

# 认知无线电网络下基于协同ARQ反馈 频谱共享策略

张奇奇<sup>1</sup>, 黎锁平<sup>1</sup>, 张仕明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>兰州理工大学理学院, 甘肃 兰州

<sup>2</sup>甘肃省水务投资有限责任公司, 甘肃 兰州

Email: 1596922591@qq.com, 2522345273@qq.com, 623233090@qq.com

收稿日期: 2021年4月9日; 录用日期: 2021年5月4日; 发布日期: 2021年5月12日

## 摘 要

为了提高认知无线电网络的性能, 在认知无线电网络下提出了一种频谱共享策略, 在这种策略下次级用户可以在基于自动重发请求(ARQ)反馈信息的情况下与主用户共存, 提出了协同与接入频谱共享模式, 次级系统能够在协同与接入两种模式下交互, 在协同模式下, 次级用户辅助主用户传输, 降低了主用户的冗余传输, 建立了主次用户传输状态的马尔科夫链, 推导出了稳态下的系统吞吐量表达式。接入模式下, 当主用户返回了一个否定应答(NACK)时, 主用户要进行重传, 在重传时期实现了主次用户的同时传输, 次级用户获得了频谱接入机会, 分析了接入模式下的吞吐量增益。利用MATLAB软件对系统吞吐量性能进行了数值对比验证, 结果表明在共享策略下系统吞吐量更高。

## 关键词

认知无线电网络, 频谱共享, 协同与接入, 马尔科夫链, 吞吐量增益

# Spectrum Sharing Strategy Based on Cooperative ARQ Feedback in Cognitive Radio Networks

Qiqi Zhang<sup>1</sup>, Suoping Li<sup>1</sup>, Shiming Zhang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

<sup>2</sup>Gansu Water Investment Co., Ltd., Lanzhou Gansu

Email: 1596922591@qq.com, 2522345273@qq.com, 623233090@qq.com

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2021; accepted: May 4<sup>th</sup>, 2021; published: May 12<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to improve the performance of cognitive radio network, spectrum sharing strategy is proposed in the cognitive radio network. Under this strategy, the secondary user can coexist with the primary user based on the automatic retransmission request (ARQ) feedback information. The spectrum sharing mode of cooperation and access is proposed. The secondary system can interact in the two modes of cooperation and access. In the cooperative mode, the secondary user can assist the primary user (PU) transmission, and the redundant transmission of primary and secondary users is reduced. The Markov chain of primary and secondary user's transmission state is established, and the system throughput expression in steady state is derived. In the access mode, when the primary user returns a NACK (negative acknowledgement), the primary user needs to retransmit. During the retransmission period, simultaneous transmission of the primary and secondary users is realized, and the secondary users get the opportunity of spectrum access. The throughput gain in the access mode is analyzed. MATLAB is used to compare and verify the system throughput performance. It can be concluded that the system has higher throughput under the sharing strategy.

## Keywords

Cognitive Radio Network, Spectrum Sharing, Cooperation and Access, Markov Chain, Throughput Gain

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着数据网络和信息技术的不断发展,尤其是移动通信设备的能量和频谱资源需求指数的增长,使得频谱的使用愈加紧张,同时频谱的使用策略显示在任意时空域有大量的授权频谱空闲。因此,出现了许多的频谱共享协议和模型[1]。认知无线网络迅速发展成为了一种新兴的技术被用来解决频谱短缺问题,认知无线网络可以根据实时环境调整无线特性,实现频谱的有效利用。在认知无线网络中,通常定义主用户为授权频谱,主用户一般具有频谱优先使用权,次级用户为非授权频谱,当主用户空闲时,次级用户接入频谱传输,但次级用户也可以与主用户共享频谱[2]。在认知无线电中经典的使用频谱的方法是基于频谱感知,次级用户检测频谱空洞然后接入空闲频带。但在下垫式频谱共享模式下,主用户和次级用户可以同时使用频谱。目前在认知无线电中主要的频谱共享模式有三种:交织式,覆盖式和下垫式。在传统的频谱感知模型中[3],次级用户持续性地感知主信道的传输,一旦感知到频谱“空穴”则传输自己的数据,同时避免对于主用户的干扰。然而,这种传统的机制会引起主用户的误检和冲突,从而造成频谱资源浪费。基于此,对于次级用户与主用户共存的频谱共享模型被提出[4][5],但是要保证主用户的性能不受影响,即保证次级用户对于主用户的干扰阈值低于一定阈值,这就需要准确地估计信道状态信息,而实际上获取信道状态信息是难的。在协同模式下[6],次级用户充当主用户传输的中继,辅助主用户传输,次级传输通过将次级信号叠加在主用户信号上进行传输,但这样对于次级用户的传输可靠性没有保障。因此,许多机制通过利用主系统 ARQ (自动重发请求)过程中的 ACK/NACK (肯定/否定应答)反馈来实现频谱共享,通过侦听系统中的 ARQ 控制信号,认知无线电可以间接地获取信道状态信息和对于

