 的信道 9 和信道 11 分别与 802.15.4 的信道 19~22 和信道 21~24 重合.因而,选择分别工作在 Wifi 的信道 9 和信道 11 的两对笔记本电脑 9T、9R 和 11T、11R 作为 Wifi 干扰源.由 9T 和 11T 分别直接发送 UDP 数据包给 9R 和 11R. WSN 的主要实验参数如表 1 如示.其中,设置  $\beta$  为 0.5,该值是根据当前实验床的节点密度而设置.

表 1 实验参数

参数	值	参数	值
信道	19~24	$\Delta A$	0.05
发射功率	0 dBm	$K$	4
包长度	100 bytes	$\beta$	0.5
$\Delta P$	2 dBm	$PRR_{thr}$	20%

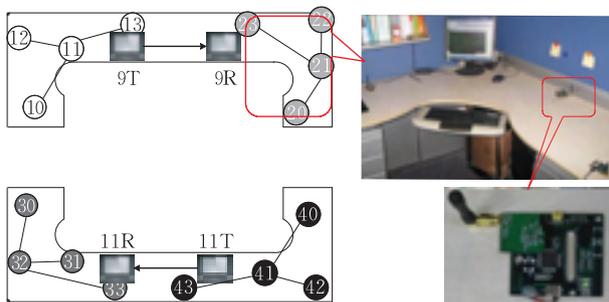


图 9 实验测试床及其拓扑结构

实验床实验主要在包接收率、吞吐量及通信和存储开销等几个方面评价 EasiCAP 的性能,并与使用广泛的固定信道分配 (FixChnl) 机制和目前性能

最好的跳频机制 ARCH<sup>[11]</sup> 进行性能比较.各种机制下,WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4 启动后的初始信道分别为 21~24.

#### 5.1.1 包接收率的分析

为评价不同机制下各 WSN 的包接收率,将 WSN1、WSN2、WSN3 和 WSN4 的优先级分别设置为 1、2、3 和 4,各传感器节点每秒产生 5 个数据包并以多跳方式转发给 Sink. 9T 和 11T 分别交替以 0.8 Mbps 及 1.5 Mbps 的速率发送数据,即一段时间内,9T 和 11T 分别以 0.8 Mbps 和 1.5 Mbps 的速率发送数据包,持续 12 min 后,9T 和 11T 对调发送速率.以滑动平均的方式计算包接收率,并统计各 WSN 内所有节点的包接收率均值.

图 10(a)~(c)分别给出了一段时间内 EasiCAP、FixChnl 和 ARCH 机制下各 WSN 的包接收率时序图.从图 10(a)可看出,EasiCAP 机制下各 WSN 的包接收率与其优先级相一致,即优先级越高的 WSN

