

# 基于跳频的自适应频谱共享方案

刘 琪<sup>1</sup>, 苏 伟<sup>2</sup>, 李承恕<sup>2</sup>

(1. 清华大学电子工程系信息网络与复杂工程系统实验室, 北京 100084;

2. 北京交通大学电子信息工程学院, 北京 100044)

**摘 要:** 本文针对异种网络之间的频谱共享问题, 提出了基于跳频的自适应频谱共享方案. 该方案中, 频谱注册网络负责配置跳频频率表等跳频参数, 并且将其在覆盖区域内广播. 频谱共享网络中的可重构终端 (CR-MTs) 使用认知无线电 (CR) 技术对周围频谱进行监测, 通过跳频频谱共享策略实现通信. 本文设计了跳频频谱共享的信号发射模型和信令交换机制, 提出了不同情况下的干扰避免 (IA) 策略. 最后, 对跳频频谱共享方案的性能进行了分析, 基于干扰计算模型得到的仿真结果表明该方案具有较好的 IA 性能.

**关键词:** 频谱共享; 干扰避免; 跳频; 认知无线电

**中图分类号:** TN929 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2010) 01-0105-07

## Adaptive Spectrum Sharing Scheme Based on FH Communications

LIU Qi<sup>1</sup>, SU Wei<sup>2</sup>, LI Cheng-shu<sup>2</sup>

(1. Department of Electronics Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Modern Telecommunications Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** An adaptive spectrum sharing (SS) scheme based on frequency hopping (FH) communications are raised for solving SS problems among heterogeneity networks. In this scheme, the networks with spectrum registration are responsible for configuring the parameters of frequency hopping communications, such as FH frequency lists, which are broadcasted in their coverage area. In the SS networks, the reconfigurable terminals named CR-MTs monitor the ambient spectrum context through cognitive radio (CR) technology, and their communications are realized according to the FH-IA (frequency hopping - interference avoidance) scheme. In this paper, the transmission model and signaling exchange mechanism in FH - IA scheme are designed. And the interference avoidance (IA) strategies in different conditions are also given. Finally, the performance of FH-IA scheme is analyzed, and simulation results based on the interference calculation model reveal that this scheme has better IA ability.

**Key words:** spectrum sharing; interference avoidance (IA); frequency hopping (FH); cognitive radio (CR)

### 1 引言

众所周知, 频谱资源在无线通信中是非常宝贵的. 随着新的无线通信方式和业务应用的不断涌现, 频谱资源的使用已经变得越来越拥挤, 无法满足用户日益增长的业务需求. 由美国联邦通信委员会 (FCC) 公布的数据显示<sup>[1]</sup>: 在 30MHz ~ 3GHz 的频谱范围内, 几乎所有的电磁频谱都已经分配给现有的业务应用, 但是大部分固定分配的频谱资源利用率很低. 这主要是因为频谱注册网络对所分配频谱的使用在时间和空间上都是不连续的, 但是即使在注册网络没有使用这些频谱的时间和地区, 其他网络也不能够使用, 因而造成了频段利用率不均匀和很大程度上的频谱浪费. 由此可见, 频谱资源并不是真正的紧缺, 而是由于目前的频谱分配管理机制造成了

频谱利用率的低下. 所以, 我们需要从新的角度去开发频谱资源, 从时间、空间、异种网络之间等各个方面协调利用频谱, 进一步提高频谱资源的利用率.

异种网络之间频谱共享 (SS: Spectrum Sharing) 的基本思想是: 在频谱注册网络 (记为网络 A) 不使用其频段的时间和地区, 非频谱注册网络 (用  $E = \{E_k\}_{k=1,2,\dots,K}$  表示 K 个非频谱注册网络) 能够使用该频段, 即实现 A、E 对注册频谱的时间/空间复用. 但是, 必须保证网络 E 对频谱的使用不能够影响到 A 的正常通信, 同时尽量满足网络 E 的通信需求. 目前, 世界范围内很多国家的大型研究机构已经对此展开了研究工作, 并且取得了一些研究成果. 欧洲 IST 第六工作框架 (FP6) 提出了网络间的频谱租借、频谱池概念 (Spectrum pool)、动态频谱分配 (DSA: Dynamic Spectrum Allocation) 机制等频谱共享

策略<sup>[2,3]</sup>.美国 FCC 也提出开放 TV 频段作为新的异种网络共享频段,并且已经公布了规范建议<sup>[4]</sup>.IEEE802.22 已经针对 TV 频段共享提出了 WRAN(Wireless Region Access Network)技术草案<sup>[5]</sup>.