主用户的干扰强度，实现动态地调整主次用户接入。

在协同模式下，如果检测到一个来自主接收机反馈的否定应答，则次级用户在解码成功主用户信息的情况下充当中继传输主用户的信息，主用户的吞吐量得到了提升。同时考虑了基于干扰消除的次级接入，当次级用户在一次传输后监控到一个非法的 ACK 或 NACK 时，次级发射机把其当作一个来自主接收机处的干扰，从而实现一次干扰消除[7]，接着次级用户可以在下一个时隙进行一次传输，使得在不影响主用户传输的情况下实现次级用户的接入。

对于次级用户与主用户同时传输时的干扰消除情形，可以构建马尔科夫模型来描绘主用户和次级用户的交互行为，提出了使次级用户达到最大吞吐量的策略。机会式的干扰消除模型在[8]中提出，次级用户在空闲期独自占用频谱传输，在忙期以一定的概率传输。但是在这种情况下当对于主用户重传次数没有限制时，整体的频谱效率必然会下降。

本文考虑了如图 1 所示的认知网络模型。一个次级收发对与一个基于主 ARQ 反馈的主收发对共存。次级系统在协同与接入过程之间切换，同时不降低主用户的吞吐量。本文的主要贡献如下：

首先，主用户不需要额外的信令开销用户用于协同传输过程，在频谱租借协议[9]中，主系统明确指出是否租借频谱给次级用户用于交换协作传输；其次，在协同传输阶段利用一个五状态的马尔科夫链来描绘主次用户的传输情况和交互行为；最后，我们提出的策略，对于主用户和次级用户是一个共赢的情况。在保证主用户传输的情况下，实现次级用户的接入，频谱使用效率提高。而在已有的工作[5]中，次级用户在主用户重传阶段进行传输，会导致主用户的性能下降。

## 2. 系统模型

如图 1，我们考虑一个单向的主用户和双向的次级用户传输认知无线系统，主用户包括 PU1 和 PU2 两个收发节点，次级用户也包括 SU1 和 SU2 两个节点，假设所有的节点都装配一根天线，PU1→PU2，PU1→SU1，PU1→SU2，SU1→PU2，SU1→SU2 之间的信道衰落系数为  $h_i$ ，将他们模型化为独立复高斯随机变量，表示为  $h_i \sim CN(0, d_i^{-\nu})$ ， $d_i$  表示两个节点之间的距离， $\nu$  为路径损耗指数。假设在每一次数据包传输时所有的信道都是准静态的。

在这里，所有的随机变量  $|h_i|$  服从指数分布，表示为  $|h_i| \sim e(\lambda)$ ，概率密度函数为

$$f(|h_i|^2) = \lambda e^{-\lambda|h_i|^2}, (\lambda = d_i^{-\nu}) \quad (1)$$

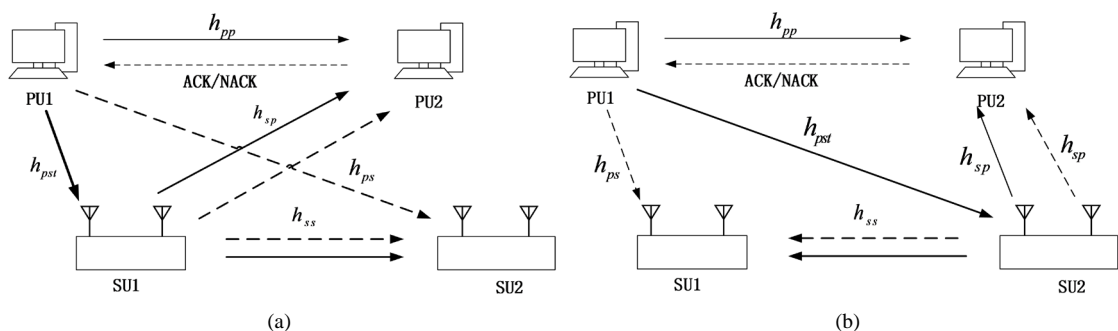


Figure 1. (a) SU1 cooperative transmission system; (b) SU2 cooperative transmission system

图 1. (a) SU1 协同传输系统；(b) SU2 协同传输系统

图 1(a)和图 1(b)分别表示通过 SU1 和 SU2 进行协同中继传输的情况，主用户和次级用户的目标速率为  $R_p, R_s$ ，采用解码转发的解码方式。先针对主数据包传输 2 次的情况进行讨论。

