

基于 TDD 上行 CSI 的自适应 预重传 GBN-HARQ 方案*

戴翠琴, 张刚, 罗捷, 杨静
(重庆邮电大学 移动通信重点实验室, 重庆 400065)

摘要: 针对预重传 GBN-ARQ 方案在误码率低的情况下吞吐率与时延大大下降的问题, 结合重传编码合并技术, 提出了一种基于 TDD 上行 CSI 的自适应预重传 GBN-HARQ 方案。首先, 发送端将数据进行前向纠错编码得到不同冗余版本; 然后, 根据上行 CSI 信息对重传分组自适应地选择冗余版本数, 在信道状况较差时一次性传输多个冗余版本以保证预重传的可靠性, 减小由预重传错误所带来的时延性能下降, 在信道状况较好时采用较少冗余以保证较高的吞吐率; 最后, 分析比较了传统 GBN-ARQ 方案、预重传 GBN-ARQ 方案和自适应预重传 GBN-HARQ 方案在不同情况下的吞吐率性能。理论和仿真分析表明, 在误码率大于 10^{-1} 时自适应预重传 GBN-HARQ 方案的吞吐率比传统 GBN-ARQ 方案提升了 0.1 左右, 比预重传 GBN-ARQ 方案提升了 0.05 左右, 在误码率较大的情况下, 基于编码合并技术的自适应预重传 GBN-HARQ 方案能够更好地保证预重传的可靠性。

关键词: 回退 N 步式混合自动重传请求; 时分双工; 信道质量信息; 预重传; 吞吐率

中图分类号: TN929.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2014)02-0496-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2014.02.041

Uplink CSI based adaptive predicted repeat GBN-HARQ scheme

DAI Cui-qin, ZHANG Gang, LUO Jie, YANG Jing

(Key Laboratory of Mobile Communication, Chongqing University of Posts & Telecommunications, Chongqing 400065, China)

Abstract: This paper proposed an uplink CSI based adaptive pre-repeat GBN-HARQ scheme to solve the problem that the throughput and delay of traditional pre-repeat GBN-ARQ scheme declined greatly at low BER. First, transmitter encoded the data with FEC and obtained different redundant versions. And then, the method adaptively chose the number of redundant versions for retransmission packets according to the uplink CSI, transmitted multiple redundant versions to ensure the reliability of pre-repeat transmission in the poor condition of wireless channel and reduce delay caused by the error in retransmission and it used few redundancies to ensure high throughput in the good condition of wireless channel. Finally, it compared and analysed the throughput for the traditional GBN-ARQ scheme, pre-repeat GBN-ARQ scheme and adaptive pre-repeat GBN-HARQ scheme. The simulation results show the throughput of adaptive pre-repeat GBN-HARQ scheme improves about 0.1 than traditional GBN-ARQ scheme and about 0.05 than pre-repeat GBN-ARQ scheme as the BER exceeds 10^{-1} , that is to say, the uplink CSI based adaptive pre-repeat GBN-HARQ scheme can further guarantee the reliability at high BER.

Key words: GBN-HARQ; TDD; CSI; predicted repeat; throughput

0 引言

随着通信技术的不断发展, 第四代移动通信系统(4 generation, 4G)将能够支持在更高速、多变的电波传播环境下传输更高质量的数据, 这将对差错控制技术提出更高的要求。无线通信系统通常采用自动重传请求(automatic repeat request, ARQ)和前向纠错编码(forward error correction, FEC)两种差错编码控制技术来提高系统的可靠性^[1]。

ARQ 协议通过重复发送出错数据包来降低误码率。传统的 ARQ 协议有三种形式, 即停等式(stop and wait, SW-ARQ)、回退 N 帧式(go back n, GBN-ARQ)和选择重传式(selective request, SR-ARQ)。其中, GBN-ARQ 因其较低的系统实现复杂度

