

# 一种新的基于无线射频的机会网络路由

姜海涛 李千目 张宏

(南京理工大学计算机科学与技术学院 南京 210094)

**摘要** 机会网络是一种能够在极端条件下互联高度异类网络的新型网络,其主要特点是不存在端到端的直接路径,数据的传输要靠存储转发过程来实现。将无线射频技术应用于机会网络中的数据传递,融合无线射频技术在数据传输过程中的无接触、无需人工干预、抗恶劣环境等特点,提出了基于无线射频的路由协议,并对其性能进行了分析和仿真,证明了该路由协议的可行性和合理性。

**关键词** 机会网络,无线射频,路由协议

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

## Opportunity Network Routing Protocol Based on Radio Frequency

JIANG Hai-tao LI Qian-mu ZHANG Hong

(Institute of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract** The opportunity network is a kind of new network which can interconnect highly heterogeneous networks under extreme conditions. Its main feature is that there is no direct end-to-end path and its data transfer is achieved by store and forward procedure. This paper proposed a routing protocol based on radio frequency by applying radio frequency technology to the data transfer of opportunity network. In this method, it merges the feature of radio frequency technology in the data transfer process, such as the non-contact, non-human intervention, anti-poor environment. The performance analysis and simulation result prove the feasibility and rationality of the routing protocol.

**Keywords** Opportunity network, Radio frequency technology, Routing protocol

## 1 引言

无线射频技术是利用射频信号自动识别目标对象并获取相关信息的一种技术<sup>[1]</sup>。早在二战期间,在区分联军和纳粹飞机的“敌我辨识”系统中就展现了其雏形。目前包括 IBM, Motorola, Oracle 等在内的各大软硬件厂商都对该技术进行研究,推出的一系列软硬件产品,在物流管理、仓储系统、高速公路收费站等人们日常生活的各个方面都得到应用。

机会网络的研究来源于美国国防部高等研究计划局(DARPA)支持的星际互联网计划(IPN)<sup>[2]</sup>。这是一种在大多数情况下,源节点和目的节点不存在完整路径的移动无线网络,目前逐步应用到生物追踪、校园网络、家庭自动化网络、城市及乡村网络等领域<sup>[3]</sup>。由于机会网络具有间歇性连接、高传输延时、不均匀连接等特点,使得原本的 TCP/IP 协议无法建立端到端的连接而造成大量丢包。近年许多研究都致力于寻找一种合适的路由协议,来提高机会网络的传输率,降低传输延时,并合理利用网络中的各种资源。

本文创新性地提出了将无线射频技术应用到机会网络中,通过应用无线射频技术具有的读取速度快、存储空间大、工作距离远、穿透性强、工作环境适应性强和可重复使用等多种优点,设计了一种基于无线射频的机会网络路由协议,从理

论证明和仿真实验两个角度分析和比较了其性能。结果证明,本文提出的路由协议能满足动态变化的网络环境下的传输率和时延约束要求,并能合理利用网络中的缓存与带宽等资源。

本文第 2 节给出本文 DTN 路由协议的基本设计思想;第 3 节详细设计与分析了提出的路由协议;第 4 节是仿真实验与实验结果分析;最后做出总结并提出进一步的工作。

## 2 设计思想

机会网络中的时延约束问题就是要有效平衡资源消耗和时延约束这对矛盾。洪泛类的路由,如 Epidemic, MRP 等往往具有最小的端到端时延,但资源消耗较大。而纯粹的单副本路由,如 DTC, MobySpace 等能降低资源消耗,但时延较大。于是有专家结合传染路由的快速性及直接传输的简单性和简洁性,提出了喷雾等待路由(Spray and Wait)。这是一种基于受限洪泛的路由协议,能有效平衡时延和能量消耗<sup>[4]</sup>,但其综合性能不高。