## 2.1. 协议描述

在非认知模式下传输数据包时，次级用户仅侦听主用户的传输。在主用户和次级用户处的接收信号可以表示为

$$y_p = h_{pp}s_p + h_{sp}x_{sp} + h_{sp}x_{ss} + z_p \quad (2)$$

$$y_s = h_{ss}x_{ss} + h_{ss}x_{sp} + h_{ps}s_p + z_s \quad (3)$$

在这里， $h_{pp}$  为主用户之间的信道增益， $h_{ps}$  为主发射机到次级接收机的信道增益， $h_{pst}$  为主发射机到次级发射机的信道增益， $h_{sp}$  为次级发射端到主接收端的信道增益， $h_{ss}$  为次级信道之间的信道增益。 $s_p$  为主用户发送信号， $x_{sp}$  为中继信号， $x_{ss}$  为次级用户发送信号。

当 SU1 或 SU2 中任意一个成功解码了来自 PU1 的数据包，此时 SU1 或 SU2 会发送一个 HTS (帮助传输) 的数据包，PU1 保持静默，直到 SU1 或 SU2 传输完成。依据最小干扰原则，选择 SU1 或 SU2 进行转发，最小干扰表示为

$$\hat{x}_p = \arg \min_{x_p} |y - \sqrt{P_p} h_{pi} x_p|^2 \quad (4)$$

其中  $\hat{x}_p$  代表通过 SU1 或 SU2 传输到 PU2 的决策数据包。PU2 处接收的数据包可以表示为

$$y_{ip} = \sqrt{P_{si}} h_{ip} \hat{x}_p + n \quad (5)$$

$P_{si}$  ( $i=1,2$ ) 为 SU1 或 SU2 的传输功率， $n$  为 SU2 处的高斯白噪声。在主次用户同时传输情况下，会收到来自彼此的干扰。

## 2.2. 传统模式

在传统模式下，由于无次级用户参与，只有主用户在传输，我们用一组互斥事件来描述主数据包的传输行为： $\omega_1 = \{\text{PU1 在第一次传输后收到 ACK}\}$ ； $\omega_2 = \{\text{PU1 在重传后收到 ACK}\}$ ； $\omega_3 = \{\text{PU1 在两次传输后都未收到 ACK, 主用户数据包 P1 丢失}\}$ 。

在这种模式下，不涉及到次级用户的传输，故没有次级用户对主用户的干扰存在。

## 2.3. 协同频谱共享模式

在协同频谱共享模式下，次级系统在协同和接入模式之间切换，在协同模式下，SU1 或 SU2 在成功解码来自 PU1 的数据包后可以充当主用户的中继来辅助主用户传输。SU 的另一种行为，即在下垫式模式下，当干扰阈值低于一定范围时，次级用户可以接入频谱与主用户同时传输。在协同模式下，在第一次传输时主用户数据包 P1 未在 PU2 处成功接收，SU1 和 SU2 开始尝试解码主用户数据包 P1，如果 P1 解码成功，将其表示为事件  $C_s$ 。如果未解码成功，表示为事件  $\bar{C}_s$ 。可以用一个五状态的马尔科夫链来描绘上述过程。各个状态定义如下： $S_1$ ：次级用户侦听，主用户发送一个新的数据包； $S_2$ ：主次用户同时传输； $S_3$ ：次级用户重传主用户数据包； $S_4$ ：主用户重传数据包，次级用户传输自己的数据包； $S_5$ ：主用户重传数据包，次级用户静默。五状态马尔科夫链示意图如图 2 所示。

转移概率表述如下：

$P_1$ ：PU1 到 PU2 信道传输成功的概率； $P_2$ ：PU1 到 PU2 信道传输失败，但在 PU1 到 SU1 和 PU1 到 SU2 中至少有一个信道传输成功； $P_3$ ：所有信道都传输失败的概率； $P_4$ ：在 SU1 到 SU2 干扰下 PU1 到 PU2 传输成功的概率； $P_5$ ：SU1 到 PU2 或 SU2 到 PU2 传输成功的概率。

