

认知无线电系统对 TD-LTE 主用户系统上下行配置类型的识别

饶 毓* 陈 巍 曹志刚

(清华大学电子工程系 北京 100084)

摘 要: 当与时分双工主用户系统共存时, 认知无线电系统首先需要识别主用户系统在时间尺度上的传输方向, 以便在不同链路上分别设计与执行后续的认知过程, 从而优化认知系统的性能。在目前的研究中, 均假设认知系统已先验已知主用户系统上下行链路在时间上的交替规律。在普适的认知场景下, 该假设并不实际。该文依据双工通信系统上下行发射功率的差异, 提出对 TD-LTE 主用户系统在时间尺度上传输方向的识别算法; 基于此初步识别结果, 进一步提出对 TD-LTE 系统上下行配置类型的识别算法。该方法无需主次系统之间的信息交互, 实现简单。仿真表明, 通过数个次级用户观察 10 个左右的 TD-LTE 帧, 即可对其上下行配置类型达到 95% 以上的识别精度。

关键词: 认知无线电; TD-LTE; 上下行配置; 合作检测

中图分类号: TN929.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2013)11-2541-06

DOI: 10.3724/SP.J.1146.2013.00188

Downlink/uplink Configuration Identification of TD-LTE Primary Systems in Cognitive Radios

Rao Yu Chen Wei Cao Zhi-gang

(Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: When the cognitive radios are coexisting with time division duplex systems, it should firstly find out the link directions of the primary systems for the separate design and implementation of the followed spectrum sensing and access. However, in the present studies, this information is assumed as prior information of the cognitive radios, which in fact is not practical in common scenarios. In this paper, a method based on the power levels on both links of TD-LTE is proposed to identify the link directions of subframes and the downlink/uplink configuration in the TD-LTE. This method needs not the cooperation between the primary and secondary systems. Simulations show that the method can meet a high accuracy when a few of frames and SUs are participated in the identification.

Key words: Cognitive radios; TD-LTE; Downlink/uplink configuration; Cooperative detection

1 引言

在认知无线电系统^[1,2]中, 为使得不拥有授权频谱的次级系统(Secondary System, SS)有机会地接入分配给主用户系统(Primary System, PS)的频谱, SS 中的次级用户(Secondary User, SU)需拥有频谱感知^[3,4]的能力, 即判断是否存在主用户(Primary User, PU)信号, 从而在避免对 PU 造成有害干扰的基础上决定频谱接入策略。当 PS 为时分双工通信系统(如 TD-LTE^[5]或时分的 WiMAX^[6])时, SS 的频谱感知和接入决策更为复杂。这是因为在不同的 PS 传输方向下, SS 的感知对象和避免干扰对象并不相同, 故 SS 在不同的 PS 链路上也需拥有不同的感知

灵敏度和干扰控制要求。在此场景下, SS 首先需要识别出 PS 正在进行上行还是下行传输, 以此作为 SS 在该时频资源上执行频谱感知和频谱接入的基础^[7,8]。例如, 文献[8]针对超宽带系统^[9]与 WiMAX 系统共存的场景, 分别提出了对 WiMAX 系统上下行链路的频谱感知和干扰控制的方法和参数。在这类研究中, 均假设 SS 与 PS 间存在信息交互, 故 SS 可准确地获取 PS 上下行传输方向的信息, 而 SS 主动识别该信息的研究并未得到较为深入的考虑。本文的作者曾针对此问题做了一些前期的研究和探索, 在文献[10]中提出了 SS 对 PS 上下行的判断方法。近些年来, 4 G 通信系统中的认知无线电的问题研究得到了广泛的关注^[11,12], 并被认为是解决 4 G 通信系统中网络共存的有效解决方法。故本文以 TD-LTE 系统作为 PS 为例, 进一步研究 SS 主动获取 TD-LTE 系统上下行传输方向信息的方法。

在 TD-LTE 系统中, 上下行传输的最小时间单

2013-02-04 收到, 2013-05-11 改回

国家自然科学基金重点项目(60832008), 国家自然科学基金-青年科学基金项目(60902001), 北京市教委科技发展计划重点资助项目(KZ2010100009009)和索尼中国研究院与清华合作项目资助课题

