

## 基于首要信道的无线认知传感器网络多信道广播协议

普健杰, 曾凡仔

(湖南大学 嵌入式与网络计算湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 针对无线认知传感器网络的资源有限性和频谱动态分配, 提出了基于首要信道半双工的无线认知传感器网络广播协议。在没有公共信道和时钟同步的情况下, 该协议通过单个收发机的收发状态转换和信道表的交换进行网络的初始化。经过网络初始化, 节点由首要信道形成拓扑, 节点通过首要信道以半双工数据传送方式进行广播。仿真实验表明, 与完全广播相比, 该协议降低了广播延迟和开销, 更利于应用于无线认知传感器网络。

**关键词:** 认知无线传感器网络; 首要信道广播; 完全广播; 单收发机

中图分类号: TP393

文献标识码: A

文章编号: 1000-436X(2013)07-0081-06

## Multi-channel broadcast protocol for CRSN based on home channel

PU Jian-jie, ZENG Fan-zi

(Key Laboratory of Embedded and Network Computing of Hunan Province, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** In the light of the limited resources and the dynamic spectrum distribution in the CRSN, a half duplex multi-channel broadcast protocol for CRSN was proposed based on the home channel theory. In the absence of the common channel and clock synchronization, the proposed protocol initialized the network through the transitions of the sending and receiving state of the single transceiver and the changes of the channel table. After network initialization, the topology of nodes was formed based on home channel. Nodes broadcast through home channel based on half duplex data transfer mode. According to the simulation results, it is proved that, compared with complete broadcast, the proposed protocol effectively improves the success rate of broadcast and reduces broadcast delay and overhead, which gets better performance in practical application of CRSN.

**Key words:** CRSN; home channel broadcast; complete broadcast; single transceiver

### 1 引言

无线传感器网络 (WSN, wireless sensor network) 由大量密集部署的传感器节点所组成, 近年来广泛用于环境监测和保护、医疗护理和军事领域<sup>[1,2]</sup>。目前的 WSN 都部署在拥挤的 ISM (industrial scientific medical) 频段上, 并且使用固定的频谱分配策略, 从而易受其他无线技术 (如 Wi-Fi、蓝牙、ZigBee 等) 干扰。认知无线电<sup>[3]</sup> (CR, cognitive radio) 有感知频谱和确定空白带宽的能力。通过机

会频谱接入方法, 利用“频谱空穴”来充分利用频谱。解决了频谱资源有限和固定频谱分配而导致频谱使用效率低的问题。因此, 在无线传感器网络中采用认知无线电技术能让传感器节点增加工作带宽, 减少了节点由于竞争信道而带来的等待、冲突和能量消耗, 提高了网络的吞吐量, 降低了延迟。从而产生了一个新的网络模型—无线认知传感器网络 (CRSN, cognitive radio sensor network)<sup>[4]</sup>。

广播是网络的一种基本操作: 源节点向网络的其他所有节点发送数据分组。它是节点间共享数据

收稿日期: 2012-11-10; 修回日期: 2013-05-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61173012); 湖南省自然科学基金资助项目(12JJA005); 湖南省高校创新平台开放基金资助项目(10K015)

**Foundation Items:** The National Natural Science Foundation of China(61173012); The Key Program of Hunan Provincial Natural Science Foundation (12JJA005); The University Innovation Platform Foundation of Hunan Province (10K015)

的一种方式。还被应用于基于问答的环境监测、进程管理、自动服务、分布式事件监督管理等。现有的 WSN 广播协议没有考虑到 CRSN 的动态频谱分配，而 CR 广播协议没有考虑到 CRSN 的节点资源有限性，所以提出适用于 CRSN 的广播协议对于无线认知传感器网络的发展有着重要的意义。

在涉及 WSN 广播协议的相关文献中，文献[5]提出了一种最大化无线传感器网络生存时间的广播算法 (MLB)，它以节点自延迟的方法减少了由重播引起的冗余和能量消耗，从而延长了网络的生存时间；文献[6]提出了一种可靠的完全生成树方法来进行 WSN 广播；文献[7]提出了 2 种 WSN 的基本广播模型。传统的 WSN 广播方法建立在固定频谱分配的基础上，没有考虑到认知无线电主用户 (primary user) 的进入所引起的信道变化、路由变化、拓扑变化及由此引发的冗余和延迟，因此不能直接用于 CRSN 网络。