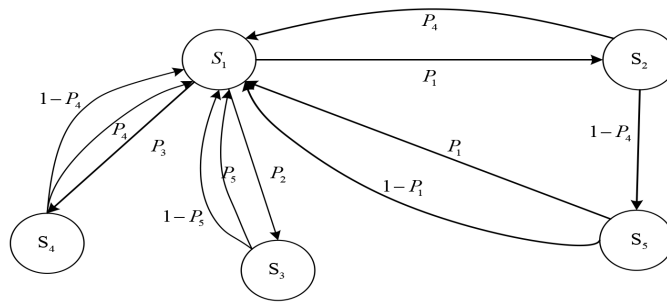


Figure 2. Markov chain transfer process  
图 2. 马尔科夫链转移示意图

## 2.4. 带有干扰消除的次级用户接入模式

在次级用户尝试接入频谱期间，次级用户需要持续的检测主包的传输以及 ACK、NACK 的反馈。在主包的第一次传输时，次级用户就尝试去解码主用户数据包 P1，以期望在主用户重传期间可以使用干扰消除技术，对于次级用户有下列互斥事件： $D_1 = \{\text{PU1 在第一次传输时在 SU 处解码成功}\}$ ； $\bar{D}_1 = \{\text{PU1 在第一次传输时未在 SU 处解码成功}\}$ 。

在  $D_1$  事件下，次级用户可以在主用户重传期间采用干扰消除技术。 $\bar{D}_1$  事件下，次级用户无频谱接入。对于主系统有下列互斥事件： $A_1 = \{\text{PU1 在第一次传输后收到 ACK}\}$ ； $A_2 = \{\text{PU1 在重传后收到 ACK}\}$ ； $A_3 = \{\text{PU1 在两次传输后都未收到 ACK，主用户数据包 P1 丢失}\}$ 。

基于是否有次级频谱接入，有下列联合事件： $\{A_1, \bar{D}_1\} = \{\text{第一次传输时主用户数据包 P1 未在 SU1 处成功解码}\}$ ，即无次级用户参与，且第一次传输成功； $\{A_2, D_1\} = \{\text{P1 在第一次传输时在 SU2 处成功解码，SU2 传输一个 INF，ACK 信号被损坏}\}$ ； $\{A_2, \bar{D}_1\} = \{\text{无次级用户接入，PU1 重传后收到 ACK}\}$ 。由于来自二次传输的干扰，在重传中主用户数据包 P1 不能在 PU2 处被接收，P1 丢失。即使重传的主数据包受到辅助传输的干扰，也有可能 PU2 处成功接收。我们假设当 SU1 同时发送时在 PU2 处发生冲突。

## 3. 吞吐量分析

我们首先进行  $N = 2$  的情形时系统的吞吐量分析，让  $O_i, i = pp, pst, sp, ps, ss$  分别代表 PU1→PU2, PU1→SU1, PU1→SU2, SU1→PU2, SU1→SU2 的中断概率。假设解码方式为高斯解码， $R_p, R_s$  分别为主用户和次级用户的目标速率。中断概率的表达式为

$$O_i = P \left\{ R_p > \log_2 \left( 1 + \frac{P_p |h_i|^2}{\sigma^2} \right) \right\} = 1 - e^{-d_i^v \frac{(2^{R_p} - 1)\sigma^2}{P_p}} \quad (i = pp, pst, ps, sp) \quad (6)$$

假设在 SU1 和 SU2 处利用了干扰消除技术，则 SU1↔SU2 处的中断概率表达式为

$$O_{ss} = P \left\{ R_s > \log_2 \left( 1 + \frac{P_s |h_{ss}|^2}{\sigma^2} \right) \right\} = 1 - e^{-d_{ss}^v \frac{(2^{R_s} - 1)\sigma^2}{P_s}} \quad (7)$$

这里涉及到 SU1 和 SU2 干扰下主用户之间传输成功的概率，干扰约束下主用户的中断概率为

$$O_{pp}^i = P \left\{ \log_2 \left( 1 + \frac{|h_{pp}|^2 P_p}{|h_{sp}|^2 P_s + N_0} \right) < R_p \right\} = 1 - \frac{d_{sp}^v}{\left( d_{pp}^v (2^{R_s} - 1) / P_{sp} \right) + d_{sp}^v} e^{-d_{dd}^v \frac{2^{R_p} - 1}{P_p / N_0}} \quad (8)$$

在这里  $P_{sp}$  代表次级用户传输到主用户的发射功率。

### 3.1. 传统模式下系统的吞吐量

在传统模式下每一个事件发生的概率为

$$P\{\omega_1\} = 1 - O_{pp}, \quad P\{\omega_2\} = O_{pp}(1 - O_{pp}), \quad P\{\omega_3\} = O_{pp}^2$$

定义吞吐量为每一个时隙成功转发的平均数据包数量, 考虑上述事件, 传统模式下 PU1→PU2 的吞吐量为

$$\eta_p = \frac{P(\omega_1) + P(\omega_2)}{P(\omega_1) + 2P(\omega_2) + 2P(\omega_3)} = 1 - O_{h_{pp}} \text{ pcckets/slot} \quad (9)$$