*通信作者: 饶毓 raoy06@mails.tsinghua.edu.cn

位称为子帧。10 个子帧组合成 1 帧，每帧中传输方向的组合称为上下行配置^[5](downlink/uplink configuration)。TD-LTE 标准定义了该配置的 7 种类型，且每个 TD-LTE 系统在运行中将选用 1 种。

基于 TD-LTE 的帧结构特征，本文提出了一种对 TD-LTE 主用户系统上下行配置类型的识别方法。利用 TD-LTE 系统上下行发射功率的差异识别各子帧的传输方向，并将此初步识别结果与 TD-LTE 的 7 种上下行配置类型进行匹配，进而识别出当前 TD-LTE 系统所使用的上下行配置类型。该方法无需主次系统的合作，仿真表明，通过数个 SU 观察 10 个左右的 TD-LTE 帧即可达到 95% 以上的识别精度。该算法执行迅速，可增加 SU 可获取的频谱资源，从而提高认知系统的吞吐量性能。

2 系统模型

如图 1 所示，系统中存在 1 个覆盖半径为 R_{ps} 的 PS 和 1 个覆盖半径为 R_{ss} 的 SS。其中，PS 包括 1 个 PS 基站和 n_{pu} 个 PU，SS 包括一个 SS 基站和 n_{su} 个 SU，且 PU 和 SU 分别在 PS 和 SS 中随机均匀分布(本文中的 PU 和 SU 特指除基站外的移动台)。为获取足够多的 PS 空闲资源，SS 需离 PS 基站较远。另外，当 SS 处于 PS 边缘时，SS 收到的下行功率最小，收到的上行功率最大。只有在以上极端情况时，所提算法仍可以高精度识别子帧及上下行配置类型，才能保证该算法在各种场景下的识别精度。考虑以上两点，在该系统模型中将 SS 置于 PS 边缘，即对应于 SS 基站处于 PS 覆盖边缘的场景。在本文中，以 TD-LTE 系统作为 PS。表 1 为 TD-LTE 标准定义的 7 种上下行配置类型，其中“D”表示用于下行传输的子帧，“U”表示用于上行传输的子帧，“S”表示特殊子帧。特殊子帧由 DwPTS, GP 和 UpPTS 这 3 个特殊时隙组成，分别用于下行传输，保护间隔及上行传输。在 TD-LTE 标准中，对 3 种

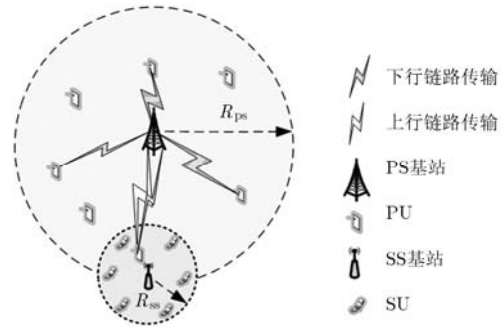


图 1 系统模型

特殊时隙的长度进行了定义，其中 DwPTS 时隙最少使用特殊子帧的前 3 个 OFDMA 符号。SS 根据其接收功率的大小来判断当前子帧的传输方向。定义 $s_i[l, k]$ ($1 \leq i \leq n_{su}$) 为第 i 个 SU (su_i) 在第 k 个子载波上的第 l 个符号的接收样本，则有

$$s_i[l, k] = \begin{cases} h_i^{(d)}[l, k]s^{(d)}[l, k] + n_i[l, k], & \mathcal{H}_d \\ h_i^{(u)}[l, k]s^{(u)}[l, k] + n_i[l, k], & \mathcal{H}_u \\ n_i[l, k], & \mathcal{H}_i \end{cases} \quad (1)$$

其中 $s^{(d)}[l, k]$ 和 $s^{(u)}[l, k]$ 分别是 PS 的下行与上行信号在第 k 个子载波上的第 l 个符号的发送样本， $n_i[l, k]$ 是 su_i 端的噪声样本， $h_i^{(d)}[l, k]$ 和 $h_i^{(u)}[l, k]$ 分别是 PS 下上行对应的发射机(分别为 PS 基站和 PU)和 su_i 之间的瞬时信道增益。 $\mathcal{H}_d, \mathcal{H}_u$ 和 \mathcal{H}_i 分别定义为子载波的 3 种状态：下行(下行传输时，每个子载波均配有功率，故全部子载波被主用户信号占用)，上行占用(该子载波被 PU 占用)及上行空闲(该上行子载波没有被 PU 占用)。为简化分析，PS 信号与噪声信号都建模为复高斯信号。

su_i 的识别统计量设定为其在每个子载波上的平均接收功率，即

$$T_i = \frac{1}{n_s N_{sc}} \sum_{l=1}^{n_s} \sum_{k=1}^{N_{sc}} \|s_i[l, k]\|^2 \quad (2)$$