现有的频谱共享机制主要可以分为 3 类.第一类是基于网络 A、E 之间频谱协商的共享机制<sup>[2]</sup>.该机制中网络  $E_i (i \in [1, K])$  不需要获取周围频谱的使用情况,只要与同一覆盖区域内的网络 A,以及其它频谱共享网络  $E_j (j \in [1, K] \text{ 且 } j \neq i)$  协商工作频段,避免频谱冲突即可.设计频谱协商算法是该机制的重点,需要考虑到频谱使用的公平性原则.该机制虽然能够在一定程度上提高频谱利用率,但是要找到具有优良性能的频谱协商算法并不是一件简单的事情.另外,它不够灵活,提高频谱利用率的能力有限,还不足以做到充分地利用无线频谱资源.因此本文对该机制不做过多讨论.第二类是基于扩频的宽带低功率通信机制<sup>[6]</sup>(记为 WB).该机制不需要进行频谱协商,网络 E 内的终端使用扩频技术进行通信,不过必须将其发射功率限制在网络 A 能够容忍的干扰范围内.扩频技术虽然能够降低网络 E 的平均发射功率,但是如果 E 内的用户比较密集,很可能会由于叠加效应而造成对网络 A 的通信干扰.FCC 在 2002 年底提出了干扰温度(IT: Interference Temperature)概念<sup>[3,7]</sup>来对频谱共享引起的干扰进行量化和管理,关于 IT 概念的有效性还存在争议,有待于证实.第三类是基于频谱监测和干扰避免(IA: Interference Avoidance)的定频窄带通信机制<sup>[6,8]</sup>(记为 NB-IA).该机制要求网络 E 内的终端能够使用认知无线电(CR: Cognitive Radio)<sup>[3,9]</sup>技术监测网络 A 的通信参数,当网络 E 发现与 A 发生频段碰撞时,则放弃使用该频段,寻找新的空闲频段进行通信.这就要求网络 E 内的终端是基于 CR 技术的可重构终端<sup>[10,11]</sup>(记为 CR-MTs).CR 技术是由 Joseph Mitola 提出的,Simon Haykin 在文献[3]中对其做了如下定义:“认知无线电是一个智能无线通信系统.它能够感知外界环境,并使用人工智能技术从环境中学习,通过实时改变某些操作参数(比如传输功率、载波频率和调制技术等),使其内部状态适应接收到的无线信号统计特性变化,以达到如下目的:(1)任何时间、任何地点的高度可靠通信;(2)对频谱资源的有效利用.”因此,CR-MTs 在通信过程中能够对周围频谱占用情况进行检测,并且根据检测结果调整自身的通信频段,避免对网络 A 的通信造成干扰.后文中将对干扰避免策略进行详细探讨.但是,NB-IA 机制中 CR-MTs 对通信信道的频谱监测需要暂时中断在该频段的通信,将会影响用户的通信性能<sup>[12]</sup>;而且在寻找空闲频段的过程中,CR-MTs 需要使用 CR 技术进行快速的宽带频谱扫描<sup>[3]</sup>,不易实现;另外,无规律的突发频段转换会给网络 E 的正常运行带来较大的挑战.总之,上述 3 类机制各有利弊,也有将上述 3 类

机制相结合的一些改良策略,但是都还处于初步讨论阶段,实现起来都面临着很大的困难.

本文在频谱监测和干扰避免的基础上,提出了一种新的基于跳频的频谱共享机制(记为 FH-IA).该机制中网络 E 使用跳频技术进行通信,文中重点针对 CR-MTs 的跳频方式和 IA 策略进行了设计和探讨,不仅提高了频谱共享过程中对网络 A 正常通信的保障能力,同时还兼顾到了网络 E 的通信性能,并且在一定程度上降低了频谱监测的难度.

## 2 FH-IA 频谱共享机制

### 2.1 FH-IA 频谱共享策略

在异种网络之间的频谱共享中,网络 E 对共享频段的使用必须满足频谱规范部门的要求,同时还要尽量保证网络 A 的正常通信.本文提出的 FH-IA 机制中,要求网络 A 是具有固定通信设施的无线通信网络(如 TV 网络、蜂窝网络等),它可以通过基站向周围广播关于频谱共享的信息和参数,这样就增强了网络 A 对频谱共享的主导作用.另一方面,基于 CR 技术的网络 E 可以分为 3 种网络架构:集中式(如 IEEE 802.22 WRAN<sup>[5]</sup>)、分布式(如 CogNet)和混合式(如 xG 网络).FH-IA 机制中网络 E 内的 CR-MTs 具有较强的干扰避免能力,更适用于分布式和混合式的网络架构,后文将重点探讨其干扰避免策略和通信方式.

