

无线多媒体传感器网络中的动态频谱分配技术研究

刘 航 孔祥维 刘桂林

(大连理工大学信息与通信工程学院 大连 116023)

摘 要: 无线多媒体传感器网络(WMSNs)具有实时监控, 收集和处理多媒体信息的功能, 有广泛的应用前景。较之传统无线传感器网络, WMSNs 无线传输多媒体信息需要更大带宽。然而, 随着无线通信设备的广泛应用, 有限的可用频谱资源日益匮乏。利用动态频谱分配技术, 可以扩展 WMSNs 的通信频段, 增强抗干扰能力。考虑到 WMSNs 节点的物理限制, 如计算能力和能量供应, 该文提出了适合 WMSNs 的频谱感知方法和频谱管理方法。频谱感知采用各节点的轮换机制感知整个频段; 频谱管理可以确保对授权用户影响最小的信道被首先使用。WMSNs 使用上述方法可以感知周围无线电环境, 利用空闲私有频段进行无线通信。最后, 通过实验证明了该文提出的动态频谱分配技术对 WMSNs 的有效性。

关键词: 无线传感器网络; 无线多媒体传感器; 频谱感知; 动态频率分配; 认知无线电

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2010)09-2039-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2009.01271

Studies on Dynamic Spectrum Allocation in Wireless Multimedia Sensor Networks

Liu Hang Kong Xiang-wei Liu Gui-lin

(Department of Electronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: Wireless Multimedia Sensor Networks (WMSNs) can real-time monitor, collect and process multimedia information. They have wide applications. Compared to other traditional sensor networks, WMSNs need more bandwidth to transmit multimedia information. However, the limited radio frequency spectrum appears more and more precious as the wireless communication devices are gaining momentum. Dynamic spectrum allocation can extend the spectrum used by wireless multimedia sensor networks and eliminate the interferences. In this paper, a novel method for spectrum sensing and management is proposed. So that WMSNs which are limited by energy and computation ability can sense spectrum environment via periodical rotation and communicate by available spare spectrum. Finally, the validity of proposed methods are proved by the experiment.

Key words: Wireless Sensor Networks (WSNs); Wireless multimedia sensor; Spectrum sensing; Dynamic frequency allocation; Cognitive Radio (CR)

1 引言

无线传感器网络(WSNs)是当前国际上备受关注的研究领域。该领域综合了传感器、嵌入式计算、无线网络通信以及分布式信息处理等相关技术。WSNs 由大量具有通信与处理能力的微小传感器节点密集布设在无人值守的监控区域。这些节点可以实时监测、感知和采集各种环境或监测对象的信息, 经嵌入式系统对信息进行处理后, 通过随机自组织无线通信网络以多跳中继方式将信息传送到终端用户。无线多媒体传感器网络(WMSNs)^[1]是在传统 WSNs 的基础上发展起来的新型传感器网络。与 WSNs 相比, WMSNs 的节点增添了 CMOS 摄像头、微型麦克风和处理能力更强的处理器, 因此具有了

音频、视频、图像等多媒体信息的感知功能。WMSNs 将 WSNs 的自组织、多跳路由、无人值守等优点和多媒体内容丰富等优势相结合, 提供了更加便捷、直观的监测方法。具有比传统无线传感器提供更多精确信息和多方面监测等优点, 在军事侦察、环境信息检测、农业生产、医疗健康监护、建筑与家居、工业生产控制以及商业等领域有着广阔的应用前景。然而, 在能耗分布、QoS 要求和通信协议等方面提出了新的挑战。特别是在无线通信方面, WMSNs 需要实时传输音视频等多媒体数据, 短时间内需要传输大量数据, 带宽要求比 WSNs 多得多, 节点通信能力由 kbps 增至 Mbps, 存储能力由 kB 到 MB 级。