### 3.2. 协同模式下的吞吐量

在协同模式下, 主用户的吞吐量可以利用如图 2 给出的马尔科夫链的状态转移概率和稳态概率表示。各个信道的中断概率已知, 状态转移概率为

$$P_1 = 1 - O_{pp}, \quad P_2 = O_{pp}(1 - O_{pst})O_{ps} + O_{pp}O_{pst}(1 - O_{ps}) + O_{pp}(1 - O_{pst})(1 - O_{ps}),$$

$$P_3 = O_{pp}O_{pst}O_{ps}, \quad P_4 = 1 - O_{pp}^i, \quad P_5 = 1 - O_{sp}$$

中断概率可以通过式(6)和(7)计算得出。设稳态概率为  $\pi = (\pi_1, \pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5)$ , 则状态转移矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & P_1 & P_2 & P_3 & 0 \\ P_4 & 1 & 0 & 0 & 1 - P_4 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

由  $\begin{cases} \pi P = \pi \\ \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1 \end{cases}$  得

$$\begin{cases} \pi_1 = \pi_1 + P_4\pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 \\ \pi_2 = P_1\pi_1 + \pi_2 \\ \pi_3 = P_2\pi_1 + \pi_3 \\ \pi_4 = P_3\pi_1 + \pi_4 \\ \pi_5 = (1 - P_4)\pi_2 + \pi_5 \end{cases}$$

$$\text{解得 } \pi_1 = \frac{1}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4}; \quad \pi_2 = \frac{P_1}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4}; \quad \pi_3 = \frac{P_2}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4};$$

$$\pi_4 = \frac{P_3}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4}; \quad \pi_5 = \frac{P_1(1 - P_4)}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1P_4}。$$

主用户传输时只在状态  $\pi_1, \pi_5, \pi_2, \pi_4, \pi_3$  以概率  $P_1, P_1, P_4, P_4, P_5$  传输成功, 主用户的吞吐量表示为

$$\eta_{pc} = \pi_1 P_1 + \pi_2 P_4 + \pi_3 P_5 + \pi_4 P_4 + \pi_5 P_1 = \frac{P_1 + P_1 P_4 + P_2 P_5 + P_3 P_4 + P_1^2 - P_1^2 P_4}{1 + 2P_1 + P_2 + P_3 - P_1 P_4} \text{ packets/slot} \quad (10)$$

在协同模式下, 由此次级用户没有传输自己的数据包, 次级用户只是协助主用户传输, 故无次级用户的吞吐量。

### 3.3. 次级用户接入传输情况下的主次吞吐量分析

在这里，次级用户的传输分为两种状态：一是次级用户持续感知频谱“空洞”，一旦感知到频谱空闲，次级用户就接入频带进行传输；二是次级用户传输模式发生在主用户重传的间隙，一旦次级用户在主用户第一次传输期间获取到主用户的信息，则可以在主用户后面的重传过程中利用主用户重传的间隙次级用户传输其数据。定义以下事件，主系统有以下互斥事件： $A_1 = \{\text{PU1 在第一次传输后收到 ACK}\}$ ； $A_2 = \{\text{PU1 在重传后收到 ACK}\}$ ； $A_3 = \{\text{PU1 在两次传输后都未收到 ACK, 主用户数据包 P1 丢失}\}$ 。

次级用户接入传输的流程图如图 3 所示：

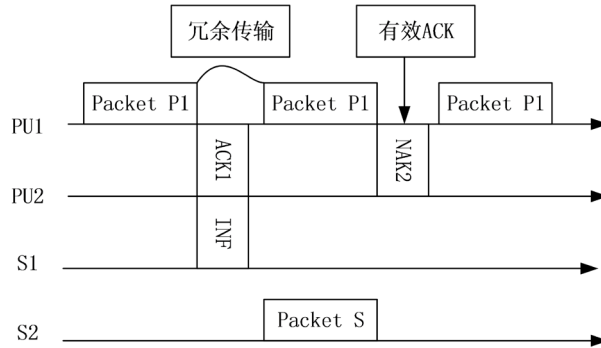


Figure 3. Schematic diagram of secondary user access  
图 3. 次级用户接入示意图

即次级用户利用主用户的冗余传输获得自身的传输机会。但是在这里还涉及到两种情况，一种是次级用户 SU1 和 SU2 可以解码主用户信息，另一种是次级用户无法解码主用户信息。如果次级用户无法解码主用户信息，则这里考虑的冗余传输无法使用。

1) 接入模式下的主吞吐量可以表示为

$$\eta_p^A = \frac{P\{A_1\} + P\{A_2\}}{P\{A_1\} + 2P\{A_2\} + 2P\{A_3\}} = \frac{(1 - O_{h_{pp}})(1 + O_{h_{pp}} O_{h_{ps}})}{2 - O_{h_{ps}} + O_{h_{pp}} O_{h_{ps}}} \text{ packets/slot} \quad (11)$$