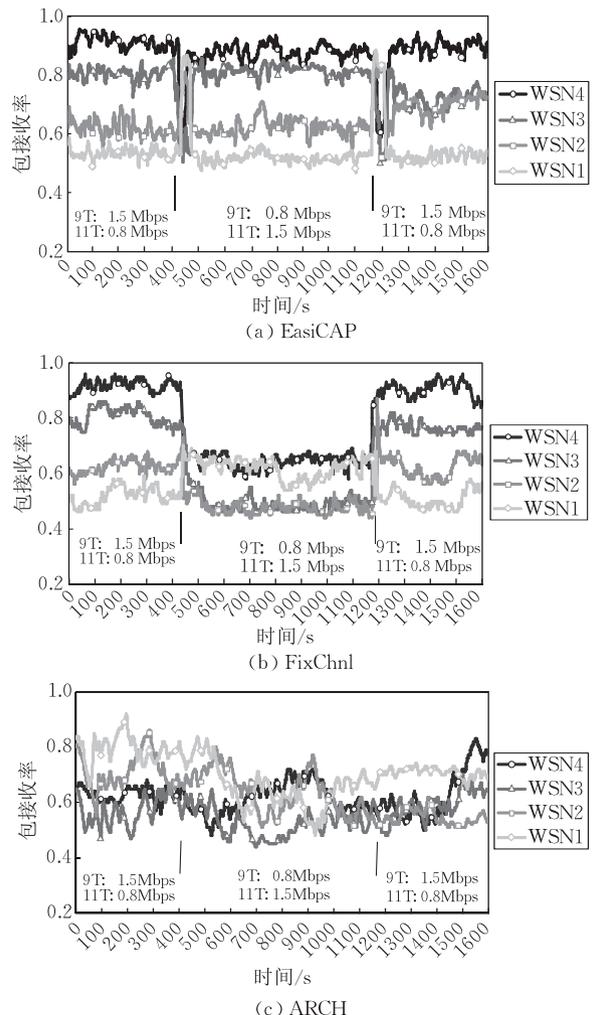


图 10 采用不同机制时的包接收率时序图 (WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4 的优先级分别为 1、2、3、4)

所获得包接收率也越高. 9T 及 11T 在 400 s 及 1200 s 左右对调发送速率, 引起了信道切换, 可以看出信道切换后, 优先级更高的 WSN 仍具有更高的包接收率. 在第一次速率对调前, 9T 和 11T 的速率分别为 1.5 Mbps 及 0.8 Mbps, WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4 工作信道分别为 20、19、23 和 24. 对调之后, WSN4 和 WSN3 分别抢占了 WSN2 和 WSN1 的信道, 4 个 WSN 的工作信道分别变成 23、24、20 和 19. 同样, 第二次速率对调之后, 引起类似的信道抢占. 但在此之后, WSN2 进入 WSN3 的工作信道 23, 并与 WSN3 共享信道 23.

如图 10(b)所示, 在 FixChnl 机制下, 在第一次速率对调之后, 11T 速率切换为 1.5 Mbps, WSN3 及 WSN4 的包接收率迅速下降, 并且 WSN3 的包接收率反而低于 WSN1. 可见, 在 Wifi 干扰比较严重的环境中, 固定信道分配难以适应 Wifi 干扰的变化, 从而无法适用于对通信可靠性要求较高的应用, 如病症监测、火灾预警等.

图 10(c)给出了 ARCH 机制下各 WSN 的包接收率. 可见各 WSN 的包接收率较为接近, 这是因为 ARCH 机制下各节点以随机方式选择工作信道, 无法保证新信道的通信质量比原有信道更好. 因此, 部分节点工作在干扰较小的信道, 而部分节点会工作在干扰较大的信道. 此外, 由于每次数据发送都需要切换信道, 产生了一定的时间开销.

图 11 统计了 3 小时内不同机制下各 WSN 的平均包接收率. 如图所示, EasiCAP 机制下各 WSN 的平均包接收率大小顺序与其优先级顺序一致. 这说明 EasiCAP 可为各 WSN 提供与其优先级相对应的通信质量. 然而, FixChnl 和 ARCH 机制均无此功能. 此外, FixChnl、ARCH 和 EasiCAP 机制下 4 个 WSN 总的平均包接收率分别为 0.59、0.64 和 0.68, EasiCAP 分别比 FixChnl 和 ARCH 高 15.3% 和 6.3%.

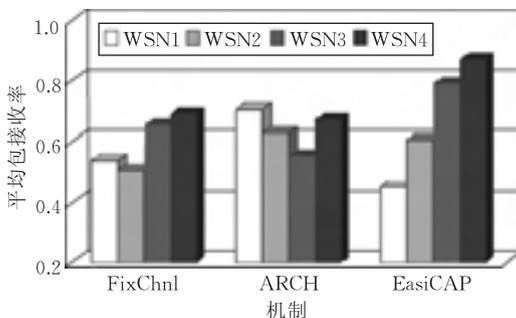


图 11 采用不同机制的平均包接收率

以上结果说明: EasiCAP 可为各 WSN 提供与其优先级相对应的通信可靠性, 并提高了各 WSN

的平均通信可靠性.