以及较高的传输效率, 广泛应用在 HDLC、SDLC、ADCCP 和 LAPB 等标准的 DLC 协议中^[2]。研究表明, 当 PER 很低时, GBN 具有与 SR 相近的吞吐率和时延性能^[3]。随着 PER 的增加, GBN 系统的时延迅速增加, 吞吐率也随之急剧下降。这是由于在 GBN 协议中, 一旦接收端检测到某一数据分组出错, 不管后续分组正确与否一律丢弃。在信道条件恶劣、需要多次重传才能正确接收时, 将造成资源的极大浪费, 严重影响系统性能。

针对此问题, 目前已有的解决方案主要有自适应滑动窗口长度技术、预测重传技术^[4]等。预测重传技术根据上行信道状况来预测数据分组传输正误, 发送端通过预测, 在反馈到达之前对可能需要重传的数据分组进行重传, 避免后续分组的浪费, 减少数据分组传输正确时需重传的总分组数, 从而提高吞

收稿日期: 2013-04-26; **修回日期:** 2013-06-07 **基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61171111); 重庆市自然科学基金资助项目(cstc2012jjA40042); 重庆市教委优秀成果转化资助项目(Kjzh11206)

作者简介: 戴翠琴(1976-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为宽带无线移动通信网络关键技术(daicq@cqupt.edu.cn); 张刚(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传输技术; 罗捷(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为无线传输技术; 杨静(1972-), 女, 副教授, 硕士, 主要研究方向为无线通信网络关键技术。

吐率性能。然而预重传由于预测的不确定性而存在一定的缺陷,文献[5~7]在预重传 GBN 协议的基础上进行了改进,文献[5]提出了一种通过累计重传次数来降低预测依赖性的方案;文献[6]提出了一种具有缓存结构的 GBN 预测重传,通过增加接收端缓存器来降低预测不准带来的损失;文献[7]提出了一种预重传协同 GBN-ARQ 算法,通过结合中继协同的分集增益来提高预重传的准确性。

目前,已有文献对预重传技术的改进取得了一定的成果,然而,尚少有文献将预重传 GBN 协议与编码合并技术进行结合研究。传统的预重传 GBN-ARQ 协议每次重传的数据分组都相同,只有信息位与检错位,并不包含纠错位。在信道状况较差时,预重传虽然减小了传输的总分组数,但它既不能自纠错也不能对多次重传的分组进行合并译码来获得分集增益,并没有提高传输的正确率,重传次数往往较多,代价较大。若能在重传时增加适量冗余信息,从而增大传输成功的概率,减小重传次数,则能有效地减少传输时延,提高系统吞吐量。结合重传编码合并技术,文献[8]提出了一种以最小幅度递增传输冗余来提高吞吐率的重传机制;文献[9]提出了一种根据信道状况自适应地选择重传冗余的 HARQ 方案,在信道质量差时能有效减小传输时延。编码合并技术通过牺牲有效性来保证可靠性,在信道恶劣时改善效果尤为明显;预重传由于存在预测失误的情况,因此可看做是通过牺牲可靠性来换取有效性,然而在信道恶劣时其改善效果将大打折扣,故而将两者结合具有一定研究价值。

基于以上分析,本文结合重传协议与重传编码合并技术提出了一种根据上行 CSI 对重传信息进行自适应的增加冗余的预重传 GBN-HARQ 方案,以最大限度地提高传输正确率、减少重传次数,在传统 GBN 协议的优势上进一步克服信道恶劣情况下系统性能骤降的问题。

1 自适应预重传 GBN-HARQ 方案

1.1 传统 GBN-ARQ 方案

文献[2]详细给出了传统 GBN-ARQ 方案的协议流程,如图 1 所示。假设发送端滑动窗口长度为 5,在 NACK 消息到达之前,发送端连续发送 5 个数据分组,接收到 NACK 后,发送端对分组 1~5 进行重传,接收端同时丢弃刚接收到的分组 1~5。如果分组 1 经多次传输后仍然译码错误,将导致其后 4 个数据分组的多次传输浪费,这对系统的性能有较大的不良影响。