表 1 TD-LTE 系统中 7 种上下行配置类型

上下行配置号	子帧号									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	D	S	U	U	U	D	S	U	U	U
1	D	S	U	U	D	D	S	U	U	D
2	D	S	U	D	D	D	S	U	D	D
3	D	S	U	U	U	D	D	D	D	D
4	D	S	U	U	D	D	D	D	D	D
5	D	S	U	D	D	D	D	D	D	D
6	D	S	U	U	U	D	S	U	U	D

其中 n_s 为对每个子帧识别所使用的符号数, N_{sc} 是识别过程中用到的子载波数(为进一步减少 n_s , N_{sc} 设置为 PS 频带中的总子载波数)。为简化子帧识别过程, 可设定 n_s 小于 3。由于特殊子帧中至少前 3 个符号用于下行传输, 此时对特殊子帧的识别等同于对下行子帧的识别。在获取上下行配置类型的识别判决之后, 即可把对应的下行子帧还原成特殊子帧。

一般来说, 在 PS 下行, PS 基站始终以一个恒定的功率进行传输, PS 上行由于同时支持的 PU 数和每个 PU 被分配的功率等的不同, 其总功率大小并不固定。本文考虑上行发射功率最大的极端情况(即所有子载波被分配), 因此时上下行的功率差异最小, 识别最为困难。在这种情况下, 子载波状态 $\mathcal{H}_d, \mathcal{H}_u$ 和 \mathcal{H}_i 则等同于链路的 3 种状态: 下行传输, 上行有数据传输及上行无数据传输。

3 上下行配置识别流程

显然, 在识别之前, SS 首先需要 TD-LTE 系统进行帧同步和子帧同步, 以找到每帧和每个子帧的起始。同步过程可依据 TD-LTE 标准定义的主同步及次同步信号进行(主次同步信号在 LTE 标准中有公开的详细定义。识别过程并非本文重点, 不再详述)。依前所述, 上下行配置识别的流程可用图 2 表示。其中 M 为识别过程所需观察的有效 TD-LTE 帧数。在同步之后, SS 对每帧中的 10 个子帧依次进行子帧类型(传输方向)的初步识别之后, 判断识别结果的可用性。若该帧结果可用, 则对此帧的上下行配置类型进行识别。若成功获取识别结果, 则存储配置号, 否则需对下一帧重复上述步骤, 直到获取了 M 个帧的有效识别结果。最终的上下行配置类型则定义为此 M 个判决中出现最多的类型。

可将图 2 中的相关步骤分解为多个“子帧类型的初步识别”及“每帧的上下行配置类型识别”过程, 并分别在以下两小节进行介绍。

3.1 子帧类型的初步识别

为区分 \mathcal{H}_d 和 \mathcal{H}_u 状态, 可将子帧识别统计量与一个设定的门限 T_{th}^h 比较, 而为进一步区分上行中的 \mathcal{H}_u 和 \mathcal{H}_i 状态, 可再定义一个更低的门限 T_{th}^l 用于区分。由式(1)可见, \mathcal{H}_i 状态时, 识别样本 $s_i[l, k]$ 只为噪声样本, 显然 \mathcal{H}_i 状态下的识别性能只与 Var_n 及 T_{th}^l 有关。令 N_d 为 PS 信道的噪声功率谱密度, B_s 为 TD-LTE 的子载波带宽, 则 $\text{Var}_n = N_{sc} N_d B_s$ 为 PS 信道上总的噪声功率。依据能量检测理论^[13], 其与噪声功率大小及 \mathcal{H}_i 状态下的识别精度有关, 可有

$$T_{th}^l = \text{Var}_n \left(1 + \frac{Q^{-1}(p_f^i)}{\sqrt{n_s N_{sc} / 2}} \right) \quad (3)$$