在静态频谱管理办法中, 由于未对 WSNs(包括 WMSNs)的无线通信分配固定频段, 因此, WSNs 只能使用公用频段。如目前的一些主流节点大多选

择 868 MHz, 916 MHz 或 2.4 GHz 频段。而在这些频段还充实着其它无线通信系统。例如目前至少有 3 种无线通信协议采用 2.4 GHz ISM 频段, 分别是 IEEE 802.11b/g, IEEE 802.15.4 和蓝牙。其中, 用于 WSNs 的 IEEE 802.15.4 协议的传输能量最低, 通信范围最小, 因此最容易受到其它通信系统和噪声的干扰。根据 Musáloiu-E^[2]等人的研究, 在采用 802.15.4 的 WSN 周围如果存在 802.11 通信, WSN 的丢包率为 3%~58%。因此, WSN 必须消耗更多的能量进行数据包的重发。除此之外, 随着 WSNs 的广泛应用, 同一区域出现两个或更多无线传感器网络的几率日益增加。这样, 使用相同频带的 WSNs 以及使用这些公用频带的其它无线通信设备之间, 必然会产生相互干扰, 影响各自的系统性能。而且, 由于 WMSN_s 所需带宽更多, 传输时间更长, 因此在公共频段遇到传输冲突的概率更大。

为了提高无线频谱资源的使用效率, 合理有效地利用已经分配给现有无线系统的, 但又存在不同程度闲置的频谱资源, 满足人们日益增长的无线接入的需求, 认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)被公认为是当前最有前途的解决方法之一。CR 一经 Mitola III^[3]提出便引起了广泛的关注。CR 可以有效解决频谱资源日益匮乏的问题, 能够感知周围无线电环境, 合理利用闲置频谱, 实现动态的频谱共享, 以达到提高频谱利用率的目的。

本文针对 WMSN_s 的无线通信存在的无线资源和传输冲突等通信问题, 利用 CR 技术解决 WMSN_s 与其它无线设备的共存问题。本文在第 2 节介绍和分析 WMSN_s 现有的 MAC 协议; 第 3 节详细阐述本文提出的具有 CR 功能的 WMSN_s 的实现方法, 包括频谱感知和频谱管理方法。第 4 节对上述 WMSN_s 的频谱感知和抗干扰能力进行了测试。最后是结束语。

2 现有 MAC 协议

媒体介质访问控制(MAC)协议的主要功能是对无线通信节点分配有限的无线信道资源, 是影响到无线网络性能的主要技术。目前, 对 WMSN_s 的研究大多采用了 WSNs 的 MAC 协议, 其主要分为 3 类: 基于竞争的、无竞争的和混合的 MAC 协议^[4,5], 他们各自对 WMSN_s 的特点分述如下。

基于竞争的 MAC 协议(如 S-MAC^[6])的基本思想是当节点需要发送数据时, 通过竞争方式使用无线信道, 如果发送的数据产生了碰撞, 就按照某种策略重发数据, 直到数据发送成功或放弃发送。该类 MAC 通过减少或避免碰撞重传、串音以及空闲侦听, 以节约能量, 增加节点寿命。然而, 该类 MAC

协议增加了延迟和降低了无线传输的吞吐量, 无法满足 WMSN_s 较高的实时性要求及传输大量数据。

无竞争方式的 MAC 协议又分为单信道和多信道协议。单信道协议(如基于 TDMA 机制的 MAC 协议^[7])的基本思想是为每对节点分配互不干扰的信道实现消息的传输, 从而避免了共享信道的碰撞。早期的 MICA2 和 MICAz 节点采用单信道 MAC 协议, 传输速率分别为 38.4 kbps 和 250 kbps, 很难满足多媒体业务的传输。而多信道协议可以有效提高现有带宽的利用率, 通过空间重叠的方式, 使现有的带宽能有效地利用满足多媒体业务的传输的需要。虽然无竞争的多信道 MAC 协议理论上可以满足 WMSN_s 的要求, 但是, 根据上文所述, 随着公用频带(包括 ISM)的日益匮乏, 无法保证 WMSN_s 在该频段获得足够多个稳定的信道。