### 5.1.2 吞吐量的分析

除包接收率外, 吞吐量也是衡量通信质量的另一重要指标. 本小节着重分析 Wifi 干扰大小和 WSN 优先级对吞吐量的影响. 这里的吞吐量是指端到端吞吐量, 即单位时间内 Sink 收到各传感节点的平均数据量.

为检验 Wifi 干扰大小对吞吐量的影响, 使 9T 和 11T 交替两种速率发送数据包, 一种速率为 0.8 Mbps, 另一速率为以下之一: 0.5 Mbps、0.8 Mbps、1 Mbps、1.5 Mbps、2 Mbps 及 2.5 Mbps. WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4 的优先级仍分别为 1、2、3 和 4. 图 12 给出了环境中存在不同速率的 Wifi 干扰时, 各 WSN 采用 EasiCAP 机制可以获得的吞吐量. 从图 12 可以看出随着 Wifi 干扰通信量的增加, 各 WSN 的吞吐量逐渐减小, 但各 WSN 的吞吐量仍与其优先级相对应, 即优先级越高的 WSN 吞吐量越高. 图 13 给出采用不同机制时所有 WSN 的平均吞吐量. 由图可知, 三种机制下, 平均吞吐量均随 Wifi 通信量的增加而减少. 但在不同 Wifi 通信量下, EasiCAP 所得平均吞吐量均高于 FixChnl 机制及 ARCH 机制, 且 EasiCAP 的优势随着 Wifi 通信量的增加而增加. 例如, 当 Wifi 的通信量为 2.5 Mbps 时, EasiCAP 的平均吞吐量分别比 FixChnl 和 ARCH 的平均吞吐量高 18.06% 和 29.77%. 这主

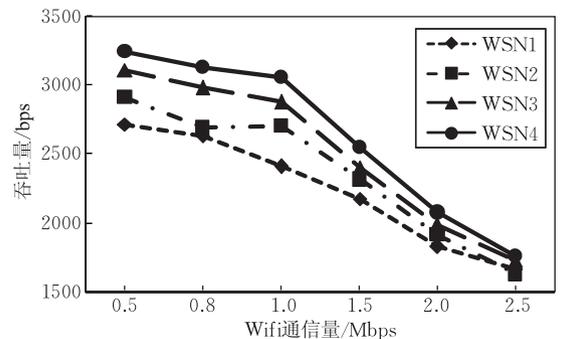


图 12 不同 Wifi 干扰下的吞吐量

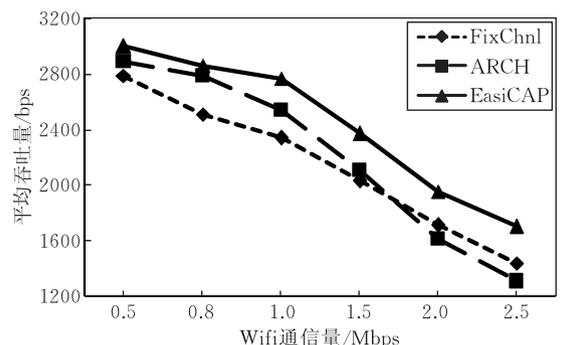


图 13 采用不同机制时的平均吞吐量

要是因为在干扰较大时, EasiCAP 允许多个 WSN 占用同一通信质量较好的信道. 虽然 ARCH 也可以使不同 WSN 的节点共享通信质量较好的信道, 但处在干扰较大的信道中的节点由于信道失同步而容易导致 WSN 短时间不连通.

此外, 为测试优先级对吞吐量的影响, 交替两种发送速率, 即 1.5 Mbps 及 0.8 Mbps, 并设置 WSN1、WSN2、WSN3 及 WSN4 的优先级分别为 1111、1112、1123 及 1234. 图 14 给出了在各种优先级设置下的吞吐量的统计值. 可以看出, 无论在哪种优先级设置下, EasiCAP 都可以使优先级高的 WSN 获得更高的吞吐量.