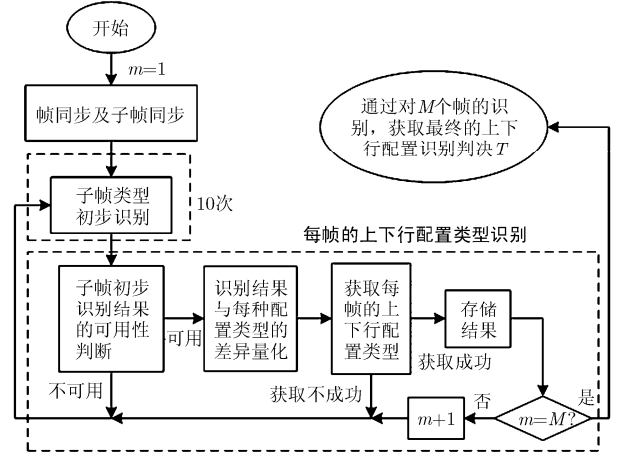


图 2 上下行配置识别流程

其中 $Q^{-1}(\cdot)$ 是反 Q 函数, p_f^i 是单个 SU 的识别统计量大于 T_{th}^l 的概率, 即单个 SU 将 \mathcal{H}_i 状态错误识别为另两个状态的概率。

下行时, PS 基站以一个恒定的功率 P_d 进行传输, 而当所有 PU 以最大功率进行上行传输时, 上下行信号最易混淆, 故门限 T_{th}^h 应依据最大的上行总功率来设定。令 P_u^{\max} 为上行所能支持的最大的总发射功率, 则有 $P_u^{\max} = n_{pu}^{\max} P_{pu}^{\max}$, 其中 n_{pu}^{\max} 为 PS 所支持的最大的同时传输的 PU 数, P_{pu}^{\max} 为 PS 中每个 PU 的最大发射功率。将上行信号类比为噪声信号, 参考式(3), 故 T_{th}^h 可近似地进行如下设置:

$$T_{th}^h = \left(\text{Var}_n + PL_{R_{ps}} P_u^{\max} \right) \left(1 + \frac{Q^{-1}(\bar{p}_f^u)}{\sqrt{n_s N_{sc} / 2}} \right) \quad (4)$$

其中 $PL_{R_{ps}}$ 为 PS 中心到 SS 中心(即 PS 边缘)的路径损耗, \bar{p}_f^u 为单个 SU 将 \mathcal{H}_u 状态错误识别为 \mathcal{H}_d 或 \mathcal{H}_i 状态的近似概率。通过合理的设定 p_f^i 和 \bar{p}_f^u 这两个错误识别概率, 即可得到合理的 T_{th}^l 和 T_{th}^h 取值。

令 d_i 为 su_i 将 T_i 与 T_{th}^h 和 T_{th}^l 比较之后的子帧类型判决结果, 可定义

$$d_i = \begin{cases} 2, & T_i \geq T_{th}^h \\ 1, & T_{th}^l \leq T_i < T_{th}^h \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5)$$

多个 SU 对子帧类型的识别结果经融合可获取全局判决。令 $n_i (i = 0, 1, 2)$ 为 n_{su} 个判决结果中为“ i ”的个数, 则子帧类型的最终判决结果可由式(6)决定。

$$\begin{cases} \mathcal{H}_d \text{ and } D = 1, & \arg \max_i n_i = 2 \\ \mathcal{H}_u \text{ and } D = -1, & \arg \max_i n_i = 1 \\ \mathcal{H}_i \text{ and } D = -1, & \arg \max_i n_i = 0 \end{cases} \quad (6)$$

即若该子帧被判断为用于下行传输, 则 $D = 1$, 否则 $D = -1$ 。以上算法在每帧中依次执行 10 次, 即

可得到关于每帧中所有子帧传输方向的初步识别结果。可令 $\mathbf{D}^{(m)}$ 为存放了第 m 帧的10个子帧类型的初步识别结果的行向量。

3.2 每帧的上下行配置类型识别

在执行了对第 m 帧的子帧类型的初步识别之后, SS可对该帧的上下行配置类型进行识别。将表1建模成一个7行10列的矩阵 \mathbf{C} , 如式(7)所示。

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中代表上下行的元素值参考式(6)中的子帧类型识别结果的定义(由于设定 n_s 小于3, 此时特殊子帧可建模成下行子帧)。每帧的上下行配置类型识别过程可分别3个步骤, 并分别在以下进行介绍。