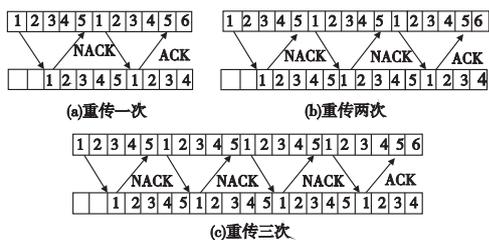


图1 传统GBN-ARQ方案

1.2 预重传 GBN-ARQ 方案

Nakamura 等人^[4]利用 TDD 的特点提出了一种预重传方案:在 TDD 系统中,发送端与接收端同时发送和接收数据,在一个环路周期内,若发送端在解码接收端发送的某一帧出现错误时,则判定与这一错误分组所对应的下行数据分组传输出

错,发送端在下一时刻传输该数据分组及后续分组,接收端在收到预重传分组后根据重传分组中携带的 SN 号覆盖已传分组在缓存中的位置。值得一提的是,预测机制并不是随时都在运行,从第一次预测后的重传时刻开始到一个环路周期长度内都不再进行预测,直到发送端收到第一个重传分组的反馈信息后再重新启动预测机制。图 2 给出了 $N=5$ 时的传输实例,假设在第三个分组开始传递时,发送端根据上行链路的信噪比预测到分组 1 出错,立即对分组 1 及其后四个分组进行重传,这样在分组 1 的反馈到达之前,已预先对它进行了重传。在信道状况不佳的情况下,这种方案在每个预重传的周期内能够减少分组 4,5 的不必要重传,从而提高了系统吞吐率和时延性能。然而,它并不能从本质上提高传输的正确率,在信道状况恶劣的情况下,多次重传仍然不能传送正确,因此系统性能并没有得到实质性的改善。

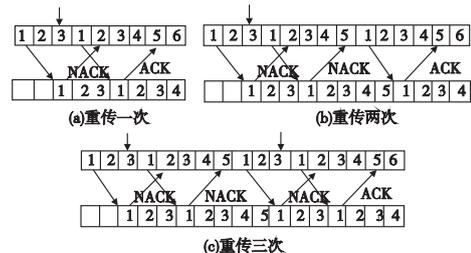


图2 预重传GBN-ARQ方案

1.3 自适应预重传 GBN-HARQ 方案

假设通过打孔矩阵得到的初传数据分组仅包括信息位与检错位,发送端在经过预重传或收到 NACK 后再重传纠错冗余位。以速率匹配打孔 Turbo 码(RCPT 码)的 Type-II 型 HARQ 为例,发送端首先在物理层对数据信息进行 CRC 编码和 Turbo 编码,得到包含原数据信息与检错、纠错冗余信息的数据分组;然后通过打孔删余矩阵对其进行速率匹配打孔删余,得到初传数据分组与各重传冗余版本,将其储存在缓存器中(对于 GBN 协议,滑动窗口长度越大,缓存空间要求越高)。接收端将初传数据分组与各次重传分组进行 IR 合并译码,如图 3 所示。

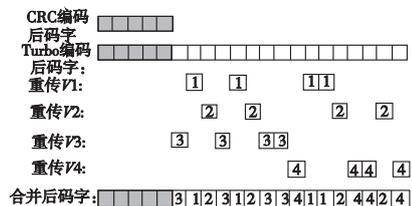


图3 IR合并

为了进一步提高传统 HARQ 的性能,文献[9]提出了一种基于信道状况的自适应 HARQ 方案,充分利用发送端获得的信道估计信息判断当前的信道状况,并由此确定当前发送的数据分组被成功接收可能需要的重传次数,将初传信息和 K 次增量冗余信息一起发送给接收端译码,最大可能地一次性将数据发送成功,减少传输出错再启动重传协议发送增量冗余信息的次数。

结合这个思想,对预重传的数据分组自适应地添加冗余信息。根据 TDD 系统的特性,利用上行链路的 CSI 对预重传的数据分组需要发送的冗余版本数 K 进行判断。提取 CSI 中的 SNR 作为判断依据,将 SNR 划分区间,不同的 SNR 区间对应不同的冗余版本数,根据接收到的信噪比在重传时附加适量的纠错码冗余,在保证吞吐率的同时最大限度地减少重传次数。SNR 与需增加的冗余版本数 K 之间的关系如表 1 所示。

