

# 认知 OFDM 系统中一种改进的注水功率分配算法

王业胜<sup>1,2</sup>, 季 薇<sup>1,2</sup>, 侯晓赞<sup>1,2</sup>

(1. 南京邮电大学 通信与信息工程学院, 江苏 南京 210003;  
2. 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 江苏 南京 210003)

**摘 要:** 认知环境中, 认知用户在不干扰授权用户的前提下, 和授权用户能够同时共享频谱并传送数据, 使得系统传输速率和频带利用率最大化。文中主要针对认知 OFDM 系统, 在注水算法的基础上提出了一种改进算法。该算法全面考虑了干扰温度限制, 结合各子信道的噪声值, 通过对信道进行合理排序, 从中正确选取需要分配功率的信道并合理分配功率, 从而使得系统功率分配达到最优。仿真结果证明该算法能够充分利用信道, 提高传输速率, 验证了数据的正确性。

**关键词:** 认知 OFDM; 注水算法; 功率分配

中图分类号: TP301.6

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2013)01-0079-04

doi: 10.3969/j.issn.1673-629X.2013.01.020

## An Improved Algorithm Based on Water-filling Power Allocation in Cognitive OFDM System

WANG Ye-sheng<sup>1,2</sup>, JI Wei<sup>1,2</sup>, HOU Xiao-yun<sup>1,2</sup>

(1. College of Telecommunication & Information Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210003, China;  
2. Key Lab of Broadband Wireless Communication and Sensor Network Technology, Ministry of Education, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** In cognitive environment, with the premise of not interfering authorized users, cognitive users can also share spectrum and transmit data with authorized users, make the system transmission rate and band utilization maximized. It proposes an improved algorithm based on water-filling method in cognitive OFDM system. The interference constraint is fully taken into consideration, combined with the noise value of each channel, choose the channels correctly which need power by reasonably sorting the whole channels and optimize the power allocation. The simulation also proves the novel method can make the best use of channels and improve the transmitting rate, and the data is correct.

**Key words:** cognitive OFDM; water-filling algorithm; power allocation

## 0 引 言

认知无线电 (Cognitive Radio, CR)<sup>[1]</sup> 可使认知用户 (Second User, SU) 在不干扰授权用户 (Primary User, PU) 的前提下, 动态感知并接入 PU 的授权频谱, 从而提高频谱利用率, 增加数据传输速率。根据 SU 接入网络的方式, 频谱共享技术可分为填充式 (Overlay) 和共享式 (Underlay)。填充式是指 SU 利用未被 PU 使用的频谱空洞接入网络。共享式是指 SU 与 PU 同

时共用同一段频谱, 前提是 SU 不能对 PU 的通信造成干扰, 衡量指标是干扰温度<sup>[2]</sup>; SU 可根据系统中监测点的反馈信息自动调整功率, 使其对 PU 接收端产生的干扰小于干扰温度门限。

OFDM 在频域将信道分为多个子载波, 各子载波之间相互正交, 既减小了子载波之间的相互干扰, 又提高了频谱利用率和系统传输速率<sup>[3]</sup>。OFDM 与 CR 技术相结合, 可有效利用频谱, 节约资源。

OFDM 方法中, 如没有干扰温度的限制, 使用注水法进行功率分配能使系统传输速率最大化<sup>[4]</sup>。文献[5]用梯度法解决对偶问题, 在迭代次数少时难以得到最优解。文献[6]研究了瑞利衰落下的传统注水法。文献[7]从噪声值出发, 提出了在认知环境下的线性注水法。文献[8]以若干信道噪声值依次作为注

收稿日期: 2012-04-17; 修回日期: 2012-07-20

基金项目: 江苏省高校优势学科建设工程资助项目 -- “信息与通信工程”; 南京邮电大学引进人才项目 (NY209003)

作者简介: 王业胜 (1988-), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 研究方向为认知无线电技术与协作通信技术等; 季 薇, 讲师, 研究生导师, 研究方向为通信信号处理、协作通信与认知无线通信等。