(1) 子帧初步识别结果的可用性判断 观察到, \mathbf{C} 中的第1-3列和第6, 7列(共5列)的值是固定的, 此特征可用于子帧类型的初步识别结果的可用性判断: 只有识别正确率高的结果才可用于对该帧的上下行配置类型的识别中。

简单地, 当 $\mathbf{D}^{(m)}$ 中第1-3和第6, 7这5个元素中有大于等于 s_{th} 个元素与 \mathbf{C} 中对应元素相同时, 可认为识别结果 $\mathbf{D}^{(m)}$ 是可信的。可做如下定义:

$$s = \sum_{j=1,2,3,6,7} \mathbf{D}^{(m)}(j)\mathbf{C}(1,j) \quad (8)$$

直接地, 当 $s \geq 1 \times s_{th} - 1 \times (5 - s_{th}) = 2s_{th} - 5$ 时, 可认为 $\mathbf{D}^{(m)}$ 可用, 否则 $\mathbf{D}^{(m)}$ 将不可用于后续过程中。显然, s_{th} 的可能取值有3, 4或5。

令下行子帧被错误识别为上行的概率为 P_m^d , 上行子帧被错误识别成下行的概率为 P_f^u 。当 $s_{th} = 3$ 时, 只有当 $\mathbf{D}^{(m)}$ 中这5个元素中有3, 4或5个与对应元素相同时, $\mathbf{D}^{(m)}$ 可用于后续识别。故可用于后续识别的概率 $p_{a,3}$ 可计算为

$$p_{a,3} = (1 - P_m^d)^4 + C_4^1 P_m^d (1 - P_m^d)^3 + (1 - P_f^u) C_4^2 (P_m^d)^2 (1 - P_m^d)^2 \quad (9)$$

类似地, 当 $s_{th} = 4$ 时, $\mathbf{D}^{(m)}$ 可用于后续识别的概率 $p_{a,4}$ 为

$$p_{a,4} = (1 - P_m^d)^4 + C_4^1 P_m^d (1 - P_m^d)^3 (1 - P_f^u) \quad (10)$$

当 $s_{th} = 5$ 时, $\mathbf{D}^{(m)}$ 可用于后续识别的概率 $p_{a,5} = (1 - P_m^d)^4 (1 - P_f^u)$ 。以两组 P_m^d, P_f^u 值为参考, 分别观察 $p_{a,3}, p_{a,4}$ 及 $p_{a,5}$ 的大小, 并以表2示出。

表2 $\mathbf{D}^{(m)}$ 可用于后续识别的概率

s_{th}	$P_m^d = 0.6, P_f^u = 0.4$	$P_m^d = 0.2, P_f^u = 0.1$
3	$p_{a,3} = 0.387$	$p_{a,3} = 0.957$
4	$p_{a,4} = 0.118$	$p_{a,4} = 0.778$
5	$p_{a,5} = 0.015$	$p_{a,5} = 0.369$

此结果即反应了: 若子帧类型的初步识别的正确性越高, 可参与后续的识别的概率越大, 可有效地避免子帧识别错误率高的初步识别结果进入下一步的识别中。为保证识别的正确性, 且为了让子帧识别可靠性高的结果以更高的概率参与后续识别, 综合考虑, s_{th} 可取为4。

(2) 识别结果与每种配置类型的差异的量化计算 为比较 $\mathbf{D}^{(m)}$ 与 \mathbf{C} 中的每行的差异, 以找到第 m 帧所使用的上下行配置类型, 定义差值矩阵 $\mathbf{S}^{(m)}$ 为

$$\mathbf{S}^{(m)} = \mathbf{I}_{7 \times 1} \mathbf{D}^{(m)} - \mathbf{C} \quad (11)$$

从中可见 $\mathbf{S}^{(m)}$ 中只有3种元素: “-2”, “0” 和 “2”。如果元素 $\mathbf{S}^{(m)}(j,k)$ ($0 \leq j \leq 6, 0 \leq k \leq 9$) 为 “2”, 表明若上下行配置类型为 j , 则子帧 k 的传输方向由上行被误识别成了下行; 若为 “-2”, 则其由下行被误识别成了上行; 若为 “0”, 则没有误识别。由于“-2”和“2”代表了两种不同的子帧类型误识别, 故在差异量化时可对以上不同情况设置不同的权重。令对 “ i ” 的加权系数为 w_i , 则 $\mathbf{D}^{(m)}$ 与上下行配置类型 j 的差异量化值可定义为