为了解决资源消耗和时延约束这对矛盾,本文引入无线射频技术,将原本使用无线网络传输的一部分资源消耗,通过射频信号进行传送,从而降低了网络资源的消耗。同时,由于使用了两种技术并行地传输数据,因此可以提高传输速率,降

到稿日期:2009-09-14 返修日期:2009-12-05 本文受国家自然科学基金(60903027),江苏省自然科学基金(BK2007593)资助。

姜海涛(1985-),男,博士生,主要研究方向为无线网络路由技术,E-mail:jianghaitaoxin@163.com;李千目(1979-),男,副教授,主要研究方向为信息安全和网络性能诊断;张宏(1956-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为网络性能和信息安全。

低端到端的延时,获得令人满意的传输成功率。

基本思想是:在传统的机会网络中,移动节点之间通过无线网络进行通信,现在对其进行改进,引入无线射频模块,主要包括移动节点、读写器、数据管理系统3个部分。读写器是一种固定的设施,相互之间可以通过有线网络进行连接,通过数据管理系统可以对它们的数据进行集中处理,共享数据资源。移动节点是无线射频通信的数据载体,会产生相关的数据,并通过无线电波或微波能量主动与读写器进行非接触双向通信。这种通信与无线网络通信相比,工作距离远、适应性强,可以很好地分担无线网络的通信负担。读写器的主要任务是接收移动节点的连接请求,向移动节点发射读写信号,从移动节点读取数据,或者向移动节点写入数据,并将读取的数据传递给数据管理系统,进行处理。

这种通信过程相对来说是明确的,通常是源节点到读写器再到目的节点的过程。可能在读写器之间还会有一跳的数据传输,但相比于无线网络中的多跳路由,还是比较简单的。这种2到3跳的路由通常使用通信带宽较少,而且没有多余的副本,不会占用额外的存储资源。本文基于这个思想提出了一种基于无线射频的、全新的机会网络路由协议。

### 3 路由协议的设计与分析

本文首先假设网络中任何两个节点的相遇时间间隔都遵守指数分布或近似指数分布。研究证明,目前大部分主流移动模型如随机走路、随机路点、随机方向甚至更贴近现实的人工模型都符合这个特性。

再假设移动节点和射频读写器的接触也满足指数分布。读写器有一定的覆盖区域,而节点在两次进入读写器的时间间隔满足指数分布。

路由协议的具体细节设计如下。

#### 3.1 无线和射频的数据传输

整个环境中的数据传输通过无线网络和射频信号同步进行,两者之间相互不受影响,具有不同的工作频率和存储资源。

无线网络传输是原本机会网络中的唯一的数据交换渠道。在此基础上,提出了许多算法及改进方案。现在作为两种传输方式之一,综合多方面因素考虑,本协议选择受限洪泛的路由协议进行数据包的交换。

其基本思想是,源节点在数据包产生的时候,同时产生 $L$ 个副本。然后将 $L-1$ 个副本发送给最先遇到的 $L-1$ 个节点,自己保留一个副本。之后所有的节点不再复制和转发这种数据包,直到遇到目的节点,完成数据包的传递过程。当然,如果在最初分发 $L-1$ 个副本的时候恰有一个副本传递给目的节点,该传递过程就可提早结束。整个路由策略中,副本数量 $L$ 是一个关键指标。文献[4]中给出了 $L$ 的一个计算公式:

$$(H_n^2 - 1.2)L^3 + (H_n^2 - \frac{\pi^2}{6})L^2 + (\alpha + \frac{2M-1}{M(M-1)})L = \frac{M}{M-1}$$

式中, $H_n^2 = \sum_{i=1}^n \frac{1}{i^2}$ , $M$ 表示总共的节点个数, $\alpha$ 是与延时有关的变量(即需要实现的平均延迟是最佳延时的 $\alpha$ 倍)。