表 1 SNR 与对应冗余次数 K 之间的关系

SNR/dB	<2	2~6	6~12	>12
K /次	4	3	2	0

具体操作步骤如下:

a) 发送端。数据处理流程如图 4 所示,数据会在物理层进行信道编码、打孔删余等操作,将产生的信息分组与各冗余分组一并放入缓存等待发送或重传。发送端在一个发送窗口内连续发送数据分组。假设发送窗口长度为 N ,从第一个数据分组开始发送到收到这一数据分组的反馈信息这 N 个时隙内,若遇到上行链路的数据分组解码错误,则将与此数据分组对应时隙的下行数据分组进行重传,重传冗余版本数根据链路信噪比判断。重传机制在预测到错误后会立即关闭,直到收到重传分组的反馈信息后再重新启动,否则预测机制会出现混乱现象。在接收到预测重传数据帧的反馈信息后,如果是 NACK 则重传该分组,直到接收端译码成功或达到最大重传次数;如果是 ACK 则传送新的分组。

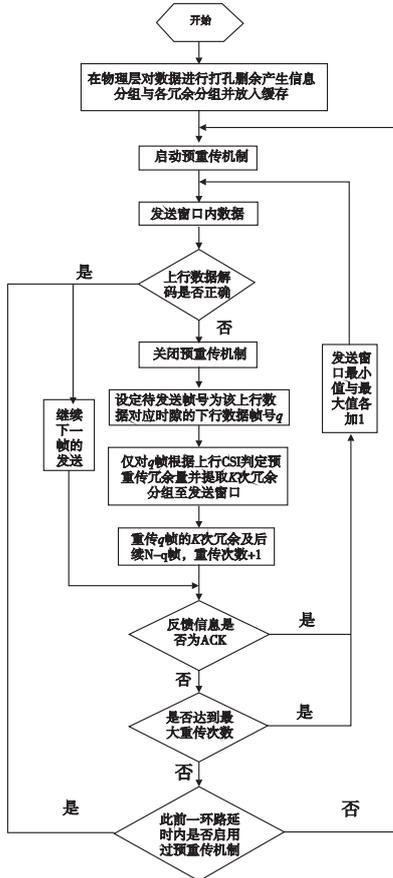


图4 发送端数据处理流程图

b) 接收端。数据处理流程如图 5 所示。接收端的窗口长度为 1,在接收到数据帧后会判断该帧是否为期待帧。若不是,则丢弃;是则判断该帧是首次传送帧还是重传帧。如果是首次传送帧,则直接进行译码;如果是重传帧,则需要与缓存中的数据进行合并后译码。译码正确后接收数据并发送 ACK,同时清空缓存、期待帧号加一,译码错误则放入缓存等待与重发帧合并译码并反馈 NACK。

2 性能分析

ARQ 系统的吞吐率是指接收端正确接收数据分组时,分组中信息比特数与发送端发送的总比特数的比值。设每个数据分组中信息比特数为 a ,纠错码冗余比特数为 b ,其余比特数

为 c 。如果将数据传输分为 A 阶段和 B 阶段,A 阶段为无错传输阶段,即数据帧不经过重传,只经一次传输就能传送正确,设此阶段有效传送的数据分组和总数据分组数分别为 M_A 和 V_A ; B 阶段为有错传输阶段,此阶段数据分组经过多次重传传送正确,有效传送的数据分组数和总数据分组数分别为 M_B 和 V_B ,很显然, $M_B = 1$,概率为 1,故

$$E[M_B] = 1 \tag{1}$$

系统的吞吐率为^[5]

$$\eta = \frac{a}{a+b+c} \times \frac{E[M_A] + E[M_B]}{E[V_A] + E[V_B]} \tag{2}$$