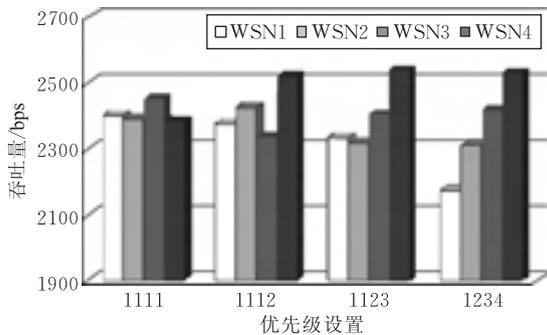


图 14 不同优先级设置下的吞吐量

因而, 可以得出结论: EasiCAP 可为 WSN 提供与其优先级相对应的吞吐量, 并显著提高了所有 WSN 总的平均吞吐量.

### 5.1.3 通信及存储开销的分析

EasiCAP 在进行信道分配时会带来少量的通信开销和存储空间开销.

采用与 5.1 节相同的方法, 统计平均每次 Wifi 速率变换引起单个 WSN 发送的平均控制包总数. EasiCAP 的控制消息包括检测启动消息、信道扫描时主动发送及响应的 Beacon 消息以及信道状态反馈消息. FixChnl、ARCH 和 EasiCAP 的平均控制包数目分别为 0、15.25 和 87.72. 可见, EasiCAP 比另外两种机制需要更多的控制开销. 但统计发现, 在真实的 Wifi 干扰环境中, WSN 每天所需切换信道次数不会很多. 所以, EasiCAP 的通信开销并不大.

图 15 给出了各机制的编程实现所占的 ROM 和 RAM 的空间大小. Tinyos 工具链显示, EasiCAP 的传感节点部分所占 ROM 空间比 FixChnl 和 ARCH 仅分别增加了 1110 bytes 和 450 bytes, 所占 RAM 空间比 FixChnl 和 ARCH 分别增加了 1530 bytes 和 736 bytes. Sink 所占 ROM 比传感节点多 2670 bytes, 但 Sink 通常具有更多的存储资源.

目前常用的 Telosb 节点具有 16 KB RAM 和 256 KB Flash ROM, Imote2 节点具有 256 KB RAM 和 32 MB Flash ROM. 因此, EasiCAP 未带来过大的存储开销.

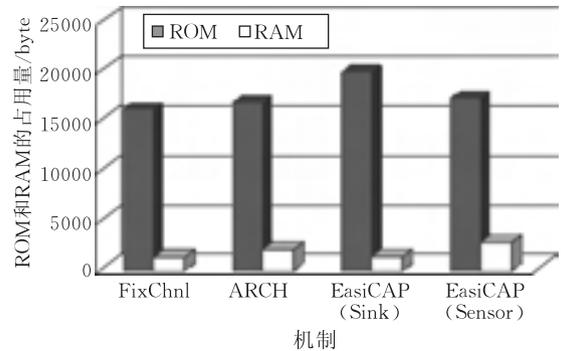


图 15 不同机制所占 ROM 和 RAM 的大小

## 5.2 仿真评价

本小节使用 ns-2.33 仿真平台, 从包接收率、吞吐量、通信开销及收敛时间等几个方面对大规模网络中 EasiCAP 的性能进行评价和分析.

网络仿真场景为一个  $50\text{m} \times 200\text{m}$  的长方形区域. 沿其长边方向的中心线等距离部署 8 个 Wifi AP, 另在每个 AP 周围随机分布 1 个 Wifi Client, 分别与一个 AP 通信. 8 对 Wifi 设备的工作信道分别为 8、9、10、11、8、9、10、11, 这些信道的频率与 WSN 的 18~24 信道的频率重叠. 8、9 信道的 Wifi 设备和 10、11 信道的 Wifi 设备交替以 1 Mbps 和 2 Mbps 的速率发送数据, 每隔 400 s 交换发送速率. 根据节点密度的不同, 设置不同的参数  $\beta$ : 网络规模低于 30 个节点,  $\beta$  为 0.5; 网络规模为 40~60 个节点,  $\beta$  为 0.45; 网络规模高于 70 个节点,  $\beta$  为 0.4. 除  $\beta$  之外的其它参数, 如表 1 和表 2 所示.