首先,网络 A 根据自身信道情况和不同业务类型,创建多组跳频频率表,以及相应的带宽、跳频序列、跳频间隔等参数,这些信息将作为频谱共享规范参数在覆盖区域内广播,供频谱共享网络 E 选择使用.创建跳频频率表时,应该把网络 A 中重要信道(如导频信道)所在的频段剔除,在制定和分配跳频频率表的过程中,网络 A 还需要考虑到自身频谱的使用原则、业务信道的分配机制等条件.确定跳频带宽和跳频间隔时,也需要考虑到网络 E 内各种不同业务类型的通信需求.跳频序列是由伪随机(PN)码生成的,通常使用  $m$  序列,由基于 L-G 模型的非连续抽头模型<sup>[13]</sup>构造而成.构造跳频序列需要确定的参数包括生成  $m$  序列的本原多项式、抽头数目和位置、初始相移等,这些参数都以广播形式向网络 E 公布.下面以蜂窝网为例说明跳频频率表的基本分配方式.如图 1 所示,网络 A 的基站(BS)将创建的  $N$  个跳频频率表分为 3 组,在 3 个不同区域内使用,每个频率表含有  $M$  个载频.每个区域内的频率表数目可以是固定的,也可以根据环境条件的变化而改变.

跳频序列可以分为三类:(i)由一个序列的不同位移构成的正交跳频序列族,该序列族只能用于同步正交组网;(ii)由不同序列构成的正交跳频序列族,该

序列族中任意两个序列在任何时延下的最大碰撞次数为 1<sup>[13]</sup>,同步、异步组网均可使用;(iii)非正交跳频序列族,通常用于同步非正交组网.上述三组跳频序列族可以在不同的 IA 方案中使用,详见后文.

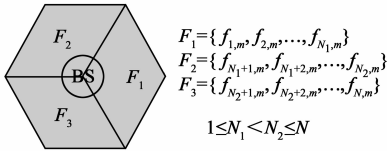


图1 跳频频率表的区域分配示意图

然后,网络 E 根据预先频谱检测情况和自身业务需求,按照一定的算法选择适合的跳频参数,在本地生成跳频序列,使用跳频技术进行通信.在通信过程中,E 内的 CR-MTs 动态实时地获取周围环境中网络 A 的频段占用情况,随时调整自身的通信策略.

### 2.2 FH-IA 的跳频通信机制

假设一对 CR-MTs 处于蜂窝网络的覆盖范围内,共享蜂窝网络的频谱进行通信,但是不能够影响到蜂窝网内的传统终端(记为 LR)对 BS 通信信号的正常接收,如图 2 所示.

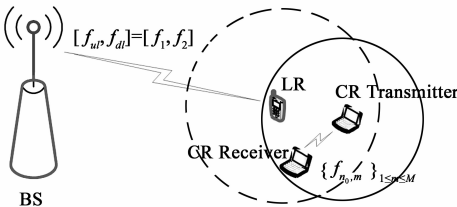


图2 蜂窝网与一对CR-MTs的FH-SS示意图

首先,协商通信参数. CR-MTs 根据自身能力、业务需求和前期频谱检测结果,按照一定的算法协商选取一个跳频频率表  $\{f_{n_0,m}\}_{1 \leq m \leq M} = \{f_{n_0,1}, f_{n_0,2}, \dots, f_{n_0,M}\}$ ,  $n_0 \in \{1, 2, \dots, N\}$ ,确定跳频序列、跳频间隔等参数,建立收发两端的跳频同步.

然后,CR-MTs 之间按照跳频图案进行通信,同时监测各自所处环境中的通信频段占用情况,图 3 给出了 CR-MTs 的跳频信号发射方框图.在跳频通信过程中,CR-MTs 将不对当前时刻使用的跳频频段进行监测,这