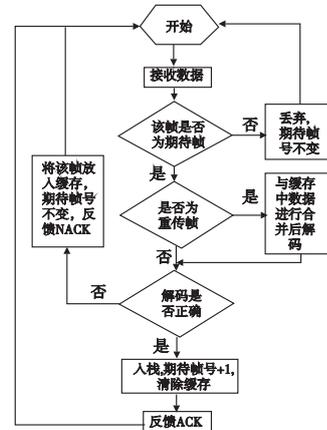


图5 接收端数据处理流程图

设 p 为分组差错率,反馈和预测均无差错,用 i 表示 A 阶段一次传输传送的帧长,由于两种重传方案都没有对第一次传输进行改进,故三者 A 阶段的传送帧长相等且为

$$E[M_A] = E[V_A] = \sum_{i=0}^{\infty} i(1-p)^i p = \frac{1-p}{p} \tag{3}$$

假设重传次数为 i ,下面分别讨论三种方案的 $E[V_B]$ 。

2.1 传统 GBN-ARQ 方案(方案 1)

由图 1 可见,传统 GBN-ARQ 方案下,每次重传的分组长度都相同且为 N ,发生重传的条件是该分组传输错误,故

$$E[V_{B1}] = 1 + \sum_{i=0}^{\infty} p^i (1-p) i N = 1 + \frac{pN}{1-p} \tag{4}$$

由于传统 GBN-ARQ 协议中的数据分组中不包含纠错码,故 $b=0$ 。将式(1)(3)(4)带入式(2),得到传统 GBN-ARQ 方案的吞吐率^[6]为

$$\eta_1 = \frac{a}{a+c} \times \frac{\frac{1-p}{p} + 1}{\frac{1-p}{p} + 1 + \frac{pN}{1-p}} = \frac{a}{a+c} \times \frac{1-p}{1-p+p^2N} \tag{5}$$

2.2 重传 GBN-ARQ 方案(方案 2)

假设不考虑预测失误的情况,每次预测都准确。由图 2,设预测到达时发送窗口内已经传输的分组数为 m ,则当 N 为偶数时, $N/2 < m \leq N$;当 N 为奇数时, $(N-1)/2 < m \leq N$ 。简单的重传方案下,奇数次重传 $2i+1$ 的分组长度为 $i(N+m) + m$,偶数次重传 $2i$ 的分组长度为 $i(N+m)$,故^[4]

$$E[V_{B2}] = 1 + \sum_{i=0}^{\infty} p^{2i+1} (1-p) [i(N+m) + m] + \sum_{i=1}^{\infty} p^{2i} (1-p) i(N+m) = 1 + \frac{pm}{1+p} + \frac{p^2(m+N)}{1-p^2} \tag{6}$$

$$\eta_2 = \frac{a}{a+c} \times \frac{E[M_A] + E[M_B]}{E[V_A] + E[V_B]} = \frac{a}{a+c} \times \frac{\frac{1-p}{p} + 1}{\frac{1-p}{p} + 1 + \frac{pm}{1+p} + \frac{p^2(m+N)}{1-p^2}} \tag{7}$$

2.3 自适应预重传 GBN-HARQ 方案(方案 3)

自适应预重传 GBN-HARQ 方案在重传时加入冗余后,减小了分组误码率,但重传时每个分组的数据比特数有所增加。假设分组误码率为 p_3 , 由于误码率的改善正比于码率 $C_r = \frac{a}{a+b+c}$, 即纠错冗余越多, 码率越小, 误码率越低。故 $p_3 = p \times C_r$ 。为简便分析, 在这里假设接收信噪比 SNR 在各分段内服从均匀分布, 即 $p_{SNR} = \frac{1}{4}$, 此方案下每次重传需要叠加的检错码数量的均值为

$$E[b] = \sum_{i=1}^5 K_i L p_{SNR} = 2L \quad (8)$$

其中: L 表示每次重传冗余的比特个数, 由于打孔删余, L 小于 b ; K 表示一次传输的冗余版本个数。

故而码率的均值为

$$E[C_r] = \frac{a}{a+2L+c} \quad (9)$$

分组误码率为

$$p_3 = p \times C_r = p \times \frac{a}{a+2L+c} \quad (10)$$

$$E[V_{B3}] = 1 + \sum_{i=0}^{\infty} p_3^{2i+1} (1-p_3) [i(N+m) + m] + \sum_{i=0}^{\infty} p_3^{2i} (1-p_3) i(N+m) = 1 + \frac{p_3 m}{1+p_3} + \frac{p_3^2 (m+N)}{1-p_3^2} \quad (11)$$

$$\eta_3 = \frac{a \times E[M_A] + a \times E[M_B]}{(a+c) \times (E[V_A] + 1) + (a+E[b]+c)(E[V_{B3}] - 1)} \quad (12)$$