由于本文将一部分网络传输任务转让给射频了,因此对于上面计算得到的副本数 $L$ ,取其一半作为实际的副本数,这样相当于节约了一半的网络资源。

射频信号传输发生在移动节点和射频读写器之间。节点并不是时刻保持与读写器的连接,而是大约每隔时间 $T$ 试图和读写器进行一次交互。 $T$ 与数据包产生的概率相关,即在某一时刻,某个节点请求进行数据交换的概率为 $1/T$ 。如果两个以上的节点同时试图与同一个读写器进行通信,就会产生冲突,造成通信失败,所以必须考虑产生冲突的概率。节点可以看成是均匀分布在网络中的,节点的总数为 $M$ ,如果整个网络的面积是 $S_1$ ,单个射频读写器的覆盖面积是 $S_2$ ,某时刻在某读写器覆盖范围内节点的个数就为 $M * S_2/S_1$ ,记为 $n$ ,那么在同一时刻,两个以上节点请求进行数据交换的概率为:

$$1 - (1 - \frac{1}{T})^n - \frac{1}{T}(1 - (\frac{1}{T})^{n-1})$$

假设 $n=10$ ,节点每隔1h向读写器发送一次读写请求,那么可以计算出这个值小于0.0025,所以产生冲突的概率是很小的,大约每400次请求才会出现一次冲突,可以认为冲突产生的影响可以忽略。而如果出现了冲突,节点只需要随机延迟几秒钟再发送读写请求即可。

节点和读写器之间的交换过程比较简单。当两者进行连接后,读写器将以该节点为目的节点的数据包发送给该节点,读取节点新产生数据包,完成整个通信过程。通常在1s内可以完成读写器对节点的几十次读或写,因此足够在1s内完成整个通信过程。当然,在通讯中可能出现节点移动出读写器覆盖范围的情况,这个问题可以让节点在原地暂时停留1s来解决。在实际过程中,1s对节点整体移动的影响是可以忽略的。

另外,读写器之间也可以进行数据交换,这主要靠数据管理系统实现。由于读写器是固定设施,通常可以接入有线网络,因此实现它们之间的数据共享通常是比较容易的。在这种无线网络的路由方法中,一半的副本就放在了每个读写器上。

#### 3.2 传输延时分析

由于数据包同时通过两种途径进行传递,而且两者没有相互影响,那么端到端的延时可以认为是两者之间较小的一个。下面分别对这两个延时长限进行分析。

(1)在无线网络传输中,假设网络区域、节点发射范围以及网络规模 $M$ 不发生变化,每个数据包的副本数量 $L$ 也是固定的,那么整个延时可以由分发副本和等待传递两个阶段构成。设 $MI$ 为会见时间间隔,即两个特定节点经过 $MI$ 时间会在统计意义上有一次相遇和传递数据的机会,那么某个节点遇到任意一个节点需要的时间为 $MI/(M-1)$ 。那么发送 $L$ 个副本,遇到 $L-1$ (自己保留一个)个不同节点的时间为:

$$MI(\frac{1}{M-1} + \frac{1}{M-2} + \dots + \frac{1}{M-L})$$

消息的目的节点如果并不在之前发送的 $L-1$ 个之中,那么就进入等待阶段,此概率为 $1 - \frac{L-1}{M-1} = \frac{M-L}{M-1}$ 。这 $L$ 个节点会见目的节点的时间都是独立的指数分布,那么等待时间为 $MI/L$ 。所以等待的延时为:

$$\frac{M-L}{M-1} \cdot \frac{MI}{L}$$

上面两个延时相加,就得到通过无线网络传输理论上最大延时的上限,即:

$$EMI\left(\frac{1}{M-1} + \frac{1}{M-2} + \dots + \frac{1}{M-L}\right) + \frac{M-L}{M-1} \cdot \frac{MI}{L}$$