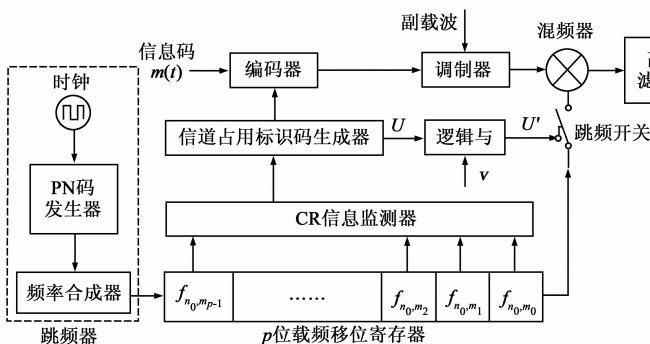


图3 CR-MT跳频信号的发射

就要求跳频间隔  $T_h$  小于网络 A 内收发信机之间通信能够容忍的最大信号中断时间  $\xi_0$ ,即  $T_h < \xi_0$ .由于监测频段与通信频段是不同的,所以 FH-IA 机制中 CR-MTs 的频谱监测不会影响用户的正常通信.为了提高 CR-MTs 的 IA 能力和自身的通信性能,CR-MTs 收发双方都需要对后面  $p(p \geq 1)$  个跳频间隔内的通信信道进行检测,查看这些频段的占用情况.所以,跳频器需要预先计算出后面的  $p$  个跳变载频,将这些载频输入 CR 信道监测器中,对周围的信道占用情况进行勘查,然后将监测结果生成“信道占用标识码”.这些标识码将输入编码器,生成控制帧在收发两端之间传递.当监测对象(即监测频段)或者监测结果发生变化时,CR-MTs 之间需要更新“信道占用标识码”信息,所以在每次频率跳变后通信双方至少执行一次控制帧的信令交换操作.如果信道环境发生突变,影响到“信道占用标识码”的传送,CR-MTs 可以通过盲发<sup>[13]</sup>或暂时定频通信等方式交换该信令.图 4 给出了 CR-MTs 收发两端  $t_0$  时刻的信道占用标识码.由于 CR-MTs 收发两端所处位置和环境不同,因此监测结果会有所差异.上述检测方式能够预先获取信道占用情况,增强 CR-MTs 收发两端的相互了解,便于 CR-MTs 对未来通信信道的预测和估计,为后面 IA 策略的选择、协商和实现赢得时间.参数  $p$  可以根据 CR-MTs 的监测能力、通信的 QoS 要求等条件协商确定.在同步建立阶段,CR-MTs 之间的通信功率应该进行盲调整<sup>[13]</sup>,保证同步的正确建立;在保持通信阶段,CR-MTs 之间应该按照误比特率最小原则或等信干比原则<sup>[13]</sup>调节发射功率,尽量降低 CR-MTs 通信的干扰范围.

|                    |     |       |       |       |       |                   |
|--------------------|-----|-------|-------|-------|-------|-------------------|
| 0                  | ... | 0     | 1     | 0     | 0     | check codes       |
| $T_{p-1}$          | ... | $T_3$ | $T_2$ | $T_1$ | $T_0$ | 0:信道无占用<br>1:信道占用 |
| (a) CR Transmitter |     |       |       |       |       |                   |
| 0                  | ... | 1     | 0     | 0     | 0     | check codes       |
| $T_{p-1}$          | ... | $T_3$ | $T_2$ | $T_1$ | $T_0$ |                   |
| (b) CR Receiver    |     |       |       |       |       |                   |

图4 信道占用标识码

### 2.3 FH-IA 的干扰避免 (IA) 策略

#### 2.3.1 IA 策略的总体思想

异种网络之间的频谱共享中需要引入新的性能参数:(1)  $D_u$ <sup>[4]</sup>:表示 LR 能够容忍的有用信号与来自 CR-MTs 的干扰信号之间功率比 ( $D/U$ ) 的最小值,即如果 LR 的  $D/U$  值小于  $D_u$ ,那么将造成 LR 的通信中断;(2)  $P_{th0}$ :由于频谱共享造成 LR 通信中断的概率记作  $P_{th}$ <sup>[6]</sup>,网络 A 能够容忍的  $P_{th}$  上限定义为  $P_{th0}$ .在其它条件不变的情况下,如果  $D_u$  增大,  $P_{th}$  就会随之提高,当  $P_{th} > P_{th0}$  时,频谱共享通信就会影响到网络 A 的正常运行.一般情况下,  $D_u$  越

大,  $P_{th0}$  越低, 网络 A 的通信就受到越多的保护, 但是其提供频谱共享的能力就越低; 相反,  $D_u$  越小,  $P_{th0}$  越高, 越有利于网络 E 实现频谱共享, 但是网络 A 受到干扰的可能性也就越高。

在分布式和混合式的频谱共享网络架构中, 终端必须具备较强的自主工作能力. 图 5 给出了 FH-IA 机制中 CR-MTs 的工作流程. 首先, CR-MTs 从广播信息中获取相关的 SS 参数, 包括  $D_u$ 、 $P_{th0}$  等. 并且根据自身的业务需求 (如业务 QoS) 提取与频谱占用相关的通信参数 (如信道带宽). 然后, CR-MTs 根据上述参数, 使用 CR 技术进行信道检测, 得出可以使用的跳频频率表等工作参数. 最后, CR-MTs 通过与网络 E 内中心控制点或者其它通信终端的协商, 按照优化选择运算, 确定选用的跳频通信参数, 实现自身通信. 在通信过程中, CR-MTs 需要实时地监测跳频频率表中通信频段的占用情况, 获取信道监测参数, 对本身的通信进行干扰判断. 如果 CR-MTs 发现自身通信性能过低 (如业务 QoS < 门限值), 或者对其它用户造成通信干扰的可能性较大 (即  $P_{th} > P_{th0}$ ), 则需要执行 IA 方案. 关于干扰判断的方法详见文献 [14, 15], 下面本文将给出具体的 IA 方案.