在涉及 CR 广播协议的相关文献中，文献[8]提出了一种 CR 的选择性广播算法来减少广播延迟，这种方法假定网络拓扑和可用信道信息是已知的，但这种假定在 CRSN 中难以成立；文献[9]提出了一种基于 QoS 的多跳 CR 广播算法，它采用了分片重传的方法进行广播，保证了 QoS 的同时却消耗了大量的能量，不适合节点能量有限的 CRSN；文献[10]提出了一种基于预留请求的认知无线电 MAC 协议，但它不能处理 CRSN 中大量节点在短时间内尝试传输数据的情况；文献[11]提出了一种基于时分的 MAC 技术，但它所要求的全网内严格时间同步，对于 CRSN 是不实际的；文献[12]提出一种在多跳认知无线网络中，基于首要信道 (HCh, home channel) 的 MAC 协议，这种方法是把各个可用信道作为一个或多个节点的首要信道，并且假定每个节点有多个信号收发机，其中一个收发机固定在首要信道上，当一个节点想给另一个节点发送数据时，没有固定信道的收发机转移到目标节点的首要信道上发送数据。然而，由于传感器节点硬件简单并且要求低能耗，单个节点使用多个收发机同时工作来进行全双工通信对于 CRSN 是不现实的<sup>[4]</sup>。上述的认知无线电 MAC 协议没有考虑到传感器节点的资源有限性，直接用于 CRSN 会造成网络生存时间的缩短。另外，与 WSN 不同，CRSN 几乎不可能存在一个全局的公共信道来发送接收控制信息<sup>[13]</sup>，而局部的公共信道也不容易实现，另外公共控制信道方

法对拒绝服务 (DoS, denial of service) 攻击毫无办法<sup>[14]</sup>。因此，需要一个有效的 CRSN 广播协议来解决上述矛盾。

本文提出了一种基于首要信道的半双工 CRSN 广播协议 (half duplex broadcast protocol for CRSN based on home channel)，简称为首要信道广播。节点通过首要信道形成路由和拓扑，然后进行定点的数据发送，省去了多余的协商和重传，提高了信号广播的效率，降低了冗余和延迟，从而延长了节点的生存时间。

该协议的设计考虑到了很多 CRSN 的实际情况：1)网络拓扑先验未知；2)节点间不知道彼此的信道信息；3)每个节点只用一个无线信号收发机；4)各节点的可用信道不同；5)不存在全网或局部网的公共信道；6)不存在时间同步。这样该协议的实用性和通用性得到了保障。

## 2 网络模型

假设在一个  $L \times L$  的区域中，随机分布有  $N$  个认知无线传感器节点和  $M$  个主用户，这里的 SU (second user) 代表无线传感器节点，PU 代表主用户，每一个 SU 都有相同的硬件和软件设置，特别地，每一个 SU 只有一个信号收发机，发送信号时的状态为 ST (state transmit)，接收信号时的状态为 SR (state receive)，且 2 种状态不能同时出现，也就是说每个 CRSN 节点只能进行半双工通信。

该区域中共有  $K$  个可用信道，各个 SU 以认知无线电的方式机会接入信道。整个网络没有时间同步信号且不存在公共信道。

每一个 SU 都有一个圆形的传播范围，传播半径为  $r_t$ ，在该范围内的其他 CRSN 节点都是该节点的邻节点。每一个 SU 都有一个半径为  $r_s$  的圆形的感知范围来感知主用户的进入和噪声干扰，设该感知范围内每个信道被主用户占用的概率为  $l_p$ ，每个信道噪声或者干扰超过限定值的概率为  $l_n$ 。本文中假设  $r_t = r_s$ 。

设每个 SU 感知范围  $pr_s^2$  内存在  $n$  个 SU 的概率为  $P(n)$ ，因为 SU 是随机分布的，所以可得

$$P(n) = C_N^n \left( \frac{pr_s^2}{L^2} \right)^n \left( \frac{L^2 - pr_s^2}{L^2} \right)^{N-n} \quad (1)$$