(2)通过无线射频传输,同样假设网络区域、节点发射范围以及网络规模  $M$  不发生变化。另外读写器的个数  $N$ 、覆盖范围也是固定的,且不存在重叠的覆盖区域,那么一个数据包的传输延时可以由源节点到读写器、读写器共享数据、读写器到目的节点 3 部分组成。

任何一个节点在遇到任何一个读写器的时间在统计意义上是服从指数分布的<sup>[5]</sup>:

$$f(t) = \gamma e^{-\gamma t}$$

设网络中存在某个节点,其数据包产生的时刻记为开始时刻,给定某一时刻  $T_x$ ,在  $T_x$  之前,该节点遇到某个读写器的概率记为  $p(t < T_x)$ :

$$p(t < T_x) = \int_0^{T_x} f(t) dt = 1 - e^{-\gamma T_x}$$

那么在任意一时刻  $t(t < T_x)$ ,该节点遇到读写器的概率为:

$$f_d(t) = \frac{f(t)}{p(t < T_x)} = \frac{\gamma e^{-\gamma t}}{1 - e^{-\gamma T_x}}$$

因此节点从产生数据包开始到遇到某个读写器的期望时间为:

$$E(t) = \int_0^{T_x} t f_d(t) dt = \frac{1}{\gamma} - \frac{e^{-\gamma T_x}}{1 - e^{-\gamma T_x}} T_x$$

从上面可以看出,该期望值的上限为  $1/\gamma$ ,可以将这个时间上限记为  $a$ 。

读写器之间进行数据共享的时间间隔是固定的,由数据管理系统决定,可以用  $b$  作为读写器到读写器的延时光限。同样,数据在完成共享之后,可以看成是读写器产生了一个数据包,若要传递给某个节点,那么和节点到读写器的过程一样,经过  $a$  时间,节点与任意一个读写器接触,即可完成数据的传输。考虑到环境中存在多个读写器,所以总共的传输延时光限为  $2 * a + b$ 。

因此总的延时光限可以取上述两个延时光中较小的一个,因为只要有一种方式完成数据的传递,就可以认为数据成功到达目的地。

### 3.3 占用资源代价分析

受限洪泛的路由协议本身就是一种致力于合理利用网络资源的路由协议。我们在此基础上,将副本数减去一半。那么可以认为,它不会占用过多的网络资源,不会出现由于副本数量过多而导致缓冲区溢出,致使不得不丢弃某些尚未完成传递的数据包。而且相对于直接传送的路由协议,也不会出现让缓冲区基本空闲,而将全部的压力留给射频传输的情况。另一方面,从无线射频的角度来看,传输的数据包的数量是固定的。假设网络中总共数据包的数量为  $m$  个,那么通过射频进行数据传递的数量为  $m * 2$ ,即从源节点到读写器,再从读写器到目的节点,中间没有多余的过程。而且读写器由于是固定设施,可以安装较大的缓存,一般不会出现数据包丢弃的情况。读写器可以根据每个数据包的 TTL(time-to-live)值,定期将过期的数据包丢弃。

## 4 仿真实验

现有无线网络仿真平台都没有提供对无线射频技术的支

持,因此我们在 Ari Keränen and Jörg Ott 的 Opportunistic Network Environment (ONE) 平台上<sup>[6]</sup>编写了一个仿真程序,将无线网络和射频技术融合起来,并设计了一个小型城镇的仿真场景,用以检验基于无线射频的机会网络路由由协议的性能。该场景的区域大小为  $4\text{km} * 4\text{km}$ 。区域内由移动节点、读写器设施、道路、固定设施组成。移动节点分为 3 种:b 开头的节点表示 bus,这种节点沿着固定的道路运行,并会在终点进行一段时间的停留;c 开头的节点表示 car,这种节点可以在主干道路上移动,选择某个固定的设施作为目的地,到目的地后在设施处做一定的停留;以 p 开头的节点表示 person,这种节点可以在主干道路和次要道路上移动,同样选择某个固定的设施作为目的地,并在到达目的地后,可以进入设施内部运动。3 种节点的各种参数设置如表 1 所列。