2) 接入模式下次级用户的吞吐量为

$$\eta_s = \frac{[P\{A_2, D_1\} + P\{A_3, D_1\}](1 - O_{h_{ss}})}{P\{A_1\} + 2P\{A_2\} + 2P\{A_3\}} = \frac{(1 - O_{h_{ps}})(1 - O_{h_{ss}})}{2 - O_{h_{ps}} + O_{h_{pp}} O_{h_{ps}}} \text{ packets/slot} \quad (12)$$

3) 协同模式下的系统吞吐量增益为

$$\begin{aligned} c = \eta_{pc} - \eta_p &= 1 - O_{h_{pp}} + \frac{O_{h_{pp}}(1 - O_{h_{pst}})(O_{h_{pp}} - O_{h_{sp}})}{1 + O_{h_{pp}}} - (1 - O_{h_{pp}}) \\ &= \frac{O_{h_{pp}}(1 - O_{h_{pst}})(O_{h_{pp}} - O_{h_{sp}})}{1 + O_{h_{pp}}} \text{ packets/slot} \end{aligned} \quad (13)$$

4) 接入模式下的系统吞吐量增益为

$$c = \eta_{pc} - \eta_p^A = 1 - O_{h_{pp}} + \frac{O_{h_{pp}}(1 - O_{h_{pst}})(O_{h_{pp}} - O_{h_{sp}})}{1 + O_{h_{pp}}} - \frac{(1 - O_{h_{pp}})(1 + O_{h_{pp}} O_{h_{ps}})}{2 - O_{h_{ps}} + O_{h_{pp}} O_{h_{ps}}} \text{ packets/slot} \quad (14)$$

#### 4. 数值结果及其分析

在这一节中，利用 MATLAB 数值模拟对提出的方案进行了验证。主要对中断概率和不同模式下主次用户的吞吐量进行了数值模拟分析。依次将传统模式、协同模型与共享模式的系统吞吐量进行比较，从而验证共享模式下系统性能的优越性。

##### 1) 传统与协同模式下的系统吞吐量

在这一节中，首先针对主次用户的中断概率进行了数值模拟，然后对于传统模式、协同模式、接入模式下的主次用户吞吐量进行了数值模拟比较。参数设定如下：主次用户功率为  $P_p = P_s = 1$ ，PU 与 SU 对应的距离为  $d_{PU1 \rightarrow PU2} = 1$ ， $d_{PU1 \rightarrow SU1} = \sqrt{2}/2$ ， $d_{SU2 \rightarrow PU2} = \sqrt{2}/2$ ， $d_{SU1 \rightarrow SU2} = 1/2$ 。

在传统模式下，由于无次级用户参与，只涉及到主用户的传输，即主用户独立使用频谱传输，无次级用户参与。我们分别对各种情况的结果进行了数值模拟，如图 4、图 5、图 6 所示，对比分析图 4、图 5、图 6，可以得出协同模式和接入的吞吐量比传统模式的吞吐量要高，接入模式的吞吐量增长比协同模式快，也验证了我们提出的策略的优势。

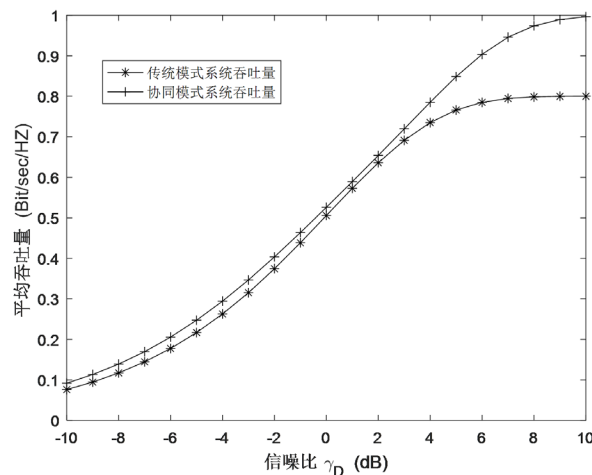


Figure 4. System throughput of traditional and cooperative mode  
图 4. 传统模式与协同模式的系统吞吐量