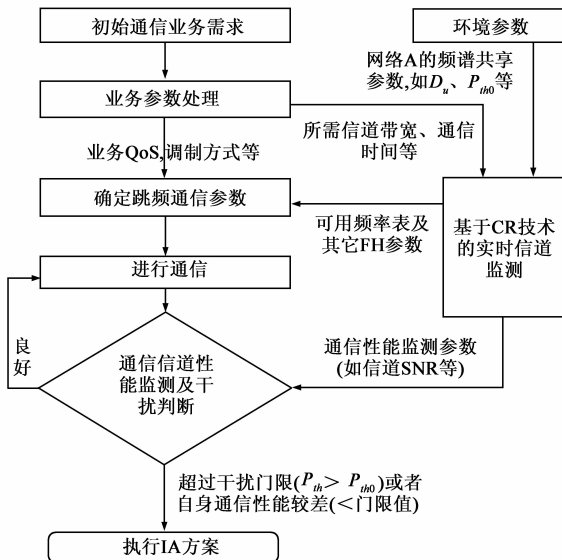


图5 FH-IA机制中CR-MTs的工作流程

### 2.3.2 IA 方案

传统自适应跳频通信的频率控制技术主要是通过剔除坏频率, 替换为好频率, 即整个跳频通信网络中跳频频率表的配置和更新来实现的<sup>[13]</sup>. 但是在异种网络的频谱共享中, 信道环境的变化更加频繁, 每个终端所处的无线通信环境也各不相同, 使用传统自适应频率控制技术会导致跳频频率表的不稳定和频谱资源的浪费.

本文提出的 IA 方案在不改变跳频频率表的前提下, 对 CR-MTs 的信号发射机制做适当调整, 实现异种

网络之间的频谱共享. 首先, CR-Transmitter (CR-Receiver) 在收到对方的信道占用标识码  $V(U)$  后, 与自身检测所得的标识码  $U(V)$  进行逻辑“与”运算 (见图 3), 即  $U' = V = U \cap V$ , 所得的结果  $U'(V)$  作为双方 IA 决策的依据. 这样做一方面是为了增强 CR-MTs 通信的 IA 能力; 另一方面是为了保证 CR-Receiver 的接收 SNR 要求, 同时可以帮助解决隐蔽接收机问题<sup>[16]</sup>. 然后, CR-MTs 根据检测结果, 针对不同的组网方式、业务需求和参数指标, 选择适合的 IA 方案实现通信. 下面对几种可能出现的情况和相应的 IA 方案进行具体阐述.

(1) 正常跳频通信: 在下一个跳频间隔  $T_0$  对应的跳频频段为空闲的时候, CR-MTs 之间保持正常的跳频通信方式. 图 4 中 CR-MTs 收发两端在时段  $T_0$  的信道占用标识码都显示该跳频频段是空闲的, 将其对应的标识码 ‘0’ 做为控制指令输出给跳频开关, 使得跳频开关闭合 (见图 3), 那么 CR-MTs 之间就可以在  $T_0$  时段使用载频  $f_{n_0, m_0}$  进行正常通信.