那么  $n$  的期望为： $E(n) = \sum_{n=1}^N nP(n) = N \cdot \frac{pr_s^2}{L^2}$ ，若  $E(n) > 1$ ，那么每个 SU 的邻节点数的期望为

$$E_{nb} = E_n - 1 = N \frac{Pr_s^2}{L^2} - 1 \quad (2)$$

### 3 网络初始化

网络初始化分为 2 个阶段。

第一阶段 从系统初始化时开始，各个节点开始在自己半径为  $r_s$  的感知范围内逐一感知  $K$  个信道的使用情况（物理层的频谱感知方法不在本篇文章讨论范围内），如果有 PU 活动，则在 MAC 数据分组的信道表上标记该信道为 access-PU；如果有超过某种程度的干扰信号，则标记为 noisy；剩下的信道都标记为 available。节点在 available 信道中随机选取一个信道作为它的首要信道，并在其信道表中标记该信道为  $HCh_i$ （假如该节点是  $i$ ），第一阶段结束。

如图 1 所示，在这个过程中，各个节点是孤立的，由于节点感知区域的不同可能导致所选择的  $HCh$  被邻节点标记为 access-PU 或 noisy；另外  $HCh$  选择的随机性可能导致邻节点之间共用  $HCh$ ，从而导致信道表不准确。因此，如图 2 所示，第二阶段提出了一种 2 次握手方法来修正信道表。

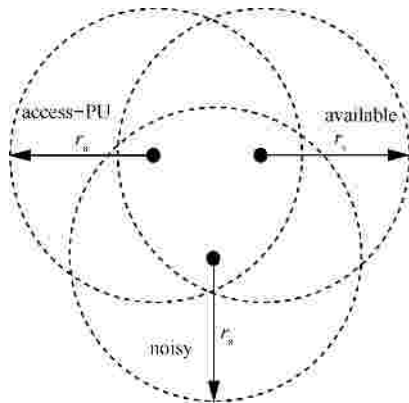


图 1 邻节点感知相同信道的不同情况

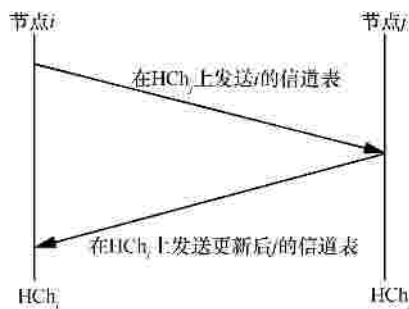


图 2 节点间 2 次握手

第二阶段 节点首先处于 SR 状态，把各自收发机的接收信道固定在第一阶段选择的  $HCh$  上，然

后查自己的信道表，选择一个 available 信道转为 ST 状态发送包含信道表的数据分组头。

以节点  $i$  和  $j$  为例。节点  $i$  以 ST 状态在一个 available 信道上发送分组头，发送完成后转回 SR 状态。

如果节点  $j$  收到了节点  $i$  发来的分组头，那么节点  $j$  就对比节点  $i$  的信道表和节点  $j$  的信道表，并按以下步骤更新节点  $j$  的信道表。

- 1) 标记  $HCh_i$  为节点  $i$  的首要信道，也表明节点  $i$  是节点  $j$  的邻节点。
- 2) 标记节点  $i$  的 noisy 信道为节点  $j$  的 noisy 信道。
- 3) 把节点  $i$  信道表中的 access-PU 信道同样标记为 access-PU。
- 4) 如果发现  $HCh_j$  与节点  $i$  信道表中的 noisy 相同，那么重新选择一个节点  $j$  的可用信道作为新的  $HCh_j$ ，并标记原来的  $HCh_j$  为 noisy。
- 5) 如果发现  $HCh_j$  与  $HCh_i$  相同，那么重新选择一个节点  $j$  的可用信道作为新的  $HCh_j$ 。