混合协议包含基于竞争协议和无竞争协议的设计要素, 目的是将二者取长补短, 以便设计出更加高效节能得 MAC 协议。

目前大多数 MAC 协议均是在使用固定的几个公用频带的前提下发展起来的, 然而, 随着公用频带资源日益匮乏, 这些协议的性能将大打折扣。这个问题有多种解决途径, 其中之一是对这些 MAC 进行改进, 使其能够动态地利用空闲的私有频带进行无线通信, 即具有 CR 能力。为了达到上述目的, WMSN 节点在 MAC 层的前端必须具备两种能力, 即感知无线环境能力和频谱管理能力。下一节提出了这两个能力的实现方法。

3 具有 CR 功能的 WMSN_s

为了使 WMSN_s 可以感知周围无线电环境, 具有合理的分配和利用闲置频谱的能力, 实现动态的频谱共享, 达到提高频谱利用率, 降低 WMSN_s 无线通信的数据碰撞概率, 增强网络抗干扰能力的目的, WMSN_s 需要相关硬件支持, 而且 MAC 层的前端必须具有感知无线环境能力和频谱管理能力。针对 WMSN_s 节点的物理限制, 如计算能力和能量供应, 本文提出了低复杂度的联合频谱感知方法和频谱管理方法。

3.1 频谱感知

WMSN_s 必须具备在一定的频率范围内感知周边无线电环境的能力, 即频谱感知能力。频谱感知可以实时地探测是否存在空闲频段, 以供 WMSN_s 使用。同时, 还应随时监控授权用户是否重新接入该频段, 以确保 WMSN_s 不对授权用户造成干扰。CR 中频谱感知技术以检测节点数量划分, 可以分为单节点检测和多节点联合检测。由于 WMSN_s 中含有大量的节点, 节点都是由电池供电, 并且发射

数据速率较低,内存及运算处理能力有限,因此利用单节点探测的频谱感知存在一定的物理局限性。多节点联合检测可以克服信道的多径衰落、阴影效应以及隐藏站点等诸多单节点检测无法解决的问题。因此多节点的联合探测可以通过 WMSNs 已形成的网络实现对无线信道、内存、能量等资源的有效利用。因此, WMSNs 更适合采用多节点联合探测的频谱感知技术。

目前, CR 中多节点联合检测研究主要基于中心控制方式。分布于不同位置的多个检测节点独立运行对授权用户信号的本地检测算法,并得到信号存在与否的判决概率。然后,中心接入点根据收到的来自各个节点的判决结果综合做出信号存在与否的最终判决。对于具有簇型结构的 WMSNs,簇首可以作为中心接入点完成对授权用户存在与否的最终判决;而对于非簇型结构的网络,利用某种机制选择适合节点作最终判决,如基于能量机制和^[8]。然而受到节点自身的计算能力和能量等物理条件限制,每个节点能够独立检测的频谱带宽非常有限,无法直接将认知无线电的多节点联合检测研究移植到 WMSNs。又因为 WMSNs 的节点可能被大量布置,无线通信需要同时使用多个信道,且节点分布在较大范围内,同一信道在不同区域的可用性会有所不同。因此,本文提出了适用于 WMSNs 的频谱联合感知的方法。其主要思想是 WMSNs 以簇为单位,采用不同簇感知不同频段,或相邻簇感知不同频段;簇中各节点感知不同的信道,然后再由簇首作最后判决。如果没有簇首,则可以利用某种规则选取最适合节点作最后判决,如能量优先原则。详细的联合频谱感知过程如下。

(1) WMSNs 中各节点进行初始化,建立具有簇型结构的无线网络 每个簇由一个簇首节点和多个簇成员节点构成。为了使得各节点的能量消耗达到平衡,簇首节点可以实现轮换机制。簇首轮换后,原簇首将可用信道列表传输给新簇首。关于簇的建立^[9,10]和簇首节点的选举算法不是本文的重点,所以在此不作过多的阐述。