表 1 3 种节点的参数设置

参数	bus	car	person
移动速度, m/s	8~10	10~15	0.5~1
个数	20	40	40
移动模型	固定线路	主干道路	所有道路和设施
停留时间, min	5	5~100	5~100
每小时产生数据包个数	10	3	2
数据包大小, k	5~100	5~100	5~100
无线覆盖半径, m	10	10	10
无线传输速率, kbps	250	250	250

从表 1 可以看出,整个场景中总共有 100 个节点。仿真的总时间设计为 12h,其中前 10 个 h,节点会依概率产生数据包。理论上,一次仿真过程中数据包的总数为 4000 个。数据包的大小为  $5\text{k} \sim 100\text{k}$ ,基本上为一封电子邮件的大小。我们将源决定雾等待和二元喷雾等待的副本数量设置为 12 个,那么在基于无线射频的路由协议中通过无线网络转发的副本的数量就是 6 个,另外 6 个副本从无线射频传递。场景设置 6 个固定的读写器,每个读写器的覆盖半径都设置为 150m,读写器与节点之间的通信速度为每秒 10 次读或写操作。

同时,我们在上述场景中实现了目前流行的传染路由 (EpidemicRouter, ER)、源决定喷雾等待 (Spray&Wait SW)、源决定二元喷雾等待 (Binary Spray&Wait, BSW)、单副本直接传递路由 (DirectRouter DR),进行相互之间性能的比较。下面分别从传输率、延时、网络负载 3 个方面对各种路由的性能进行评价。

#### (1) 传输率

在试验中改变节点缓冲区的大小,分别设置为 5M, 10M, 20M, 40M,采用 FIFO(先进先出)策略,在缓冲区已经满的情况下将最先进入的数据包丢弃。同时将目标延时设置为无限大。理论上随着缓冲区的增加,数据包的传输成功率应该增加,缓冲区的大小在到达某个阈值之后,可以基本满足路由需要,因此缓冲区的增加对传输率的提高就微乎其微了。试验的结果如表 2 所列。

表 2 不同协议在不同缓冲区条件下的传输成功率

	传染路由	单副本直接传递	喷雾等待	二元喷雾等待	基于无线射频
5M	27.80%	46.13%	71.48%	80.02%	94.70%
10M	32.06%	46.36%	83.01%	84.02%	95.73%
20M	46.39%	46.73%	90.81%	91.76%	97.33%
40M	61.86%	44.62%	90.40%	92.00%	96.80%

从表 2 可以看出,传染路由受缓冲区大小的影响很明显,

在缓冲区资源不足的情况下,由于广播的数据包太多,导致出现缓冲区溢出,因此不得不丢弃尚未到达目的地的数据包。这样致使数据包不停地产生、不停地复制、又被不停地丢弃,而最终无法达到目的节点。在小于10M缓冲区的条件下,其性能还不及单副本直接传递路由,甚至在40M的缓存条件下其传输成功率也只有60%,明显还是无法满足要求。我们在额外的实验中,将缓冲区大小设置为一个非常大的值,得到了接近98%的比较理想的传输成功率。其它几种路由对缓冲区的要求较小,基本上10M的缓冲区已经可以保证协议的正常运行,而单副本直接传递路由完全不受缓冲区大小的影响。在结果中可以看到,我们提出的基于无线射频的路由协议的性能十分出色,数据包的传输成功率保持在95%以上,已经接近大缓存下的传染路由协议的性能,但是所需的缓存却是很少的。同时我们可以看到喷雾等待路由协议在10M的缓存条件下传输成功率也可以达到80%,而将其的一半副本通过无线射频的方式进行传输的策略可以进一步提高传输的成功率,这证明了基于无线射频的路由方案是完全可行的。