完成信道表更新的节点  $j$  调整 SR 状态为 ST 状态，把新的信道表装入分组头，立刻通过  $HCh_i$  发送给节点  $i$ ，发送完成后转回 SR 状态。节点  $i$  收到节点  $j$  的回复分组后重复上述信道表更新步骤，完成信道表更新，然后在下一个 available 信道中发起 2 次握手。如果节点  $i$  在一定时间内没有收到目标节点的回复分组，即等待超时，则再在该 available 信道中发起 2 次握手。如果再次等待超时，那么节点  $i$  认为该信道没有被邻节点用做首要信道，节点  $i$  再选择下一个 available 信道发起 2 次握手。直到各节点在所有的 available 信道完成 2 次握手或等待超时，节点的信道表已经更新多次，比较准确。第二阶段结束。

经过网络初始化，节点通过各自的信道表知道了邻节点的首要信道；有干扰信道、PU 进入的信道、自己的可用信道、自己的首要信道。

节点通过与邻节点的首要信道形成路由，从而构成了整个网络的拓扑。此时节点处于 SR 状态并在各自的首要信道上监听数据分组、感知 PU 的进入和噪声水平，一旦有变化，按顺序与其邻节点完成 2 次握手。

### 4 基于首要信道的广播协议

#### 4.1 基于首要信道的半双工数据传送方式

通过网络的初始化，每个 CRSN 节点选择一个

可用信道并作为它的 HCh, 固定收发机 SR 的接收信道在 HCh 上并监测或接收数据, 直到它需要更换 HCh。每个节点在没有发送任务时, 都把自己的状态设为 SR, 当节点需要发送一个数据分组时, 改变它的 SR 状态为 ST, 然后在目标节点的 HCh 上发送数据分组, 发送完成后转回 SR 状态。

当源节点处于 ST 状态发送数据时, 且目标节点处于 SR 状态时, 数据分组能够一次性发送成功; 当源节点处于 ST 状态发送数据时, 目标节点也处于 ST 状态, 那么该数据分组就会发送失败。

为了处理发送失败的情况, 本文采用超时重传机制: 即目标节点如果收到数据分组则在源节点的 HCh 上返传一个确认数据给源节点, 那么源节点就认为发送成功; 如果源节点在等待一段时间后还没有收到确认数据, 那么再重传该数据分组, 若收到确认数据, 则发送成功, 若还是没有收到确认数据, 那么不再重传, 该数据分组被发送了 2 次。之所以设置最大重传次数为 1 次, 是因为更多的重传会导致开销增大, 另外, 大多数情况下不止一个邻节点会向目标节点发送广播分组, 从而目标节点能以较高概率接收到该广播分组。

设当节点  $i$  给它的一个邻节点  $j$  传送数据分组时, 只需发送 1 次就成功的概率为  $P_1$ , 需要发送 2 次的概率为  $P_2$ 。若节点  $j$  已经给节点  $i$  发送过该数据分组, 那么节点  $i$  就不需要给节点  $j$  发送该数据分组, 设节点  $i$  不需要给节点  $j$  发送该数据分组的概率为  $P_0$ 。那么一个节点给另一个节点发送同一数据分组的次数期望为

$$E_s = 0 \times P_0 + 1 \times P_1 + 2 \times P_2 \quad (3)$$

其中,  $P_0 + P_1 + P_2 = 1$ 。

当  $0 \leq E_s \leq 2$ , 且  $P_0 = 0$ 、 $P_1 = 0$ 、 $P_2 = 1$  时,  $E_s$  有最大值 2。

#### 4.2 首要信道广播

当节点  $i$  需要广播数据分组时, 它通过 4.1 节所阐述的半双工数据传送方式在各个邻节点的首要信道上发送包含数据和信道表的广播分组。节点  $i$  的邻节点  $j$  根据第 3 节提出的信道表更新步骤更新信道表, 然后根据信道表中的首要信道数据向节点  $j$  的邻节点 (除了节点  $i$ ) 发送广播分组, 每个节点收到重复的广播分组后不再进行转发, 以此类推。那么根据式(2)和式(3), 若  $E_n = 1$ , 则每个节点在执行该次广播任务时需要发送该广播分组的次数期