$$DI^{(m)}(j) = \sum_i N^{(i)}(j) \cdot w_i \quad (12)$$

其中 $N^{(i)}(j)$ 为 $\mathbf{S}^{(m)}$ 的第 j 行中的元素 “ i ” 的个数。直接地, $DI^{(m)}$ 中最小值所对应的上下行配置类型即可认为是与 $\mathbf{D}^{(m)}$ 差异最小的类型。显然, 在此差异量化中有 $w_0 = 0$, 而 w_2 和 w_{-2} 的大小可由两种不同的误识别出现的概率决定。例如, 可令 $w_2 = 1$, $w_{-2} = P_f^u / P_m^d$ 。

(3) 获取每帧的上下行配置类型 简单地, 若 $\mathbf{D}^{(m)}$ 与某配置类型的差异量化值最小, 说明此配置类型最有可能为第 m 帧所使用的类型。为保证识别结果的精确度, 在这里再引入一个条件: 只有当差异量化值小于一个设定的门限 W_{th} 时, 才可认为对此帧的上下行配置识别结果正确, 且此时对应的配置类型在 M 次有效识别中的识别次数加1, 即有

$$\left. \begin{aligned} N_i(\arg \min_j DI^{(m)}) + 1, \min DI^{(m)} \leq W_{th} \\ \text{获取失败, 其它} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

当进行若干次3.1节及3.2节的识别过程, 并成功获取了 M 个有效的上下行配置识别结果后, 向量 \mathbf{N}_i 存储了每种上下行配置类型在此过程中总的

被识别次数。则最终的上下行配置识别结果为

$$T = \arg \max_j N_t \quad (14)$$

即上下行配置识别结果 T 定义为 M 个识别结果中出现最多的某类型。

注意到, 本文所提算法的复杂度由两部分组成。其中, 子帧类型的初步识别采用能量检测算法, 计算复杂度较低。从式(3)可以看出, 当TD-LTE中子载波数固定时, 子帧类型初步识别算法的复杂度与识别符号数 n_s 的关系为 $O(n_s^2)$ 。另外注意到, 3.2节中各步操作实际上为长度固定的矩阵运算, 如式(8)为5次乘法和1次加法, 式(11)为70次加法。也就是说, 对每帧的上下行配置类型的计算复杂度是固定的, 且此复杂度很低。于是, 本文所提算法总的复杂度可认为 $O(Mn_s^2)$, 即由识别所观察的无线帧个数 M , 以及子帧初步识别中所用符号个数 n_s 决定。在算法执行过程中, 使用较小的 n_s 和 M 可减少算法复杂度, 并实现快速识别。

4 仿真设计及仿真结果

仿真中PS的参数按照TD-LTE的系统参数设定。当TD-LTE带宽为20 MHz时, 子载波数 N_{sc} 为1200, 且此时可支持的PU数最多, n_{pu}^{max} 为100。在仿真中, 上行采用开环功率控制, PU的最大的发射功率 P_{pu}^{max} 为23 dBm, 下行基站发射功率为46 dBm。链路传播环境为3GPP中的密集城区模型, 此情况下的路径损耗模型及热噪声模型分别在表3中示出, 其中 B 及 d 分别为带宽及收发机之间的距离。信道为瑞利信道。文献[14]中指出TD-LTE系统在此环境下的最大上行覆盖半径约为300 m, 故 R_{ps} 设定为300 m。PU与SU在PS与SS中随机均匀设定所使用的符号数 n_s 为1(此时的子帧类型识别性能已足够好)。式(3)中的 p_f^i 设定为0.01, 以固定 T_{th}^l 的值。为表述子帧类型识别的性能, 定义将 \mathcal{H}_u 状分布, 且每子帧位置更新一次。在子帧类型识别中, 态错误识别为另外两个状态的概率为 Q_{1f} , 将 \mathcal{H}_u 状