### (2) 延时

端到端延时也是衡量协议性能的一个重要指标,在本试验中,将缓冲区的大小设置为10M。将目标延时分别设置为7200s,14400s,21600s和不限时。在转发中的所有数据包,无论是通过无线网络还是通过无线射频,都将在达到目标延时后被丢弃。从理论上说,目标延时越大,数据包的生命周期也就越长,其被成功传送到目的地的概率也就越大,相应的整体传输率也会增加。与此同时会在网络中留下更多的数据包,占用更多的网络资源。仿真的结果如表3所列。

表3 不同协议在不同目标延时下的实际延时

	传染路由	单副本直接传递	喷雾等待	二元喷雾等待	基于无线射频
7200s	3344s	2826s	3129s	3105s	1622s
14400s	4840s	5458s	4838s	4820s	2587s
21600s	5285s	7482s	5603s	5242s	2618s
infinity	4784s	10435s	5658s	5531s	2785s

从表3可以看出,随着目标延时的增加,各种协议的端到端的延时都有所增加,两种喷雾等待路由和我们提出的基于无线射频的路由在目标延时大于14400s的时候趋于稳定。这一点与在3.2节中给出的分析是一致的:存在一个延时的上限。同时可以看到,我们提出的基于无线射频的路由协议由于数据包采用了无线射频的传输途径,因此端到端的延时是最小的,甚至低于传染路由。这也说明了通过无线射频传输数据,是合理有效的。另外,传染路由并没有表现出最小的端到端的延时,这主要是受到缓冲区大小和移动模型的限制。

### (3) 网络负载

网络负载是一个动态的性能指标,可以实时地表明网络中缓冲区的使用情况。在这组试验中,我们固定缓冲区的大小为10M,目标延时分别设置为14400s,每隔1h,记录仿真场景中所有节点的使用缓冲区的总和。对于我们提出的基于无线射频的路由协议,分别统计节点使用缓冲区的情况以及读写器使用缓冲区的情况,将其总和记为整体使用缓冲区的情况。仿真的结果如图1所示。

从结果中可以看到,在大约4h后,各种路由协议的负载趋于稳定。由于在10h后,数据包不再产生,因此各种路由的负载有所下降。从图中可以看到,传染路由协议基本使用了

所有的缓冲区,而单副本直接传递路由协议对缓存的使用却是很少的,这完全符合相关理论。另外,我们提出的基于无线射频的路由协议使用的全部缓冲区大约为800M,与喷雾等待路由相比,大约多了100M。但这其中只有500M是节点使用的缓冲区,另外300M的数据是在读写器上的。而读写器作为固定设施,完全可以提供比较大的缓冲区。由此可见,提出的基于无线射频的路由协议使用的缓存大小虽然略高于喷雾等待路由,但是缓存分配合理,因此是完全可以接受的。

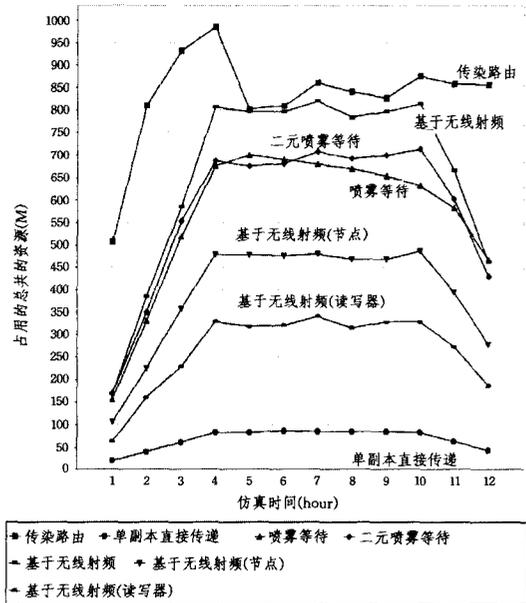


图1 不同协议的缓冲区使用情况

下面使用同样的参数,再统计一下整个仿真过程中发送和接收数据包的总共流量(单位:兆)。同样,对于提出的基于无线射频的路由协议,我们分别统计节点使用无线网络的总流量以及使用无线射频的总流量,将其总和记为网络中的全部流量。仿真的结果如表4所列。