表 2 仿真实验参数

参数	值
Wifi 的通信模式	下行 UDP 数据流
Wifi 的发射功率	15 dBm
传感节点的数量	50~400
传感节点的分布	随机均匀分布
Sink 的位置	随机选择
传感节点的工作信道	18~24
传感节点的发送速率	5 packets/s
信号传播模型	Two-ray Ground Reflection

### 5.2.1 包接收率及吞吐量分析

为了分析大规模网络中 EasiCAP 机制的包接收率和吞吐量, 部署 5 个 WSN: WSN1、WSN2、WSN3、WSN4、WSN5, 它们的优先级分别为 1、2、3、4、5. 各传感节点每秒产生 5 个数据包, 并以多跳

方式传送给 Sink. 在每组实验中, 将 WSN 的网络规模分别设置为 10~70 个节点. 对于每级网络规模, 随机生成 10 个连通网络拓扑, 然后运行 3 种机制的实现各 2000 s. 最后将 10 次仿真实验结果的算术平均值作为各 WSN 的包接收率和吞吐量.

图 16 给出了采用 EasiCAP 机制时不同网络规模下的包接收率. 由图可知, 优先级高的网络具有更高的包接收率. 这表明, 对于大规模网络, EasiCAP 仍可为各个网络提供与其优先级相对应的包接收率, 从而保障相应的通信可靠性. 另外, 也可以看出, 随着网络规模的增大, 各个网络的包接收率总体呈递减趋势.

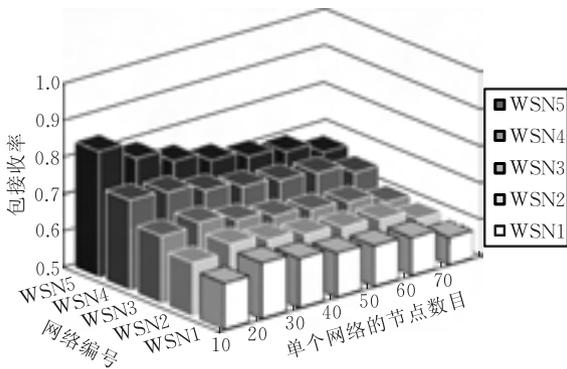


图 16 采用 EasiCAP 机制的包接收率

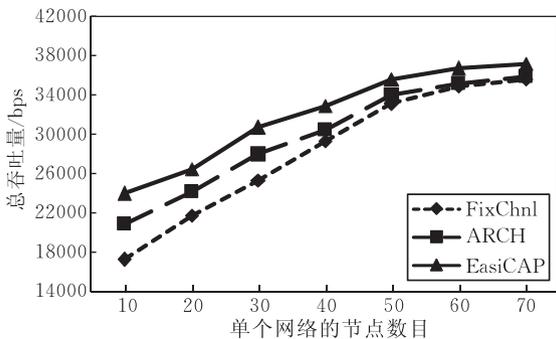


图 17 不同网络规模下单个网络的总吞吐量

图 17 比较了 FixChnl、ARCH 和 EasiCAP 机制在不同网络规模下单个网络的总吞吐量, 即每个 Sink 在单位时间内收到的总数据量. 如图所示, EasiCAP 机制下的总吞吐量高于现有的 FixChnl 和 ARCH 机制. 但是, 这种优势随着网络规模的增大而逐渐缩小, 主要原因是节点密度增加之后, 同一网络内各节点之间相互干扰越来越严重, 从而越来越多的数据包由于网络内的发送冲突而丢失. 因而, 此时可以将网络划分成多个子网络, 各自独立选择信道以提高总吞吐量.