将式(1)(3)(8)(10)(11)带入式(12)即可求得该方案的吞吐率。

3 仿真结果及分析

为验证理论分析的正确性, 本文对三种方案进行了仿真, 仿真参数如表 2 所示。

表 2 仿真参数

项目	参数	项目	参数
仿真软件	MATLAB	其余比特数/bit	16
信道条件	TDD 慢衰落	每次重传冗余比特数/bit	20
信息比特数/bit	100	环路延时	8
纠错冗余比特数/bit	50		

本文把吞吐率作为评价系统性能的标准, 通过比较相同误码率条件下的吞吐率来分析三种方案的性能优劣。

图 6 给出了三种方案的系统吞吐率性能变化曲线。由图中可以看出, 在信道条件较好、误码率较低时, 三种方案的吞吐率基本没有差异, 因为在信道条件较好时预重传触发几率小, 方案 2, 3 相当于方案 1; 随着误码率的增大, 在接近 10^{-1} 附近时, 数据分组大量出错、重传次数迅速增加, 导致时延迅速升高, 使得吞吐率迅速下降。由于采用了预重传, 在相同误码率的信道条件下, 方案 2 较方案 1 有更好的吞吐率。方案 3 进一步对预重传采用自适应冗余机制, 增加冗余虽然会降低吞吐率, 然而由于提高了传输正确率, 在相同误码率的情况下传输了更多的数据帧, 通过综合分析并由图 6 可以看出, 采用自适应冗余机制对吞吐率的改善总体上大于对吞吐率的降低影响, 即总的吞吐率得到了改善, 并且误码率越高, 吞吐率的改善越明显。

影响系统吞吐率的因素有很多, 如分组长度、发送窗口长

度等。图 7 对不同发送窗口长度下三种方案的吞吐率进行了比较。对图 7 分析可知, 预重传 GBN-ARQ 方案和自适应预重传 GBN-ARQ 方案比传统 GBN-ARQ 方案对发送窗口长度的敏感度低。当分组传输正确率比较低时, 通过减小发送窗口的长度能够较大程度地提高吞吐率。

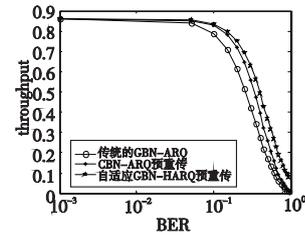


图 6 三种方案的吞吐率性能比较

在预重传方案中存在一个参数 m , 即预测到错误分组时发送窗口中已发送数据分组的个数, 随着 m 的变化, 吞吐率也会产生变化。图 8 取相同分组长度与发送窗口长度对传统预重传 GBN-ARQ 方案与自适应预重传 GBN-ARQ 方案在不同 m 值下的吞吐率进行了仿真比较。由图 8 可以看出, 在相同 m 值的情况下, 后者要优于前者, 随着 m 值的增加, 两种方案的吞吐率都有所下降, 这是因为 m 越大, 预测对时延的改善越小, 当 $m = N$ 时预重传方案接近传统 GBN-ARQ 方案。同时, 由于 m 是个随机变量, 其值跟信道条件有关, 当信道条件差时, m 均值较小, 则相对传统 GBN-ARQ 方案有较大的吞吐率改善; 当信道条件好时, m 均值接近 N , 改善不明显。因此, 可以从理论上解释图 6 中随着误码率的增加自适应预重传 GBN-ARQ 方案对吞吐率的改善加大的情况。