望为:  $E_{node} = E_{nb} \cdot E_s$ , 那么整个网络中该广播分组被发送的次数期望为

$$E_{all} = E_{node} N$$

$$= N \left( \frac{Pr_s^2}{L \cdot L} \times N - 1 \right) (0 \times P_0 + 1 \times P_1 + 2 \times P_2)$$

$$2N \left( \frac{Pr_s^2}{L \cdot L} \times N - 1 \right) \quad (4)$$

令  $E_{max} = 2N \left( \frac{Pr_s^2}{L \cdot L} \times N - 1 \right) \quad (5)$

那么  $E_{max}$  表示整个网络中广播分组被发送次数的最大值。

如图 3 所示, 圆点表示 CRSN 节点, 箭头表示广播路径。节点  $i$  作为源节点开始广播数据分组。节点  $i$  依次在其感知范围  $r_s$  内的邻节点  $a$  的首要信道 (图中以 Chn 表示) Ch6、邻节点  $b$  的首要信道 Ch4、节点  $c$  的首要信道 Ch1、邻节点  $d$  的首要信道 Ch3 上发送广播分组, 节点  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  收到广播分组后通过它们各邻节点的 HCh 转发广播分组。网络中的每个能与节点  $i$  构成连通图的节点在经过一段时间后都能收到节点  $i$  的广播分组, 例如节点  $g$  收到源节点  $i$  的广播分组的过程为: 节点  $i$  通过节点  $d$  的首要信道 Ch3 发送广播分组给节点  $d$ , 节点  $d$  通过节点  $e$  的首要信道 Ch7 转发广播分组给节点  $e$ , 节点  $e$  通过节点  $f$  的首要信道 Ch6 转发给节点  $f$ , 最后节点  $f$  由节点  $g$  的首要信道 Ch3 转发到节点  $g$ 。由于本文设定节点是随机分布的, 可能出现 2 个节点间没有连通路经, 如图中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  节点, 它们永远收不到节点  $i$  的广播分组。另外, 不在彼此感知范围内的 2 个节点, 如图 3 中节点  $k$  和节点  $m$ , 选择了相同的信道作为 HCh, 但不相互干扰。

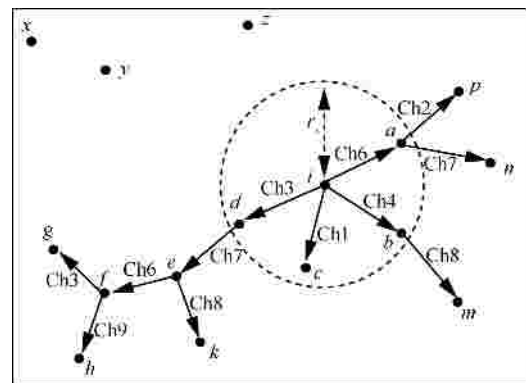


图 3 节点广播示意

### 5 仿真结果和分析

本节通过仿真来证明本文协议的有效性。由于关于无线认知传感器网络广播协议的研究尚未开展，所以将本文协议与传统的完全广播协议进行比较。

完全广播(complete broadcast)是指源节点在每个可用信道上发送一次广播分组，其他节点接收到该广播分组时在其所有的可用信道上都发送一次该广播分组，并且节点是半双工通信。可用信道数的期望  $E_a = K(1 - l_p - l_n)$ ，那么整个网络中该广播分组被发送的次数期望为

$$E_c = N \times E_a = NK(1 - l_p - l_n) \quad (6)$$

本文使用 MATLAB 进行蒙特卡洛仿真。仿真区域设定为 1 000 m×1 000 m，节点数量  $N$  从 1~100 变化，所有节点都随机分布在该区域内。每一个节点的感知半径  $r_s$  和传输半径  $r_t$  均设定为 200 m，且在该范围内 PU 进入每个信道的概率为  $l_p = 0.025$ ，每个信道有噪声的概率为  $l_n = 0.02$ ，该参数的设置有具体实验为依据<sup>[15]</sup>。整个区域中共有  $K = 20$  个信道可供使用，PU 随机选择  $K$  个信道中的一个接入。仿真结果中的每个数据为 10 000 次实验的平均值。