(2) 簇首开始监听控制信道 簇结构建成后,簇首根据簇内节点数量设定本簇感知频段的范围和起始频率,并监听公共控制信道。若信道空闲,则广播本簇的感知频段;若在此之前接收到其它簇首的广播,则将其保存至“相邻簇使用频段列表”,并与本簇的感知频段对比。如果两簇的频段不同,则在信道空闲时广播本簇的感知频段;否则,另选择一个与列表中的其它簇的感知频段不重叠的频段作为本簇的感知频段,然后对外广播。通过上述方法可

以避免近邻簇采用重叠频段作为数据信道。

(3) 簇内频谱感知 簇内节点收到簇首广播后开始进行频谱感知。簇内的频谱感知采用轮换机制。若一个簇包含 M 个节点,分别是 S_0, S_1, \dots, S_{M-1} , 在该簇感知的频谱范围内划分 N 个等带宽的信道,用 C_0, C_1, \dots, C_{N-1} 来表示。若一个节点一次可以探测 K 个信道,则节点 S_i 首轮探测的信道为 $C_{\text{mod}((Ki+k),N)}$, $k = 0, 1, \dots, K-1$ 。第 p 轮探测的信道为 $C_{\text{mod}((K(Mp-M+i)+k),N)}$, $k = 0, 1, \dots, K-1$ 。每个信道被探测 KMp/N 次。采用轮换机制可以获得同一信道在该簇范围内的整体情况,避免无法探测到图 1 的情况。在图 1 中, WMSN 与授权用户的信号传输范围部分重叠,节点 1, 节点 2 和节点 4 无法探测到授权用户的存在。如果不采用轮换机制,该簇极有可能根据这些节点的探测结果选择与授权用户信道重叠的信道进行无线通信,这样势必会对授权用户产生干扰。而采用轮换机制可以避免上述问题的发生。

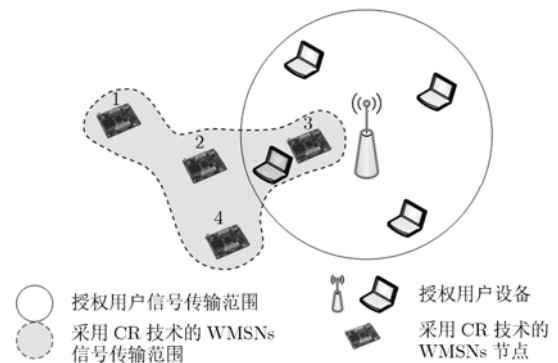


图1 授权用户网络与 WMSN 部分重叠

目前,节点对信道的探测方法主要有 3 种,分别是能量探测法、匹配滤波器探测法^[11]和循环平稳探测法^[12]。能量探测法运算复杂度低,但亦受噪声干扰;匹配滤波器法感知速度快,但感知单元的实现复杂度;循环平稳探测法抗干扰能力强,但计算复杂度极高。由于受到计算能力和能量的限制, WMSNs 节点采用能量探测法最为适合,本文选择节点接收信号强度(RSSI)作为探测结果。

(4) 通信信道选择 簇内节点在感知周期 T 内,在被探测信道进行信号接收,接收间隔为 T_s ,接收信号强度为 RSSI。节点将概率值 $P(\text{RSSI} > \lambda)$ (λ 为能量检测的门限)作为探测值,报告给簇首。对于同一个信道可能被不止一个节点探测的情况,簇首选取该信道探测值的最大值作为的探测结果。然后,簇首保留探测结果小于阈值 P' 的信道,将其由小至大排序后保存至可用信道列表,同时舍弃其它信道。位于结果列表靠前的信道为本簇无线通信的优先使