### 5.2.2 通信开销分析

采用与前面相同的实验方法分析大规模网络中

EasiCAP 和 ARCH 的通信开销. 表 3 统计了每次 Wifi 信道变化时, 单个网络产生的平均控制包的数目. 表中的  $a \times b$  表示总共有  $a$  个网络且每个网络含  $b$  个节点. 可以看出, EasiCAP 比 ARCH 产生了更多的控制开销. 但如前所述, 在真实 Wifi 干扰环境中, WSN 每天所需的信道变换次数不会很多, 因而产生的控制开销并不会很大.

表 3 控制包数目

机制	单个 WSN 的控制包数目			
	5×20	5×40	5×60	5×80
ARCH	88	193	247	395
EasiCAP	480	1127	1505	2354

### 5.2.3 收敛性分析

当信道质量改变时, EasiCAP 机制的信道分配算法会使各个网络产生一系列的信道切换和信道抢占操作, 分配过程的收敛时间会对各个网络的性能产生一定的影响. 因而, 收敛时间也是衡量抗 Wifi 干扰的信道分配机制的一个重要指标. 为评价 EasiCAP 的收敛性能, 分别部署 4 个和 8 个 WSN, 每个 WSN 含 25 个节点. 对于 2 种场景, 分别随机生成 10 个连通网络拓扑, 并运行 EasiCAP 的实现 2000 s. 然后, 将 Wifi 速率切换后的时间以每 5 s 为一个单位切分成多个小时隙, 统计各小时隙内信道改变次数的均值.

图 18 给出了 40 次 Wifi 速率切换引起的信道改变次数的算术均值. 可以看出, 各网络在 Wifi 速率切换后约 10 s 启动了信道分配过程. 在 4 个 WSN 的实验场景中, EasiCAP 的信道分配机制在经历约 75 s 的信道变换过程后, 便达到收敛, 进入稳定状态. 达到收敛状态所需的信道改变总次数的均值为 6.1, 最小值为 3, 最大值为 10. 而对于 8 个 WSN 的实验组, 收敛时间约为 85 s, 信道改变总次数均值为 9.05, 最小值为 6, 最大值为 14. 以上结果表明: EasiCAP 的信道分配过程具有良好的收敛性能, 而且网络数目的增加不会使收敛时间大幅度增加.

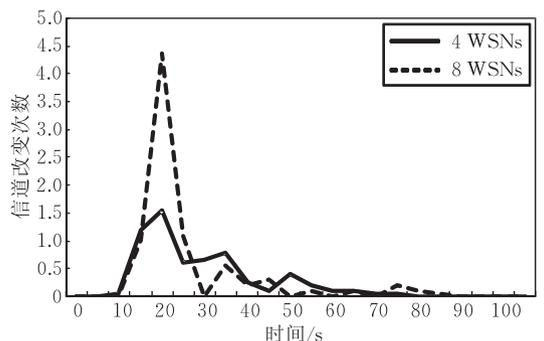


图 18 两种网络规模下的收敛时间

## 6 结 论

针对 Wifi 干扰下的带优先级 WSN 的信道分配问题,本文提出了一种信道分配机制 EasiCAP. 该机制首先通过受控 Wifi 干扰源建立外部干扰特征,该特征由干扰强度和活跃比率组成;然后基于干扰特征建立外部干扰模型 EIM,用于计算外部干扰指数以度量 WSN 在各信道上所受的 Wifi 干扰大小;此外,采用以接收端为中心的模型 IIM,评价各 WSN 之间的内部干扰;最后,综合 EIM 和 IIM 产生的干扰评价指标,各 WSN 以此指标为依据,采用贪婪算法独立、实时地选择信道并进行相应操作(保持、切换和抢占),以实现按优先级分配信道,并兼顾所有 WSN 的整体通信质量的目标. 通过实验床测试和仿真实验验证了该机制的有效性. 结果表明:(1) EasiCAP 可为各 WSN 提供与其优先级相对应的通信可靠性和吞吐量;(2)与最近提出的 ARCH 机制<sup>[11]</sup>相比,EasiCAP 也具有更高的平均通信可靠性及吞吐量,在 Wifi 干扰较大时,可将平均吞吐量提高 29.77%;(3) EasiCAP 的信道分配过程具有良好的收敛性;(4) EasiCAP 也未带来过大的通信和存储开销.