根据上面设定的参数和式(5)、式(6)可得： $E_c = 19.1N$ 。当  $N = 8$  时， $E_{max} = 2(0.1257N^2 - N)$ 。 $E_c$  和  $E_{max}$  的理论值如图 4 所示。可以看出  $E_{all}$  的最大值  $E_{max}$  在节点很密集时才会接近和超过  $E_c$ 。但在实际情况中，由于节点在转发广播分组时，不给发送给它广播分组的邻节点回发该广播分组，并且这种情况经常遇到，所以  $P_0 > 0$ ；另外，节点只有当需要发送时才处于 ST 状态，发送完成后就转为 SR 状态，所以一次发送就成功的概率  $P_1 > 0$ ，所以从式(3)和式(4)可估计在实际情况中  $E_{all}$  要比  $E_{max}$  小很多。

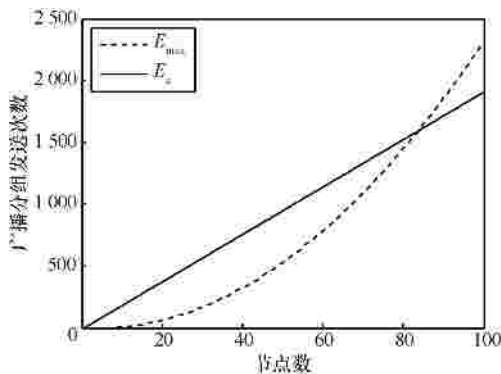


图 4 仿真区域内不同节点数对应的广播分组发送次数

本文定义开销为仿真区域内所有节点发送和转发广播分组的次数。那么  $E_c$  和  $E_{all}$  分别表示完全广播和首要信道广播开销理论值。图 5 和图 6 分别从节点数的变化和信道数的变化来考察广播开销。从图 5 和图 6 中可以看出，首要信道广播与完全广播相比，显著地降低了开销，例如当有 40 个节点和 100 个节点时，开销仅约为完全广播的  $\frac{1}{13}$  和  $\frac{1}{7}$ 。进而显著减少了能量消耗，这对于能量有限的传感器节点是极为重要的。

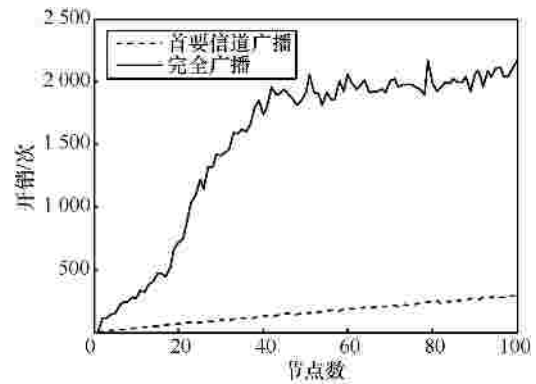


图 5 仿真区域内不同节点数对应的平均开销

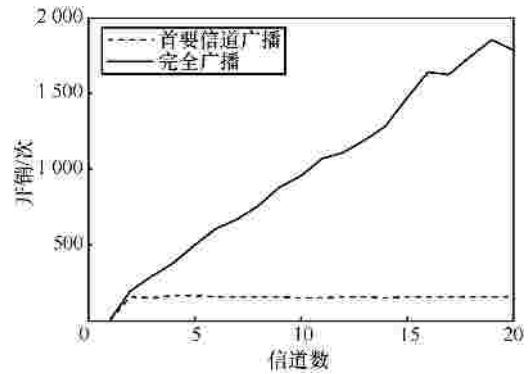


图 6 仿真区域内不同总信道数对应的平均开销

采用首要信道广播时，因为每一次发送和转发都有确定的信道，所以由盲目发送和重发引起的额外开销较少。而完全广播在每一次发送和转发时都要在所有可用信道上发送一次广播分组，造成很多额外开销。

本文测试了在不同的总信道数量下的平均广播延迟。从图 7 可以看出，首要信道广播的平均广播延迟远低于完全广播，并且与总信道数量无关。这是因为首要信道广播的每次发送和转发都通过固定的信道，不受总信道数的影响而改变节点间确定的传输方式，从而避免了盲目发送与重发造成的