用信道。

至此，频段感知的初始工作已经完成，传感器网络进入工作阶段。在数据传输周期 Δt 后，WMSNs 进行下一轮频谱感知。本文选取固定值作为轮换间隔时间，在下一阶段的研究中会设计 Δt 的自适应算法。在新一轮的感知过程中，所有数据传输终止。频谱感知完成后，簇首更新可用信道列表，然后为各节点重新分配数据信道。图 2 给出了信道使用示意图。在感知周期内，利用控制信道完成探测过程所有通信。在数据传输周期，有通信需求的节点在申请得到可用信道后，可进行数据传输。

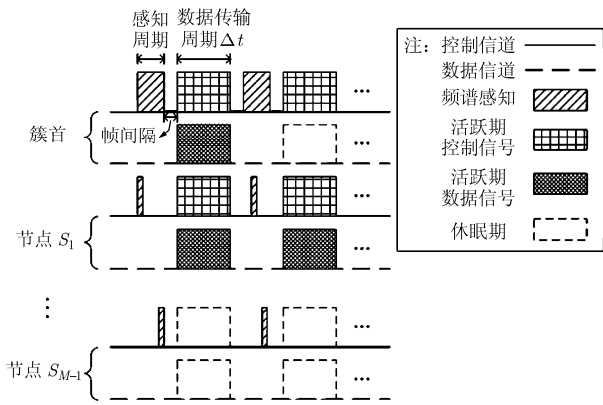


图 2 信道使用示意图

3.2 频谱管理

WMSNs 需要根据频谱感知结果，对频谱资源进行分析和评价，确定时间和空间上可用频谱资源，然后根据一定的规则对频谱资源进行分配。WMSNs 的无线通信信道分为控制信道和数据信道。因此需要对采用 CR 技术的 WMSNs 的控制信道和数据信道采用的频段进行选择。

本文的算法中，控制信道采用公有频段，如 2.4 GHz 频段，而数据信道则采用利用 CR 技术得到的空闲私有频段。这样做的原因是控制信号的发生次数高于数据信号，但帧的长度远远小于数据信号，因此控制信道的占空比相对较低，公用频段已经可以满足要求。如果二者均使用空闲私有频段，由于控制信号的发生频率较高，势必会增加无线环境感知的次数，产生较大的能量消耗。而且，控制信道采用动态频谱分配会复杂化网络初始化的组网过程。因此，上述频谱感知过程中的控制信号均采用预定的公用频段传输。

另一方面，WMSNs 为了节省能量，一般不会连续传输多媒体数据，而是当传感器捕获到目标后才传输数据，目标消失后终止传输。因此，数据信道只在较短时间内需要较大带宽传输数据，因此数据信道采用空闲私有频段，从而获得较大带宽。下面将详细说明数据传输过程。

如图 3(a)所示，节点传输数据前，先利用控制信道向簇首发数据信道参数请求和接收节点 ID。簇首通过在控制信道的广播，将可用信道列表中位置最靠前的未使用信道参数发送给发送节点和接收节点，然后将该信道标记为“正在使用”。发送节点收到回复后，利用数据信道与接收节点进行一次“握手”后，开始数据传输。若“握手”过程失败(图 3(b))，则重新向簇首发请求；簇首将以分配给该节点的信道标志为“未使用”后，重新将可用信道列表中位置最靠前的未使用信道参数发送给发送节点和接收节点，然后将该信道标记为“正在使用”，待数据传输完毕，发送节点通知簇首，簇首将该信道标记为“未使用”。