表4 不同协议总共数据流量的比较

	传染路由	单副本直接传递	喷雾等待	二元喷雾等待	基于无线射频
流量	34987M	66M	2407M	2366M	1740M

从表4可以看到,和喷雾等待路由相比,基于无线射频的路由协议总共的流量更少。这主要是因为节点和读写器之间对每个数据包只进行一次数据传输,而读写器之间数据包的复制可以通过有线网络完成。这样不仅可以减少射频读写次数,还可以减少无线网络流量,最终将整个流量控制在令人满意的范围内。

**结束语** 无线射频具有传输距离远、可靠性高、受环境因素影响小等特点,正好迎合了机会网络中复杂的网络环境。将其引入机会网络中,进行数据的传输,可以很好地减少端到端的延时,并能保证传输的成功率。在以后的工作中,至少可以在以下方面继续深入研究:(1)目前所有节点都具有无线射频的传输能力,在真实环境中,可能只是部分节点具有射频读写接口,那么就可以形成读写器、射频节点、普通节点的三层网络结构;(2)效用问题,本文提出的基于无线射频的路由协议并没有考虑节点的效用信息以及上下文信息等可用信息。

(下转第96页)

-10	5.242	5.428	4.529
-11	7.835	7.961	6.748
-12	11.619	11.677	9.490
-13	16.732	17.439	13.980
-14	23.141	23.521	19.780

2) 次级用户对主用户的干扰情况。次级用户对主用户的干扰情况如图 5 所示。由图 5 可知,在 3 种方案中,次级用户对主用户的干扰都随着信噪比的降低而减弱。这是因为在低信噪比下,次级用户需要耗费更多的时间进行频谱感知,从而减少了留给数据传输的时间,于是次级用户对主用户可能造成的干扰也相应减轻了。在该评价指标下,采用流水线架构的方案要好于传统方案。这是因为与传统方案相比,流水线架构拓宽了频谱检测时间窗口,从而能够有效地跟踪频谱状态变化,及时检测到授权频段从闲到忙的状态变化。对比 PF-MTSPRT 方案,PF-SPRT 方案对主用户提供了更好的保护,这是因为 SPRT 方法要比 MTSRPT 方法消耗更多的感知时间。

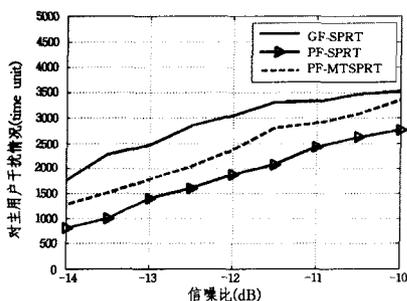


图 5 次级用户对主用户的干扰情况

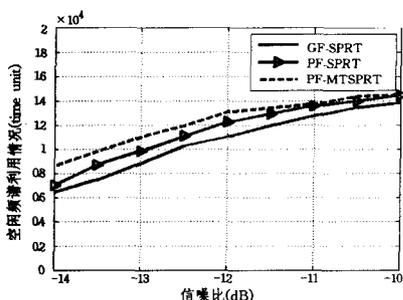


图 6 空闲频谱利用效率

3) 空闲频谱利用效率。图 6 给出了 3 组方案的空闲频谱利用效率的情况。由图 6 可知,采用流水线架构的方案要好于传统方案,其中 PF-MTSPRT 方案的频谱效率最高。可以看出,一个加宽了的频谱检测时间窗口有助于及时发现授权频段从忙到闲的状态变化,从而可以更有效地利用空闲频谱。而 MTSRPT 方法通过加快次级用户对频谱状态变化的反应