EasiCAP 开销小且易于实现,因而具有较强的实用性,适用于在多个静态传感器网络共同部署的室内环境中,如智能家居、智能楼宇等. 对于移动传感器网络,因各信道的内部干扰和外部干扰变化较快,EasiCAP 难以保证干扰度量的准确性,因而并不适用. 本文的下一步工作是将信道分配与编码和信道访问控制技术结合起来,进一步改进该机制,以满足移动传感器网络的需求,尤其是解决多个穿戴式医疗传感器网络<sup>[17]</sup>在 Wifi 干扰下的信道分配问题.

## 参 考 文 献

- [1] Cui Li, Ju Hai-Ling, Miao Yong, Li Tian-Pu, Liu Wei, Zhao Ze. Overview of wireless sensor networks. *Journal of Computer Research and Development*, 2005, 42(1): 163-174 (in Chinese)  
(崔莉, 鞠海玲, 苗勇, 李天璞, 刘巍, 赵泽. 无线传感器网络研究进展. *计算机研究与发展*, 2005, 42(1): 163-174)
- [2] Lu J, Sookoor T, Srinivasan V, Gao G, Holben B, Stankovic J, Field E, Whitehouse K. The smart thermostat: Using occupancy sensors to save energy in homes//Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Zurich, Switzerland, 2010: 212-224
- [3] Liang C J M, Liu J, Luo L, Terzis A, Zhao F. RACNet: A high-fidelity data center sensing network//Proceedings of the 7th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys). Berkeley, USA, 2009: 15-28
- [4] Lim Y, Lim S, Choi J, Cho S, Kim C, Lee Y. Fire detection and rescue support framework with wireless sensor networks//Proceedings of the 10th International Conference on Convergence Information Technology. Dhaka, Bangladesh, 2007: 135-138
- [5] Sikora A, Groza V F. Coexistence of IEEE802.15.4 with other systems in the 2.4GHz-ISM-Band//Proceedings of the IEEE Instrumentation & Measurement Technology Conference. Ottawa, Canada, 2005: 1786-1791
- [6] Yi P, Iwayemi A, Zhou C. Developing ZigBee deployment guideline under WiFi interference for smart grid applications. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2011, 2(1): 98-108
- [7] Liang C, Priyantha N B, Liu J, Terzis A. Surviving Wi-Fi interference in low power ZigBee networks//Proceedings of the 8th ACM Conference on Embedded Network Sensor Systems (SenSys). New York, USA, 2010: 309-322
- [8] Zhang X, Shin K G. Enabling coexistence of heterogeneous wireless systems: Case for ZigBee and WiFi//Proceedings of the 12th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). New York, USA, 2011
- [9] Huang J, Xing G, Zhou G, Zhou R. Beyond co-existence: Exploiting WiFi white space for ZigBee performance assurance//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). Kyoto, Japan, 2010: 305-314
- [10] Musaloiu E-R, Terzis A. Minimizing the effect of WiFi interference in 802.15.4 wireless sensor networks. *International Journal of Sensor Networks*, 2008, 3(1): 43-54
- [11] Sha M, Hackmann G, Lu C. ARCH: Practical channel hopping for reliable home-area sensor networks//Proceedings of the 17th Real-Time and Embedded Technology and Applications Symposium (RTAS). Chicago, USA, 2011: 305-315
- [12] Wu Y, Stankovic J, He T, Lin S. Realistic and efficient multi-channel communications in wireless sensor networks//Proceedings of the 27th IEEE Conference on Computer Communications (INFOCOM). Phoenix, USA, 2008: 1193-1201
- [13] Liu S, Xing G, Zhang H, Wang J, Huang J, Sha M, Huang L. Passive interference measurement in wireless sensor networks//Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). Kyoto, Japan, 2010: 52-61
- [14] Shin S Y, Choi S, Park H S, Kwon W H. Packet error rate analysis of IEEE 802.15.4 under IEEE 802.11b interference//Proceedings of the 3rd International Conference on Wired/Wireless Internet Communications. Xanthi, Greece, 2005: 279-288