(2) “暂停等待”方案: 总体思想是发现频段占用则暂停信号发射, 保持跳频参数不变, 等待跳频频段空闲再继续通信. 适用于  $T_h$  较小或者业务 QoS 时延要求较低的情况. 仍以图 2 为例, 如果准备在下一个跳频间隔  $T_0$  使用的频段  $f_{n_0, m_0}$  对应的信道占用标识码变为  $U' = '1'$ , 其它频段的信道标识码仍然如图 4 所示. 那么 CR-Transmitter 就会在  $T_0$  时段将跳频开关断开, 取消该频段的发射, 但是发射频率的跳变规律和跳频间隔都保持不变. 也就是说, CR-Transmitter 在  $T_0$  时段保持安静, 等到  $T_1$  时段使用其对应的  $f_{n_0, m_1}$  频段再继续传送信息. 此时应该通过“续传标志码”通知 CR-Receiver 续传信息的衔接断点, 即上次通信暂停的时间和所用载频, 当然还要指出该信息帧应与前面哪个信息帧相邻. 由于控制帧的交换, CR-Receiver 也会在  $T_0$  时段内暂停通信, 在  $T_1$  时段使用同步载频  $f_{n_0, m_1}$  对信号进行接收处理, 根据“续传标志码”确认自己是否丢失数据. 但是如果跳频频段被连续占用, 就可能出现重复等待的情况, 这样会造成延迟过大. 为了防止出现这种等待过长的现象, CR-MTs 之间在建立通信的初始阶段, 应该根据业务延迟要求  $\tau > kT_h$  ( $k$  为正整数) 确定最大等待时间  $\Delta_{\max}$ . 如果实际等待时间超过  $\Delta_{\max}$ , 就说明该跳频频率表的大部分频率可能正在被占用, 那么 CR-MTs 需要重新协商跳频参数, 再次建立通信. 该方案能够应付突发的频段碰撞, 适用范围较广, 在跳频序列族 (i)、(ii)、(iii) 组成的同步、异步跳频网络中均可使用, 而且操作比较简单.

(3) “预测删除”方案: 总体思想是根据多次检测结果推断频段占用情况, 将可能会造成干扰的“危险频

段”从发射载频寄存器中暂时删除.在图 4 所示的信道占用标识码中,如果在  $t_0$  时刻发现预计在  $T_q$  ( $q < p$ ) 时段使用的通信频率  $f_{n_0, m_q}$  被占用,而且一直到  $t_0 + qT_h$  时刻都保持被占用状态,即该频段对应的信道占用标识码在  $q$  个跳频时段内一直都是‘1’,那么 CR-MTs 将会放弃使用该频段.在  $t_0 + qT_h$  时刻把频率  $f_{n_0, m_q}$  从“ $p$  位载频移位寄存器”中删除,后面的载频向前推移一位,其它跳频参数都保持不变,继续按照图 3 给出的跳频信号发射框图进行通信.其中参数  $q$  的选择将影响到频段占用判断的准确性.注意,这里并不是将频率  $f_{n_0, m_q}$  从跳频频率表中删除,因为在频谱共享过程中频段的占用情况变化很快,当跳频序列中下一次出现载频  $f_{n_0, m_q}$  时,很可能该频段已经处于空闲状态.该方案还可以推广到连续  $l$  ( $l \geq 1$ ) 个跳频信道被长时间占用的情况.“预测删除”方案能够减少频率碰撞的发生,提高网络 E 的通信性能.它适用于跳频频率表中某个频段被长时间占用的情况.因为该方案使得 CR-MTs 通信的跳频序列发生了位移,为了保持与其它通信跳频图案的准正交性,“预测删除”方案只能够用于跳频序列族(ii)组成的异步跳频网络.

(4)“多载波-频率分集”方案:总体思想是一对 CR-MTs 收发信机使用多个跳频频率表或者多个跳频序列,按照同样的跳频间隔进行通信.在同一跳频时段内,发射信号  $s(t)$  可以分解成多个子信号  $s_i(t)$ , 分别第  $i$  个跳频载波上传输<sup>[17]</sup>, 提高信息的传输速率;也可以将同样的发射信号  $s(t)$  在不同的跳频载波上同时传输,从而获得频率分集增益.该方案与方案(2)或(3)同时使用,能够在出现跳频频段占用的情况下进一步增强跳频通信的 QoS 保证能力,减少通信失败概率.它适用于对 QoS 要求较高的业务,但是要以占用更多的跳频资源为代价.使用该方案时需要注意跳频参数的选择,同一个频率表对应的不同跳频序列之间最好是正交的,即在跳频序列族(i)或者(ii)中选择.不同跳频频率表之间应该保持较大的频率差,以便获取有效分集增益.

上述 IA 方案都有各自的特点,在频谱共享过程中,网络 E 可以根据自身情况选择一个或者多个组合使用,尽量减少对网络 A 的干扰,提高自身的通信性能.