态错误识别为另两个状态的概率为 Q_{0f} 。采用MATLAB仿真工具, 仿真中的每个数值结果采用蒙特卡洛仿真分别运行10000次得到。

图3, 图4给出了不同SS覆盖半径(R_{ss})及不同的参与识别的SU数(n_{su})下的子帧类型识别的错误概率(Q_{1f} 和 Q_{0f}), 其中横轴“ p ”指的是式(4)中的 \bar{p}_f^u 。由两图中 Q_{1f}, Q_{0f} 相对于 n_{su} 的变化趋势可见, 当 n_{su} 增加时, 子帧识别的错误概率 Q_{1f}, Q_{0f} 均减小; 当 \bar{p}_f^u 增大时, Q_{1f} 减小, Q_{0f} 增大。由图3和图4的对比又可看出, 当 R_{ss} 增大时, Q_{1f} 增大, 而 Q_{0f} 减小。也就是说, R_{ss} 需要依据 n_{su} 的大小进行合理地取值。当 $n_{su} \leq 30, R_{ss} = 100$ m时, 可满足 $Q_{1f} \leq 0.1$ 且 $Q_{0f} \leq 0.1$ 。

表 3 仿真参数

热噪声功率(B , Hz)	-174 + 10 lg(B) dBm
路径损耗模型(d , km)	128.1 + 37.6 lg(d) dB

根据图3和图4中 p 的取值, 在接下来的仿真中令 $\bar{p}_f^u = 0.8$, 以固定 T_{th}^h 值。由文献[15]可知, SS难以在一个子帧间内对PU及SU的位置进行定位, 从而难以估计 P_m^d 及 P_f^u 的确切取值, 故在仿真中令 $w_2 = w_{-2} = 1$, 即将两种情况的误识别在差异量化计算中同等看待。令 Q_m 为进行 M 帧的有效子帧类型识别和上下行配置识别之后, 正确识别出上下行配置类型的概率。以下以上下行配置类型0(即表1中第1种类型)为例, 观察 Q_m 的性能。

图5给出了当观察的有效TD-LTE帧数为2(即 $M = 2$), 且 $R_{ss} = 100$ m时的识别正确率。从图5可看出, n_{su} 增加, Q_m 增加; 式(13)中的距离门限 (W_{th}) 增加, Q_m 也增加, 直到不再产生显著的影响。依据图5的仿真结果, 在图6中, 令 $W_{th} = 1$, 变化识别中所观察的帧数 M 。在图6中可看出 M 增加, Q_m 显著增加。并且从仿真可发现, 当 $n_{su} = 9, M \geq 4$ 时, 或当 $n_{su} = 3, M \geq 8$ 时, 均有 $Q_m \geq 95\%$ 。

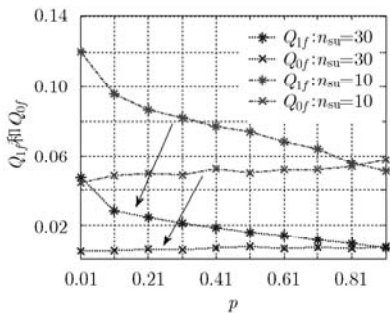


图3 $R_{ss} = 100$ m时的子帧类型识别的错误概率

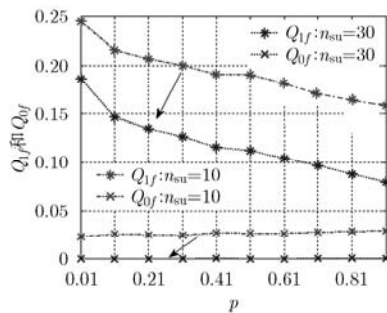


图4 $R_{ss} = 150$ m时的子帧类型识别的错误概率

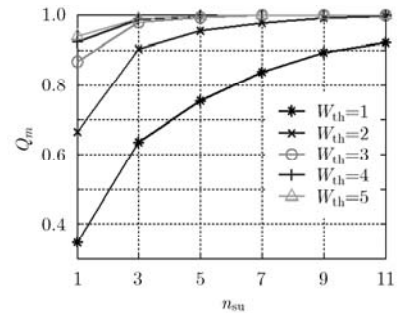


图5 当 $M = 2, w_2 = w_{-2} = 1$ 时的上下行配置识别正确率

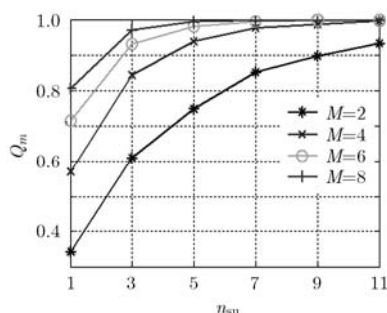


图6 当 $W_{th} = 1$, $w_2 = w_{-2} = 1$ 时的上下行配置识别正确率

综合以上仿真结果可发现, 本文提出的对门限 T_{th}^l 及 T_{th}^h 的设置方法简单有效, 且通过增加参加识别的SU的数量及所观察的有效TD-LTE帧数, 可有效地提高识别正确概率, 且仅需数个SU观察10个左右的TD-LTE帧即可对TD-LTE系统的上下行配置达到95%以上的识别正确率。