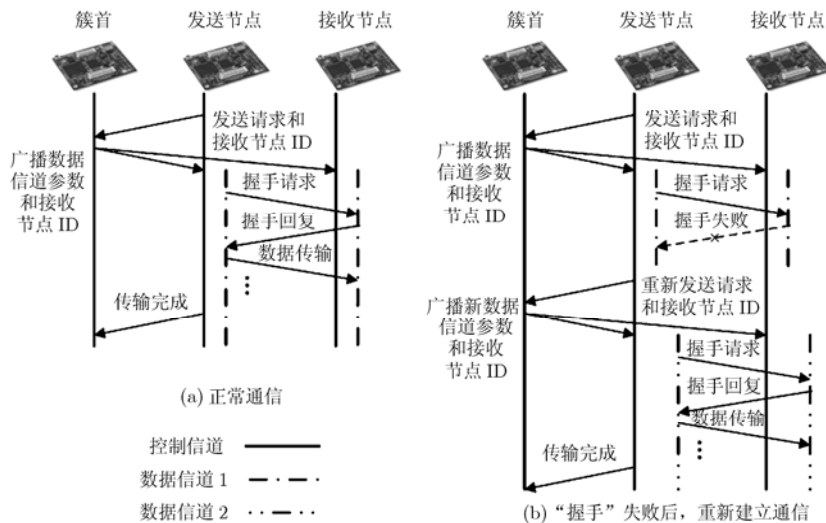


图 3 数据传输过程

4 实验结果

为了验证本文中提出的频谱感知方法和频谱管理方法的有效性,我们做了以下实验。首先,利用5个Crossbow公司的Imote2节点和两台笔记本电脑进行了模拟实验。用Imote2节点建立WMSNs,其可搭载IMB400传感器模块,提供视频、音频、振动等多媒体数据。该节点采用Chipcon CC2420射频芯片,可在2.4 GHz频段进行符合802.15.4规范的无线通信,具有16个信道,分别是802.15.4所规定的11-26信道。图4(文献[13]中图4-1)提供了RSSI与接收信号强度(dBm)的对应关系。另外,我们用两台笔记本电脑模拟授权用户,二者之间的无线通信被视为授权用户在私有信道的通信,通信方式为802.11g规范,通信信道为第6信道,速率为54 Mbps。该信道与802.15.4的第16-19信道的频谱重叠,如图5所示。为了尽量减少多径和掩蔽效应的影响,所有实验在一个开阔地进行,并可假设无其它无线通信设备影响实验结果。无线传感器节点与笔记本电脑的距离为5-10 m。

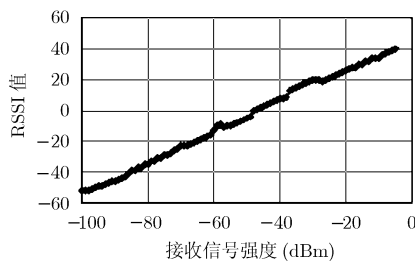


图4 RSSI与接收信号强度的关系图

本文用WMSN对上述16个信道进行了探测,每个信道采样200次,采样间隔为 $T_s = 1$ ms。我们记录了每次接收的信号强度。本文定义接收信号强度小于-50 dBm时的信道为空闲状态,从而得到每个信道的占空比(图6)。从图中可以看出,在与802.11g的第6信道重叠的信道(16-19),接收信号

的占空比高于50%,说明与其重叠的信道可能正在被私有用户使用,因此,WMSNs必须选择其它信道。而在其它信道,占空比较低,接收信号均集中在最低能量段(< -50 dBm)。说明这些信道私有用户目前未使用该信道,因此,WMSNs可以使用这些信道。通过该实验可以证明,WMSNs通过合作式的能量检测方法能够有效检测私有信道的使用情况,从而可以通过合理的频谱分配,对空闲频谱进行有效利用。