### 3 性能分析与仿真

#### 3.1 干扰计算模型

假设 CR-MTs 平均分布在以传统终端(LR)为圆心,半径无限扩展的圆形区域.单位面积内,处于信号发射状态的 CR-MTs 数量服从参数为  $N_i$  的泊松随机过程<sup>[18]</sup>,而且 CR-MTs 的信号发射是相互独立的.每个

CR-MTs 与 LR 使用相同通信频段的概率记为  $p_{sf}$ ,且  $p_{sf}$  与 CR-MTs 发射机的数量和分布无关.根据定理:按照独立分布对泊松过程进行抽取所得的子集仍然是泊松过程.所以单位面积内,影响 LR 通信性能的 CR-MTs 干扰源数量仍然是泊松随机过程,其参数为  $N_n = N_i \cdot p_{sf}$ .假设所有收发信机均使用全向天线,而且无线通信环境满足正态阴影衰落模型.如果干扰区域是以 LR 为圆心,以  $\epsilon$  ( $\epsilon \geq 0$ ) 为内半径( $\epsilon$  表示 CR-MTs 的最大检测距离), $a$  为外半径的环形区域  $D_{R,(\epsilon, a)}$ .当 CR-MTs 的发射功率都为 1 时,干扰总和变量记为  $X_{\epsilon, a}$ .本文通过基于干扰变量特征函数的数值方法<sup>[18]</sup>来计算  $X_{\epsilon, a}$  的统计值,  $X_{\epsilon, a}$  的特征函数为  $\phi_{X_{\epsilon, a}}(\omega, N_n) = E(e^{j\omega X_{\epsilon, a}})$ <sup>[18]</sup>,当  $a \rightarrow \infty$  时<sup>[6]</sup>,

$$\phi_{X_{\epsilon, \infty}}(\omega, N_n) = \exp\left(N_n \pi \epsilon^2 \left(1 - e^{j\omega \epsilon^a}\right) - N_n \pi (-j\omega)^\beta \Gamma_{inc}\left(\frac{\omega}{\epsilon^a}, 1 - \beta\right)\right) \quad (1)$$

其中  $\Gamma_{inc}(\cdot)$  表示不完全伽马函数.式(1)的计算量比较大,因此可以使用基于修正量的高斯近似算法做近似计算<sup>[6,19]</sup>.基于公式(1),可以得到 LR 的通信中断概率如式(2)<sup>[14,15]</sup>,其中  $P_{CR-t}$  表示 CR-MTs 的发射功率,  $P_r$  表示 LR 的有用信号接收功率.

$$P_{th} = P\left(P_{CR-t} X_{\epsilon, \infty} > \frac{P_r}{D_u}\right) = 1 - \frac{2}{\pi} \int_0^\infty \text{Re}\left(\phi_{X_{\epsilon, \infty}}(\omega, N_n)\right) \frac{\sin\omega\left(\frac{P_r}{D_u P_{CR-t}}\right)}{\omega} d\omega \quad (2)$$

#### 3.2 FH-IA 性能分析

频谱共享机制的通信性能主要包括对网络 A 的干扰避免效果、对网络 E 的通信保障能力和实现复杂度等.相对于前文提到的两个现有机制,即 WB 和 NB-IA 机制, FH-IA 机制有以下几个优势:

(a) FH-IA 机制中,由于跳频通信本身的特点,加之网络 A 对跳频参数的优化配置和 IA 方案,可以有效地降低频谱共享对网络 A 造成的影响.

根据前文给出的干扰计算模型,按照公式(2)给出的函数关系,本文对 FH-IA、NB-IA 和 WB 三种频谱共享机制进行了仿真,仿真参数如表 1 所示,这里令  $\epsilon = 10\text{m}$ ,图 6 给出了它们的  $D_u - P_{th}$  关系曲线.在 FH-IA 机制中,由于跳频参数的优化配置,降低了 CR-MTs 与 LR 使用相同频段的概率.值得注意的是, FH-IA 机制中即使 CR-MTs 的当前跳频信道对 LR 的通信造成了干扰,这种影响的持续时间也只会限制在跳频间隔  $T_h$  之内,只要保证  $T_h < \xi_0$ ,即使 CR-MT 的干扰功率高于  $D_u$  允许的上限,也不会导致 LR 的通信中断.所以 FH-IA 机制的干扰避

免性能优于 NB-IA. WB 机制在 CR-MTs 分布不太密集、 $D_u$  值较高的情况下, IA 性能相对稍好,但是随着  $D_u$  值变小,其性能明显低于其它机制,这是因为缺少信号监测功能,干扰叠加效应会对网络 A 造成很大的干扰.

表 1 仿真参数

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 泊松分布参数 $N_i$                        | 1   |
| 每个 CR-MTs 与 LR 使用相同通信频段的概率 $P_{sf}$ | 0.1 |
| 信道衰落损耗指数 $\alpha$                   | 4   |
| CR-MTs 发射功率 $P_{Cr_i}$ (mW)         | 10  |
| LTs 发射功率 $P_l$ (mW)                 | 10  |

(b) FH-IA 机制能够降低突发频谱碰撞对网络 E 通信性能的影响,而且 CR-MTs 的频谱监测能够与数据通信同时进行,更好地保障了网络 E 的通信 QoS.