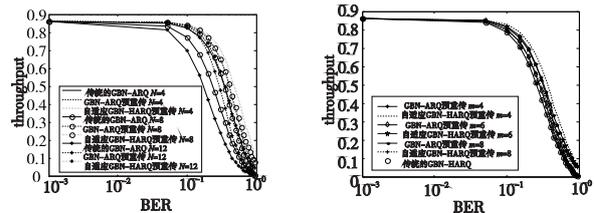


图 7 三种方案在不同发送窗口长度下的吞吐率性能比较

图 8 传统预重传方案与自适应预重传方案在不同 m 值下的吞吐率比较

4 结束语

本文提出了一种自适应预重传 GBN-HARQ 方案, 结合预重传与纠错冗余机制, 根据上行信道提取的 CSI 对重传冗余进行自适应的调整, 进一步提高了系统性能。通过把影响系统性能的主要因素参数化, 建立了三种方案的吞吐率性能模型。仿真结果表明, 自适应预重传 GBN-HARQ 方案在信道条件较差时, 较另外两种方案有着更好的吞吐率性能, 较好地克服了传统 GBN-ARQ 方案中随着信道传输错误率增加而时延迅速增加、吞吐量急剧下降的问题。

参考文献:

- [1] 王文东, 龚向阳, 阙喜戎, 等. 宽带通信网原理[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006: 19-24.
- [2] 蹇蹇, 蒋红艳, 黄生叶. 随机反馈延时下回退式 ARQ 协议的延时分析[J]. 计算机工程, 2010, 36(21): 109-111.
- [3] QIN Yang, YANG Lie-liang. Delay comparison of automatic repeat request assisted butterfly networks[C]//Proc of International Symposium on Wireless Communication Systems. 2010: 686-690.
- [4] NAKAMURA O, MATSUKI H, TAKANASHI H. Pre-repeat go-back-n ARQ with error prediction in fading channel[C]//Proc of Global Communications Conference. 1996: 1011-1014. (下转第 514 页)

图4是在理想传输信道下传统协作感知方法、文献[7-9]算法和本文算法的感知性能曲线比较。从图4中可以看出,总体上本文算法在低联合虚警概率下的检测概率要好于文献[7~9]算法和传统协作感知方法,而文献[7~9]算法的感知性能与传统协作感知方法相比具有不同程度的优势。

保持检测信噪比不变,假设第1个认知用户的传输信道也受到严重的阴影衰落影响,其传输信噪比为-21 dB,其他4个认知用户的传输信噪比分别为-12 dB、-12.4 dB、-12.7 dB和-11.6 dB。不妨假设传输信噪比在大于-10 dB时,传输错误率极低,可视为理想传输信道,此时令其错误率为0,对于非理想传输信道,可以利用公式 $P_{ei} = (SNR_{di} + 10)/1000$ 来计算假设的各认知用户的传输错误率,其中是各认知用户的传输信噪比。

图5是传输信道存在部分阴影衰落时本文算法等六种不同协作感知算法的检测性能比较曲线。与图4相比,从图5中可以看出,在传输信道比较差时,文献[7~9]算法和传统协作感知算法由于没考虑传输错误和低检测可信度认知用户对协作感知的影响,检测性能受到很大影响,特别是在低虚警概率0.1以下尤为严重。而本文算法考虑到传输信道衰落的影响,合理地给各认知用户分配合适传输可信度,这样可以有效降低不利影响,因此仍能获得较高的检测概率。

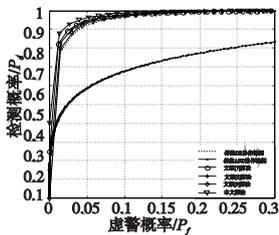


图4 理想传输信道下六种不同协作频谱感知方案性能对比曲线

(其中, $N=5$, $M=6$, 检测信噪比为-14 dB、-15.5 dB、-16.5 dB、-15 dB和-25 dB)

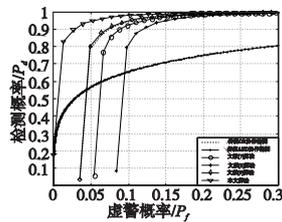


图5 传输信道存在部分阴影衰落时六种算法的检测性能对比

($N=5$, $M=6$, 检测信噪比为-14 dB、-15.5 dB、-16.5 dB、-15 dB和25 dB; 传输信噪比为-21 dB、-12 dB、-12.4 dB、-12.7 dB和-11.6 dB)