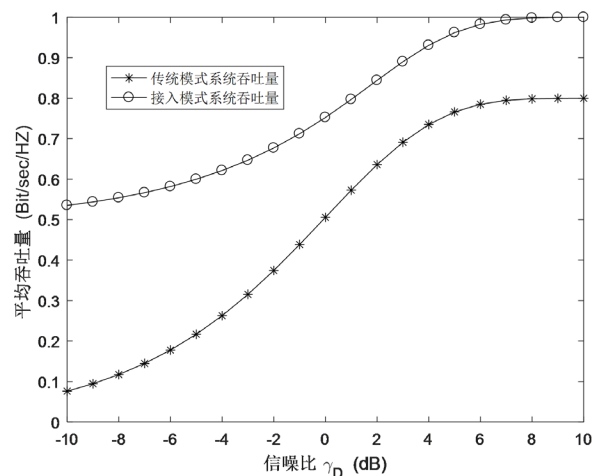


Figure 5. System throughput of traditional and access mode  
图 5. 传统模式与接入模式的系统吞吐量



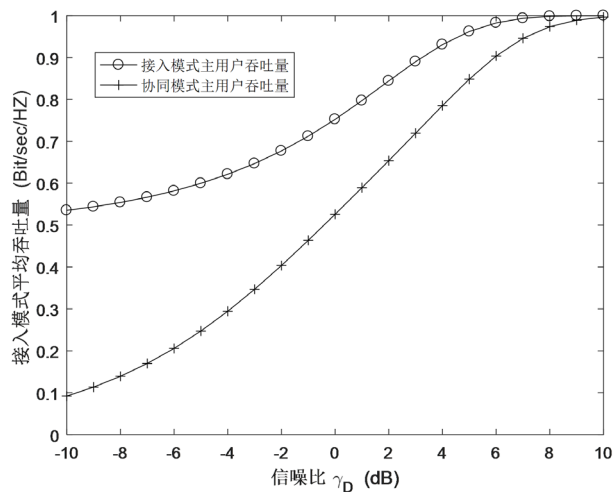


Figure 6. System throughput of access mode and cooperative mode

图 6. 接入模式与协同模式的系统吞吐量

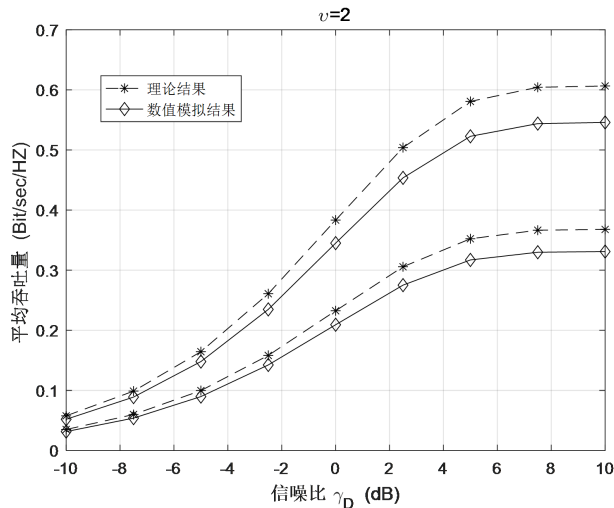


Figure 7. Throughput of cooperative system with  $v=2$

图 7. 协同模式下  $v=2$  时的系统吞吐量

在协同模式下，我们分别针对路径损耗因子为  $v=2$  和的情况进行了仿真分析，由于次级用户可以协助主用户传输主用户前一次传输失败的数据包，中间会涉及  $v=4$  到有一个时延的延迟，即次级用户解码主信息的过程，从图 7 和图 8 可以看出，当信噪比达到一定值时，系统的峰值吞吐量传统模式下略低一点，主要是在这里是在考虑系统最后达到饱和的状态下的吞吐量。对比图 7 和图 8，可以得出当路径损耗因子不同时，系统达到峰值吞吐量的信噪比不同，可以看出，当路径损耗因子越大时，系统达到峰值吞吐量所需的信噪比要求越低。

## 2) 接入模式的主次吞吐量

最后，对于次级用户接入模式下，即主用户不占用频谱时，次级用户接入频谱进行传输，或者是次级用户利用干扰消除方法得到的自身吞吐量的增益。由图 9 可以得出，当信噪比越大时，即主用户信号所占比例越大时，主用户的吞吐量逐渐变大，由于主用户持续的回归使用频谱，导致次级用户的吞吐量逐渐下降。可以看出，在信噪比较小的情况下，次级用户可以接入频谱传输。