- [15] Burkhart M, Rickenbach P V, Wattenhofer R, Zollinger A. Does topology control reduce interference? //Proceedings of the 5th ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing (MobiHoc). Tokyo, Japan, 2004: 9-19
- [16] Babiarz J, Chan K, Baker F. Configuration guidelines for DiffServ service classes. IETF RFC 4594, August, 2006

- [17] Gong Ji-Bing, Wang Rui, Cui Li. Research advances and challenges of body sensor network (BSN). Journal of Computer Research and Development, 2010, 47(5): 737-753(in Chinese)  
(宫继兵, 王睿, 崔莉. 体域网 BSN 的研究进展及面临的挑战. 计算机研究与发展, 2010, 47(5): 737-753)



**ZHANG Zhao-Liang**, born in 1982, Ph. D. candidate. His research interests include wireless sensor and ad-hoc networks, network security, and algorithm analysis.

**CHEN Hai-Ming**, born in 1981, Ph. D. , assistant professor. His research interests include protocol design and performance evaluation for wireless sensor networks and ad-

hoc networks.

**HUANG Ting-Pei**, born in 1980, Ph. D. candidate. Her research interests include wireless sensor networks, ad-hoc networks and Internet of Things.

**CUI Li**, born in 1962, Ph. D. , professor, Ph. D. supervisor. Her research interests are focused on sensor technology, wireless sensor networks and Internet of Things.

**ZHAO Ze**, born in 1978, Ph. D. candidate, assistant professor. His research interests include wireless sensor networks and wireless communication.

## Background

Recent years have witnessed a proliferation of wireless sensor networks (WSN) in a wide range of areas. The physical layer of WSN is compliant to the IEEE 802.15.4 standard. Thus, when WSNs are deployed in indoor settings, they have to compete for the unlicensed 2.4 GHz ISM band with the widely deployed wireless local area networks (Wifi) which are compliant to the IEEE 802.11 standard. Such co-existence of WSN and Wifi results in cross-technology interference, leading to a severe loss of reliability and throughput of WSN. Therefore, mitigation of Wifi interference on WSN is a critical issue for wide adoption of indoor WSN, and becomes a hot topic currently. On this topic, channel assignment for WSN is a fundamental problem.

However, as far as we know, existing studies do not consider the problem of channel assignment for multiple WSNs with different priority interfered by co-located Wifi. This problem is unavoidable when multiple WSNs are deployed in the same building, since these WSNs have to share channels which have different channel quality due to Wifi interference.

The main contribution of this paper is the analysis of

Wifi interference with WSN through extensive experimental measurements. Then, based on the analysis, we present an external interference model to measure Wifi interference; also, we introduce an internal interference model to measure interference between WSNs. In addition, we propose a greedy channel allocation algorithm to assign channels for WSNs in order to provide differentiated communication reliability and throughput according to their priority and preserve overall communication reliability and throughput.

The team of the authors of this paper has conducted researches in the direction of interference issues in WSN from 2006. The team has finished some creative works on interference of timeliness obstacles, interference-aware link quality measurement, interference-aware topology control, and also published several papers in this direction. This work is supported by the National Basic Research Program of China (973 program) under Grant No. 2011CB302803, the National Natural Science Foundation of China under Grant No. 61100180, the National S&T Major Project of China under Grant No. 2010ZX03006-003-02.