为了进一步测试具有动态频谱分配能力的WMSN,我们利用Imote2进行了另一个试验。用802.15.4的第11-24信道模拟私有频段作为数据信道,第26信道模拟公有频段作为控制信道;将两台笔记本电脑间的无线通信作为授权用户的通信。为了比较具有CR功能的WMSN的抗干扰能力,本文分别对不具备CR功能和具备CR功能的两个WMSNs进行了测试。测试初始阶段,WMSNs中的Imote2节点间利用802.15.4的第17信道进行无线传输,速率为20 pkts/s,授权用户保持静默状态。500 s后,授权用户利用802.11的第6信道进行通信,持续时间500 s,然后恢复静默。以上过程记为一个测试周期,测试持续了3个周期。每50 s记录一次WMSNs的丢包率。如图7(a)所示,无CR功能的WMSN在授权用户静默时,可以保持较低的丢包率($\bar{p}_0 \approx 0.004$);然而当授权用户出现后,丢包率激增($\bar{p}_1 \approx 0.24$),在此条件下,WMSN需要额外消耗 $1/(1-\bar{p}_1)-1 \approx 32\%$ 能量进行数据包重发。与之相比,具有CR功能的WMSN仅在授权用户第1次出现初期发生了高丢包率的情况,而其它时间均保持了较低的丢包率。这是由于在授权用户第1次出现初期,WMSN正处于数据传输周期,未能及时对无线电环境进行感知。经下一个感知周期后,WMSN调整了数据传输信道(11信道),避免了授权用户的干扰。在授权用户第2次出现时,由于WMSN已处于11信道,因此受到的干扰较小($\bar{p}'_1 \approx 0.006$)。