对于突发的频段碰撞, NB-IA 机制中 CR-MTs 必须立即停止使用该频段,寻找新的空闲频段通信,宽带频谱扫描和 CR-MTs 收发信机重新建立通信都会带来通信延迟,时延约为秒级.在 FH-IA 机制中,突发频段碰撞引起的延迟一般为  $T_h$ ,时延约为几十毫秒,而且“预测删除”方案还能够避免一些频段碰撞的出现.可见 FH-IA 能够有效减少频段碰撞引起的通信时延.另外, NB-IA 机制中 CR-MTs 在对其信道执行监测时必须暂停该频段内的通信,这会严重影响用户通信的吞吐量.在 FH-IA 机制中,由于通信频段与监测频段是不同的,所以 CR-MTs 的频谱监测不会影响本身的数据通信<sup>[12]</sup>.

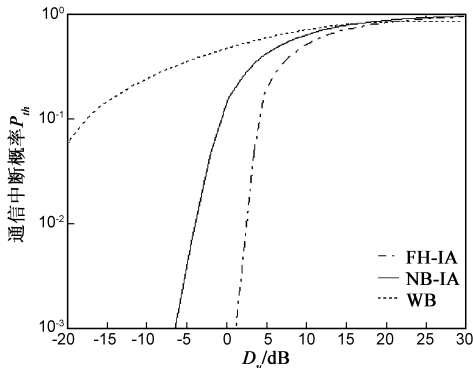


图 6 FH-IA、NB-IA 和 WB 方案的干扰避免性能比较

(c) FH-IA 机制中,只需要针对跳频频率表中的几个特定频段进行监测,不需要大范围的宽带频谱扫描,降低了 CR-MTs 的信号监测压力,更易于实现.

FH-IA 机制在拥有上述优点的同时,也存在一些问题.例如跳频收发机的设备比较复杂,还有跳频同步的建立,跳频参数的配置和 CR-MTs 对跳频序列的选择算法等等,都有待于进一步研究.

#### 4 总结

本文针对异种网络之间的频谱共享问题,提出了 FH-IA 机制.在该机制中,频谱注册网络负责配置跳频

频率表等跳频参数,并且将其在覆盖区域内广播.频谱共享网络中的 CR-MTs 使用 CR 技术对周围频谱进行监测,通过跳频频谱共享策略实现通信.本文设计了 FH-IA 机制的信号发射模型和信令交换机制,提出了不同情况下的 IA 方案.对 FH-IA 机制的分析和仿真结果表明该机制具有较好的频谱共享性能.

#### 作者简介:

刘琪女,1982 年出生于黑龙江省安达市,清华大学博士后,主要研究方向为无线通信与移动通信.

E-mail: liu-qi@tsinghua.edu.cn

苏伟男,1978 年出生于河北省衡水市,北京交通大学讲师,主要研究方向为网络通信、无线通信、ipv6 路由等.

E-mail: wsu@bjtu.edu.cn

李承恕男,1932 年出生于重庆市,北京交通大学教授,博士生导师,主要研究方向为无线通信与移动通信.

#### 参考文献:

- [1] Jonathan S Adelstein, et al. Facilitating opportunities for flexible, efficient, and reliable spectrum use employing spectrum agile radio technologies (ET Docket No.03 108)[R]. Washington, D. C., USA: FCC, 2003.
- [2] P Demestichas, G Dimitrakopoulos, et al. Dynamic planning and management of reconfigurable system[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks Baltimore [C]. Maryland USA: IEEE, 2005. 568 – 572.
- [3] Simon Haykin. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2005, 23(2): 201 – 220.
- [4] Michael K Powell, et al. Notice of proposed rule making (ET Docket No. 04 113) [R]. Washington, D. C., USA: FCC, 2004.
- [5] IEEE 802.22 working group. IEEE 802.22 functional requirements[OL]. <http://www.ieee802.org/22,2005-09-28>.
- [6] Rekha Menon, R Michael Buehrer, Jeffrey H Reed. Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques[A]. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks Baltimore [C]. Maryland USA: IEEE, 2005. 101 – 109.
- [7] T Charles Clancy, William A Arbaugh. Measuring interference temperature[OL]. <http://www.cs.umd.edu/clancy/docs/itma-vt06.pdf>.
- [8] Stefan Mangold, Zhun Zhong, et al. Spectrum agile radio: radio resource measurements for opportunistic spectrum usage[A]. Global Telecommunications Conference [C]. Texas, USA: IEEE, 2004. 3467 – 3471.