5 结束语

本文采用基于动态阈值和可信度的协作频谱感知方法,通过过滤低检测可信度认知用户,以此来消除低检测可信度认知用户参与协作感知对整体检测性能的消极影响,同时与传统方

法相比也能降低系统开销。此外,通过动态调整各认知用户的检测门限和分配传输可信度,可有效降低检测信道和传输信道同时存在阴影等衰落时对协作检测性能的影响。仿真结果表明,本文提出的算法在检测信道和传输信道同时存在阴影等衰落时,具有较好的频谱感知性能。

参考文献:

- [1] MITOLA J, MAGUIRE G Q. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. *IEEE Personal Communications*, 1999,6(4): 13-18.
- [2] CABRIC D, MISHRA S M, WILLKOMM D, et al. A cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum[C]//Proc of the 14th IST Mobile Wireless Communications Summit. 2005.
- [3] LIANG Ying-chang, CHEN Kwang-cheng, LI G Y. et al. Cognitive radio networking and communications: an overview[J]. *IEEE Trans on Vehicular Technology*, 2011,60(7): 3386-3407.
- [4] 陈亚琨,赵海峰,穆晓敏. 认知无线电基于感知信息量化的合作频谱感知[J]. *电视技术*, 2012,36(17): 106-109.
- [5] AKVILDIZ Ian F, B F, BALAKRISHINAN R et al. Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: a survey [J]. *Physical Communication*, 2011,4(1): 40-62.
- [6] PENG Qi-hang, ZENG Kun, WANG Jun, et al. A distributed spectrum sensing scheme based on credibility and evidence theory in cognitive radio context [C]//Proc of the 17th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. 2006:1-5.
- [7] 杨铁军,司春丽. 基于信任度加权的合作频谱感知算法[J]. *计算机应用研究*, 2012,29(8): 3124-3127.
- [8] 肖林,刘凯. 认知无线网络中的最佳可信度频谱检测算法[J]. *西安电子科技大学学报*, 2011,38(5): 79-84.
- [9] 郭加贝,章坚武. 一种基于信噪比的动态门限协作感知方法[J]. *计算机工程*, 2012,38(3): 91-92, 96.
- [10] URKOWITZ H, GENERAL A C, PHILADELPHIA P. Energy detection of unknown deterministic signals [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1967,55(4): 523-531.
- [11] 张平,冯志勇. 认知无线网络[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 71-75.

(上接第499页)

- [5] 何波,李军,林家儒,等. TDD 慢衰落系统中的预重传 GBN-ARQ 性能分析[J]. *电子与信息学报*, 2006,28(11): 2086-2089.
- [6] 何波,李军,林家儒,等. 具有缓存结构的 GBN 预测重传[J]. *通信学报*, 2005,26(12): 24-29.
- [7] 董洛兵,易克初,沈沛意. TDD 慢衰落无线通信系统的预重传协同 GBN-ARQ 算法[J]. *通信学报*, 2012,33(2): 149-155.
- [8] CHASE D. Code combining: a maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noise packets [J]. *IEEE Trans on Communications*, 1985,33(5): 385-393.
- [9] ROWITCH D N, MILSTEIN B. On the performance of hybrid FEC/ARQ systems using rate compatible punctured Turbo codes [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2000,48(6): 948-959.

- [10] GARG D, KIMURA R, ADACHI F. RCPT hybrid ARQ with limited number of retransmissions in DS-CDMA [J]. *IEEE Electronic Letters*, 2003,39(2): 241-242.
- [11] CHENG Jung-fu. Coding performance of hybrid ARQ schemes [J]. *IEEE Trans on Communications*, 2006,54(6): 1017-1029.
- [12] GU Jian, ZHANG Yi, YANG Da-cheng. Modeling conditional FER for hybrid ARQ [J]. *IEEE Communications Letters*, 2006,10(5): 384-385.
- [13] MANTHA R, KSCHISCHANG F. A capacity-approaching hybrid ARQ scheme using Turbo codes [C]//Proc of Global Communications Conference. 1999:2341-2345.
- [14] 刘锋,黄生叶,冯穗力,等. 新型的基于信道状况的自适应 HARQ 方案[J]. *计算机工程与应用*, 2010,46(8): 99-102.