延迟。而对于完全广播，信道数量越多，重复发送广播分组的次数越多，相应造成的延迟就越大。

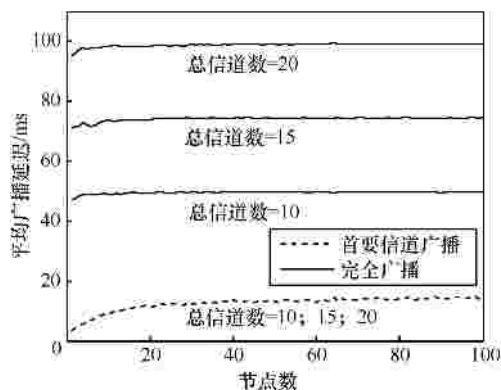


图 7 不同信道数量和节点数对应的平均广播延迟

### 6 结束语

本文提出了一种基于首要信道的一种半双工无线认知传感器网络多信道广播协议，通过单个收发机的收发状态转换与信道表的交换初始化网络。通过网络初始化，节点间通过首要信道形成拓扑。节点通过首要信道以半双工数据传送方式进行广播。仿真实验表明，与完全广播相比，首要信道广播降低了广播延迟和开销，更利于实际应用于无线认知传感器网络中。

#### 参考文献：

[1] CALLAWAY E J. Wireless Sensor Networks: Architectures and Protocols[M]. US: CRC Press, 2003.

[2] 李建中,高宏. 无线传感器网络的研究进展[J]. 计算机研究与发展,2008, 45(1):1-15.  
LI J Z, GAO H. Survey on sensor network research[J]. Journal of Computer Research and Development, 2008, 45(1):1-15.

[3] HAYKIN S. Cognitiveradio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2):201-220.

[4] AKAN O, KARLI O B, ERGUL O. Cognitive radio sensor networks[J]. IEEE Networks, 2009, 23(4):34-40.

[5] ZHAO R Q, SHEN X H, ZHANG X M, et al. Maximum life-time broadcast protocol for wireless sensor networks[A]. Computer Application and System Modeling 2010[C]. Taiyuan, China, 2010.440-444.

[6] CHAKRABORTY S, NANDI S, KARMAKAR S. A reliable and total order tree based broadcast in wireless sensor network[A]. Computer and Communication Technology 2011[C]. Allahabad, 2011.618-623.

[7] HSU C S, SHEU J P, CHANG Y J. Efficient broadcasting protocols for regular wireless sensor networks[J].Wireless Communications and Mobile Computing, 2006, 6(1):35-48.

[8] KONDAREDDY Y R, AGRAWAL P. Selective broadcasting in multi-hop cognitive radionetworks[A]. IEEE Sarnoff Symposium[C]. Princeton, NJ, 2008.1-5.

[9] SONG Y, XIE J. A QoS-based broadcast protocol for multi-hop cognitive radio ad hoc networks under blind information[A]. IEEE Global Telecommunications Conference[C].Houston, TX, USA, 2011. 1-5.

[10] WU S, LIN C, TSENG Y, et al. A new multi-channel MAC protocol with on-demand channel assignment for multi-hop mobile ad hoc networks[A]. International Symposium on Parallel Architectures, Algorithms, and Networks(I-SPAN 2000)[C]. Dallas, TX, 2000. 232-237.

[11] SO J, VAIDYA N. Multi-channel MAC for ad-hoc networks: handling multi-channel hidden terminals using a single transceiver[A].ACM MOBIHOC[C]. New York, USA, 2004. 222-233.

[12] CHOI N,PATEL M,VENKATESAN S A. Full duplex multi-channel MAC protocol for multi-hop cognitive radio networks[A]. Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications[C]. Mykonos Island, 2006.1-5.

[13] ZHAO J, ZHENG H, YANG G H. Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks[A]. IEEE DySPAN[C]. Baltimore, MD, USA, 2005. 259-268.

[14] BIAN K, PARK J M. Two types of attacks against cognitive radio network protocols[A]. Computer Science and Software Engineering[C]. Wuhan, China, 2006. 1110-1113.

[15] GHOSH C. Spectrum occupancy validation and modeling using real-time measurements[A]. The 2010 ACM Workshop on Cognitive Radio Networks, CoRoNet[C]. Chicago,USA,2010. 25-30.

#### 作者简介：



普健杰 (1987-), 男, 云南大理人, 湖南大学硕士生, 主要研究方向为认知无线网络。



曾凡仔 (1971-), 男, 湖南嘉禾人, 湖南大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为无线通信、认知无线网络。