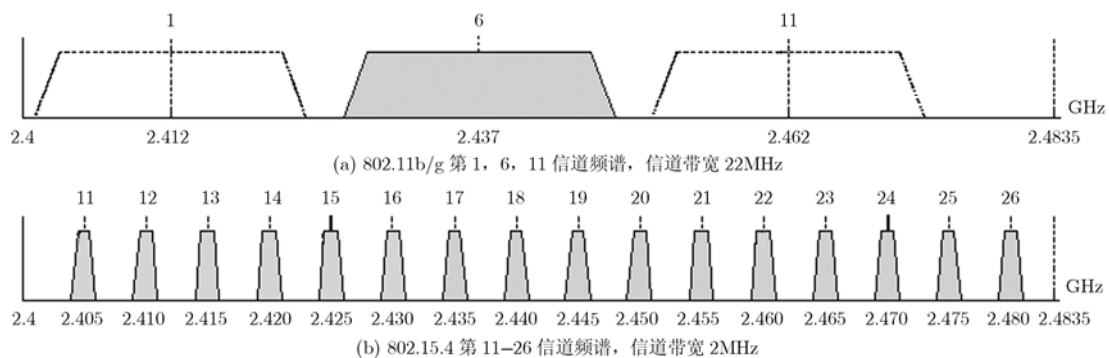


图5 802.11b/g和802.15.4部分信道频谱

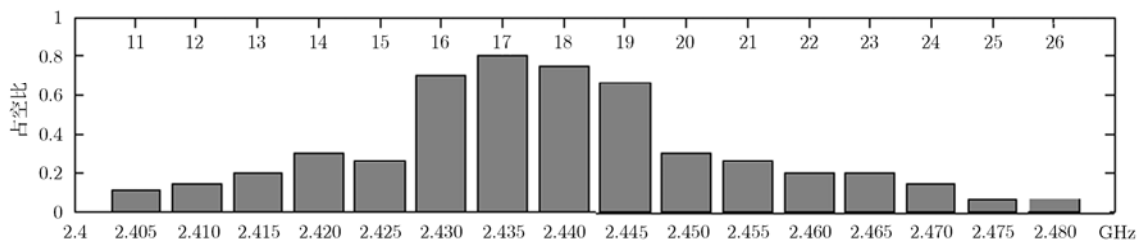


图 6 不同信道占比

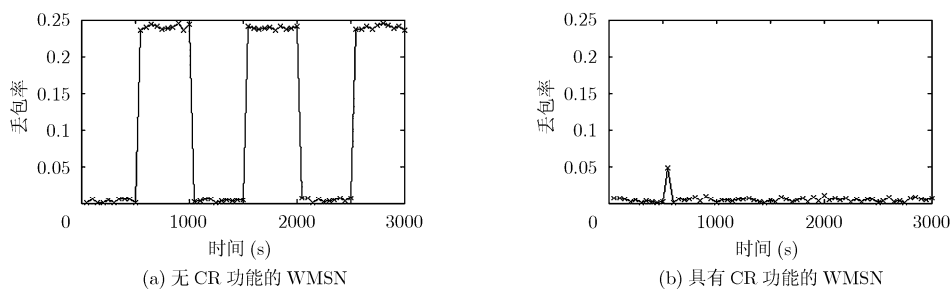


图 7 不同 WMSNs 在各时间段的丢包率

5 结束语

本文提出了一个将 CR 技术融入 WMSNs 的方法。该方法通过在 MAC 层前端增加频谱感知和频谱管理功能,使得 WMSNs 可以感知周围无线电环境,并且利用空闲的私有频段进行无线通信。该方法可以为 WMSNs 提供灵活的频谱范围,以及减少其它无线设备在公共频段对 WMSNs 的干扰。通过实验证明,现有无线传感器节点可以探测自身信道频段是否被其它无线设备使用,从而对可用频谱资源进行合理分配。当然,目前的测试均是在公用频段内进行。若想使 WMSNs 节点真正具有 CR 功能,可以利用私有信道进行无线通信,还须对其硬件进行改进。

参考文献

- [1] Akyildiz I F, Melodia T, and Chowdhury K R. A survey on wireless multimedia sensor networks[J]. *Computer Networks*, 2007, 51(4): 921-960.
- [2] Musáloiu-E R and 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.
- [3] Mitola J III. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio[D]. [Ph.D. dissertation], KTH Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2000.
- [4] 郑国强, 李建东, 周志立. 无线传感器网络 MAC 协议研究进展. *自动化学报*, 2008, 34(3): 305-316.
Zheng Guo-qiang, Li Jian-dong, and Zhou Zhi-li. Overview of MAC protocols in wireless sensor networks. *Acta Automatica Sinica*, 2008, 34(3): 305-316.
- [5] 李瑞芳, 李仁发, 罗鹏. 无线多媒体传感器网络 MAC 协议研究综述. *通信学报*, 2008, 29(8): 111-125.
Li Rui-fang, Li Ren-fa, and Luo Juan. Survey of MAC protocol in wireless multimedia sensor networks. *Journal on Communications*, 2008, 29(8): 111-125.
- [6] Ye W, Heidemann J, and Estrin D. Medium access control with coordinated, adaptive sleeping for wireless sensor networks[J]. *IEEE Transactions on Network*, 2004, 12(3): 493-506.
- [7] Arisha K, Youssef M, and Younis M. Energy-aware TDMA-based MAC for sensor networks. Proc. of the IEEE Workshop on Integrated Management of Power Aware Communications, Computing and Networking (IMPACCT), New York City: USA, 2002.
- [8] Srikanth V and Babu I R. Cluster head selection for wireless sensor networks: A survey. *The Icfai University Journal of Information Technology*, 2009, 5(1): 44-53.
- [9] Iwanicki K and Steen M V. Multi-hop cluster hierarchy maintenance in wireless sensor networks: A case for gossip-based protocols [C]. Proc. of the Sixth European Conference on Wireless Sensor Networks, Cork, Ireland, Feb. 2009: 102-117.
- [10] Sin H, Lee S, and Lee J, et al. Self-organized cluster based multi-hop routing for wireless sensor networks [C]. Proc. of the 11th Asia-Pacific Symposium on Network Operations and Management: Challenges For Next Generation Network Operations and Service Management, Beijing, China, Oct. 2008: 449-502.
- [11] Proakis J G. Digital Communications. 3rd edition, New York: McGraw-Hill, 1995: 698-728.
- [12] Gardner W A. Signal interception: A unifying theoretical framework for feature detection. *IEEE Transactions on Communications*, 1988, 36(8): 897-906.
- [13] Crossbow, Imote2 hardware reference manual, revision A, 2007.

刘航: 男, 1982年生, 博士生, 研究方向为无线多媒体传感器网络。
孔祥维: 女, 1963年生, 教授, 研究方向为传感器网络、多媒体信息安全、电子商务安全管理、信息融合和处理。
刘桂林: 男, 1985年生, 硕士生, 研究方向为无线传感器网络。