水面,每个信道选取以该注水面得到的功率和不超过干扰温度限制的功率二者的较小值作为该信道分配功率,并将该功率和与总功率相比较,剔除不需要分配功率的信道。文献[9]以传统注水法为基础,先不考虑干扰温度,剔除信道,剩余信道按注水法分配功率,再与各个信道的干扰温度相比较,把超过干扰温度的功率替换为干扰温度限制功率,在剩余信道中重新使用注水法分配,并与干扰温度要求的功率进行比较,不停迭代,直至所有的信道功率都不大于各自干扰温度限制功率。以上方法中,均未全面考虑干扰温度和信道状况,因此不能保证正确剔除不需要分配功率的信道,不能保证功率分配完全,更不能保证剩余信道的功率分配最优。在此基础上,文中提出了一种新的功率分配方法,该算法充分考虑了干扰温度限制和噪声值,通过正确地剔除信道,然后在剩余的信道中合理分配功率,从而使得系统功率分配达到最优,系统的传输速率最大化。

## 1 系统模型

文中假设认知无线网络(Cognitive Radio Network, CRN)由一对 PU 发送接收端和一对 SU 发送接收端构成。系统采用 OFDM 技术,其中,PU 可用带宽为  $B\text{Hz}$ ,可用信道  $K$  个,PU 和 SU 以共享式方法共享频谱。SU 的总发送功率设为  $P$ ,子载波  $k$  上的信道增益为  $|g_k|^2$ ,发送功率为  $p_k$ ,对 PU 的干扰信道增益为  $|h_k|^2$ 。为简化分析,瑞利衰落信道下,  $|g_k|^2$ ,  $|h_k|^2$  都设为 1。

设  $Q_k$  为 SU 在第  $k$  个子载波上的最大干扰功率限制,即干扰限。不考虑邻小区干扰和多用户共享子载波,则第  $k$  个子载波的干扰限可表述为<sup>[10]</sup>:

$$p_k |h_k|^2 \leq Q_k \quad (1)$$

$Q_k$  可用  $C_k$  等效的表示:

$$C_k = Q_k / |h_k|^2 \quad (2)$$

式(1)可简化为:

$$p_k \leq C_k \quad (3)$$

采用多进制正交幅度调制(MQAM)和理想相位检测,信道  $k$  的噪声方差为  $\sigma_k^2$ ,单个子载波上的传输速率为<sup>[11,12]</sup>:

$$R_k = \log_2(1 + p_k |g_k|^2 / \sigma_k^2 \Gamma) \quad (4)$$

其中,  $\Gamma$  为误比特率函数。

定义等效噪声功率  $I_k$  为:

$$I_k = \sigma_k^2 \Gamma / |g_k|^2 \quad (5)$$

式(4)改写为:

$$R_k = \log_2(1 + p_k / I_k) \quad (6)$$

系统的功率分配问题可建模为满足总功率要求和

干扰温度限下的 CRN 系统传输速率最大化问题,即:

$$\begin{aligned} \max \quad & R = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \frac{p_k}{I_k}) \\ \text{s. t.} \quad & \begin{cases} \sum_{k=1}^K p_k \leq P \\ p_k \leq C_k \end{cases} \end{aligned} \quad (7)$$

## 2 已有算法

为解决上述问题,文献[9,13]提出了一种基于传统注水法的功率分配算法,算法流程如下:

第一,先不考虑各个信道干扰限  $C_k$ ,由式(7)构造 Lagrange 函数:

$$L = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \frac{p_k}{I_k}) - \lambda (\sum_{k=1}^K p_k - P) \quad (8)$$

其中,  $\lambda$  为拉格朗日乘子。

式(8)两边分别对  $P$ ,  $\lambda$  求导,有

$$\frac{\partial L}{\partial P} = \frac{1}{\ln 2} \frac{1}{p_k + I_k} \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda} = \sum_{k=1}^K p_k - P = 0$$