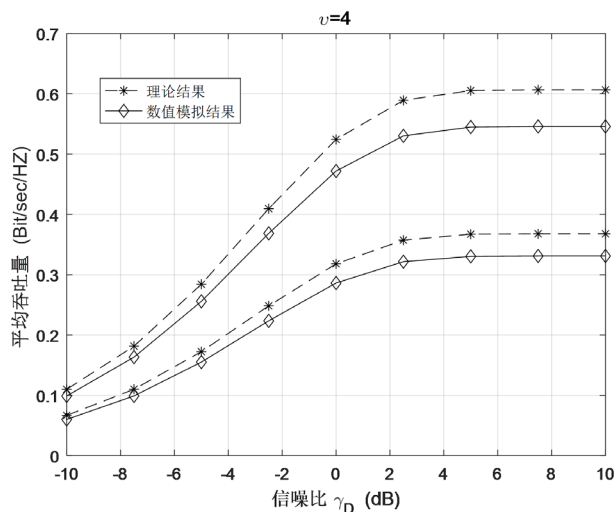


Figure 8. Throughput of cooperative system with  $v = 4$

图 8. 协同模式下  $v = 4$  时的系统吞吐量

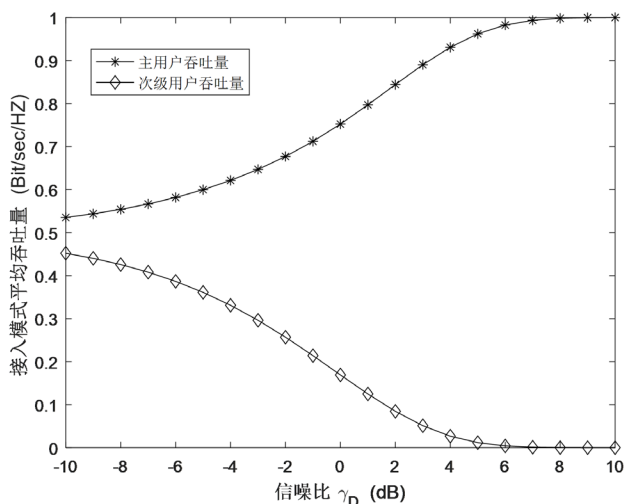


Figure 9. Throughput of primary and secondary users in access mode

图 9. 接入模式下主次用户吞吐量

## 5. 结束语

在本文中，我们提出了一个协同与接入的频谱共享策略，次级用户可以在协同和接入模式下获得频谱接入机会。在协同模式下，次级发送端可以在解码成功主信息的情况下，充当主用户的中继辅助主用户传输，从而提升主用户的吞吐量增益。同时，在接入模式下，次级用户接入频谱主要采用两种方式：1) 主用户空闲，次级用户直接接入；2) 次级用户利用提出的干扰消除方法，在完全获取主信息的情况下接入频谱。通过上述的策略，相对于没有使用频谱共享策略，主系统可以得到一个同等或者更高的吞吐量，同时使得次级系统可以获得频谱接入，使得频谱得到更加有效的利用。

## 参考文献

- [1] Mitola, J. (2000) Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio. KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

- 
- [2] Chkurbene, Z. and Hamdi, N. (2015) A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks. *International Journal of Wireless and Mobile Computing*, **8**, 153-165. <https://doi.org/10.1504/IJWMC.2015.068618>
- [3] Liang, Y.C., Zeng, Y., Peh, E.C.Y., et al. (2008) Sensing-Throughput Tradeoff for Cognitive Radio Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **7**, 1326-1337. <https://doi.org/10.1109/TWC.2008.060869>
- [4] Zhu, R., Li, Y., Gao, F., et al. (2015) Relay Opportunistic Spectrum Sharing Based on the Full-Duplex Transceiver. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, **64**, 5789-5803. <https://doi.org/10.1109/TVT.2014.2387699>
- [5] Tannious, R.A. and Nosratinia, A. (2010) Cognitive Radio Protocols Based on Exploiting Hybrid ARQ Retransmissions. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **9**, 2833-2841. <https://doi.org/10.1109/TWC.2010.062910.091162>
- [6] Saraç, S. and Aygözü, Ü. (2018) ARQ-Based Cooperative Spectrum Sharing Protocols for Cognitive Radio Networks. *Wireless Networks*, 19 February 2018, 2573-2585. <https://doi.org/10.1007/s11276-018-1686-3>
- [7] Cheng, S.M., Ao, W.C. and Chen, K.C. (2011) Efficiency of a Cognitive Radio Link with Opportunistic Interference Mitigation. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, **10**, 1715-1720. <https://doi.org/10.1109/TWC.2011.040411.101503>
- [8] Wang, F., Li, S., Dou, Z., et al. (2019) Performance Analysis of a Novel Distributed C-ARQ Scheme for IEEE 802.11 Wireless Networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, **13**, 3447-3469. <https://doi.org/10.3837/tiis.2019.07.007>
- [9] Stanojev, I., Simeone, O., Spagnolini, U., et al. (2010) Cooperative ARQ via Auction-Based Spectrum Leasing. *IEEE Transactions on Communication*, **58**, 1843-1856. <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2010.06.080575>