速度,进一步地提高了空闲频谱利用效率。可是,随着信噪比的增大,3 种方案之间的性能差异逐渐减少,这是因为随着信噪比的提高,达成判决所需的平均感知结果数目逐渐变小,也意味着检测时间窗口的宽度会逐渐缩小,于是对于流水线方案来说检测到频谱状态变化的可能性也随之降低,因此通过流水线方案得到的增益也会逐渐消失。

**结束语** 本文提出了一个基于流水线架构的协作式频谱感知方法和与之相搭配的快速数据融合算法。通过充分利用感知结果回传的时间开销,新方案提供了一个更宽的检测时间窗口,提高了协作感知时间效率。通过同时运行多个 SPRT 进程,基于多线程程序贯似然比检测的快速融合算法有效提高了对频谱状态变化的反应速度。实验结果表明,本文提出的流水线方案搭配多线程程序贯似然比检测快速算法能够有效地提高协作式频谱感知的性能。

## 参考文献

- [1] Mitola J. Software Radio Architecture [M]. John Wiley & Sons, 2000
- [2] Ghasemi A, Sousa E S. Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments [C]//Proc. of IEEE DYS-PAN, 2005
- [3] Mishra S M, Sahai A, Brodersen R W, et al. Cooperative sensing among cognitive radios [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2006
- [4] Ghasemi A, Bian K. Spectrum sensing in cognitive radio networks; the cooperative-processing tradeoff [J]. Wiley Wireless Commun. and Mobile Comp. Special Issue on Cognitive Radio, Software-Defined Radio, and Adaptive Wireless Systems, 2007, 7 (9): 1049-1060
- [5] Song C, Zhang Q. Sliding-window algorithm for asynchronous cooperative sensing in wireless cognitive networks [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008
- [6] Ma J, Li Y G. Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks [C]//Proc. of IEEE GLOBECOM, 2007
- [7] Zhang W, Mallik R K, Letaief K B, et al. Cooperative spectrum sensing optimization in cognitive radio networks [C]//Proc. of IEEE International Conference on Communications, 2008
- [8] Digham F F, Alouini M-S, Simon M K. On the energy detection of unknown signals over fading channels [C]//Proc. IEEE International Conference on Communications (ICC'03), May 2003
- [9] Varshney P K. Distributed Detection and Data Fusion [M]. New York: Springer-Verlag, 1997
- [10] Min A W, Shin K G. Exploiting multi-channel diversity in spectrum-agile networks [C]//Proc. IEEE INFOCOM'08, Apr. 2008

(上接第 69 页)

研究表明,合理利用这些信息可以进一步缩减消息发送时延并减少路由代价。

## 参考文献

- [1] Phillips T, Karygiannis T, Kuhn R. Security standards for the RFID market [J]. Security & Privacy Magazine, IEEE, 2005
- [2] Pelusi L, Passarella A, Conti M. Beyond MANETs; dissertation on Opportunistic Networking [R]. IIT-CNR, May 2006
- [3] Su J, Chin A, Popivanova A, et al. User Mobility for Opportunistic Ad-Hoc Networking [C]//Proceedings of the 6th IEEE Workshop on Mobile Computing System and Applications (WMCSA), UK, December 2004
- [4] Spyropoulos T, Psounis K, Raghavendra C S. Spray and wait: Efficient routing in intermittently connected mobile networks [C]//Proceedings of ACM SIGCOMM Workshop on Delay Tolerant Networking (WDTN), 2005
- [5] Abdulla M, Simon R. The Impact of the Mobility Model on Delay Tolerant Networking Performance Analysis [C]//Proceedings of the 40th Annual Simulation Symposium, IEEE, 2007
- [6] Keränen A, Ott J. Increasing Reality for DTN Protocol Simulations [R]. Networking Laboratory, Helsinki University of Technology, 2007