5 结论

本文针对TD-LTE主用户系统提出了一种认知无线电系统对其子帧传输方向的识别及其上下行配置类型识别的算法。该算法依据TD-LTE系统上下行发射功率的差异, 以及TD-LTE系统固有的7种上下行配置类型作为识别特征, 通过SU的合作检测可达到高精度的子帧传输方向的识别和上下行配置识别。同时该算法无需认知无线电与TD-LTE系统之间的信息交互, 算法实现简单, 识别快速精确, 通过数个SU的合作检测, 只需观察10个左右的TD-LTE无线帧即可达到95%以上的识别精度。

参考文献

- [1] Mitola J, III and Maguire G Q, Jr.. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999, 6(4): 13-18.
- [2] Marinho J and Monteiro E. Cognitive radio: survey on communication protocols, spectrum decision issues, and future research directions[J]. *Journal Wireless Network*, 2012, 18(2): 147-164.
- [3] Feng Gui-zhu, Chen Wei, and Cao Zhi-gang. A joint PHY-MAC spectrum sensing algorithm exploiting sequential detection[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 2010, 17(8): 703-706.
- [4] Luo Cheng, Chen Wei, and Mei Shun-liang. Adaptive fusion in air: a cooperative sensing scheme based on distributed beamforming[C]. *Proceedings of 2012 IEEE Global Telecommunications Conference*, Anaheim, California, USA, 2012: 4200-4204.
- [5] Chen S, Wang Y, Ma W, *et al.* Technical innovations promoting standard evolution: from TD-SCDMA to TD-LTE and beyond[J]. *IEEE Wireless Communications*, 2012, 19(1): 60-66.
- [6] Kamali B. Understanding WiMAX: an IEEE-802.16 standard-based wireless technology[J]. *IEEE Potentials*, 2012, 31(5): 23-27.
- [7] Leu A E, Mark B L, and McHenry M A. A framework for cognitive WiMax with frequency agility[J]. *Proceedings of IEEE*, 2009, 97(4): 755-773.
- [8] Mishra S M, Brodersen R W, Brink S T, *et al.* Detect and avoid: an ultra-wideband/Wimax coexistence mechanism[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2007, 45(6): 68-75.
- [9] Porcino D and Hirt W. Ultra-wideband radio technology: potential and challenges ahead[J]. *IEEE Communications Magazine*, 2003, 41(7): 66-74.
- [10] Rao Yu, Chen Wei, and Cao Zhi-gang. A downlink/uplink identification algorithm for TDD communication systems in cognitive radio content[C]. *IEEE 13th International Conference on Communication Technology*, Jinan, China, 2011: 234-238.
- [11] Grønsund P, Grønsund O, and Läheteoja M. Business case evaluations for LTE network offloading with cognitive femtocells[OL]. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308596112001292>, 2012.
- [12] Al-Habashna A, Dobre O A, Venkatesan R, *et al.* Second-order cyclostationarity of mobile WiMAX and LTE OFDM signals and application to spectrum awareness in cognitive radio systems[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, 2012, 6(1): 26-42.
- [13] Urkowitz H. Energy detection of unknown deterministic signals[J]. *Proceedings of IEEE*, 1967, 55(4): 523-531.
- [14] 李新. TD-LTE 无线网络覆盖特性浅析[J]. *电信科学*, 2009, 25(1): 43-47.
Li Xin. Coverage characteristics of TD-LTE network[J]. *Telecommunications Science*, 2009, 25(1): 43-47.
- [15] Ma Zhi-yao, Chen Wei, Letaief K B, *et al.* A semi range-based iterative localization algorithm for cognitive radio networks[J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(2): 704-717.

饶 毓: 女, 1985 年生, 博士生, 研究方向为认知无线电技术等。

陈 巍: 男, 1980 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为无线通信、认知无线电技术、绿色通信等。

曹志刚: 男, 1939 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为宽带无线通信等。