由式(9)可以得到各个信道的功率  $p_k$ :

$$p_k = \frac{1}{K} (P + \sum_{k=1}^K I_k) - I_k \quad (10)$$

由式(10),会有  $p_k < 0$ ,即信道噪声  $I_k$  大于注水面  $(\frac{1}{K}(P + \sum_{k=1}^K I_k))$  的情况,剔除  $p_k < 0$  信道,重复(8)~(10),直至所有  $p_k$  为非负值,此时信道个数为  $M$ 。

第二,各个信道的  $p_k$  不能超过各自干扰限  $C_k$ ,将  $M$  个信道的  $p_k$  与各自  $C_k$  比较,如有  $L$  个信道  $p_k > C_k$ ,将这些信道的  $p_k$  调整为各自的  $C_k$ ,总功率  $P$  减去  $C_k$  之和,得到剩余功率,在剩余  $(M - L)$  个信道中按(8)~(10)重新分配  $p_k$ ,再与各自  $C_k$  比较,如果还存在  $p_k > C_k$ ,重复调整  $p_k$ 、重新分配  $p_k$ 、与  $C_k$  比较等步骤,直至所有的  $p_k \leq C_k$ 。

该算法中,剔除信道的步骤只适用于信道不存在  $C_k$  限制的时候。如  $C_k$  存在,则会误剔除信道,使总功率  $P$  分配不完,系统的传输速率不高。所以,应全面考虑  $C_k$ ,避免误剔除信道情况的发生。

## 3 基于注水算法的改进

### 3.1 理论分析

若已正确剔除不需要分配功率的信道,由传统注水法分配功率,会有若干  $p_k > C_k$  的信道,找出这些信道,令其  $p_k = C_k$ ,剩余信道才可使用注水算法。若正确剔除后共有  $K$  个信道,其中  $N$  个信道:  $p_k = C_k$ ,剩余  $(K - N)$  个信道按注水法得到  $p_k$ ,最终注水面为  $\mu$ ,总

功率  $P$  的表达式为:

$$\sum_{k=1}^N C_k + \sum_{k=N+1}^K (\mu - I_k) = P \quad (11)$$

从式(11)结合上述分析,问题的关键是首先要正确剔除不需要分配功率的信道,然后在剩余信道中找出  $p_k = C_k$  的信道及数目,直接关系到最终注水面的确定、后续信道的功率分配以及系统传输速率的计算。

### 3.2 算法流程

算法流程图见图1。

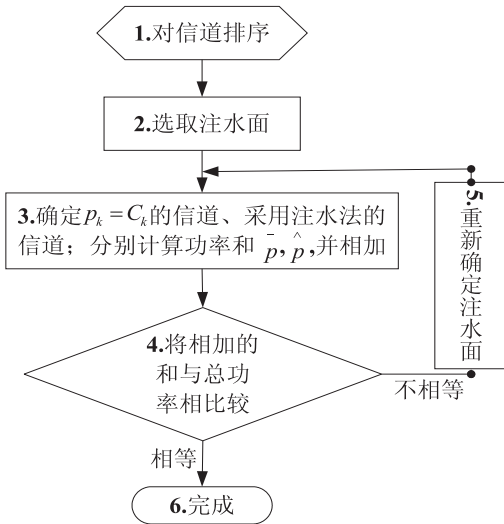


图1 算法流程图

由于最终信道分配功率  $p_k$  受到各自  $C_k$  的限制,考虑按照各个信道噪声值  $I_k$  与  $C_k$  之和  $\mu_k$  ( $\mu_k = C_k + I_k$ ) 对信道由小到大进行排序,并用若干  $\mu_k$  试探最终注水面  $\mu$  的大致范围。

步骤1:按照  $\mu_k = C_k + I_k$  的值对初始信道排序;

$\mu_k$	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
$I_k$	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
$C_k$	$\bar{a}$	$\bar{b}$	$\bar{c}$	$\bar{d}$	$\bar{e}$	$\bar{f}$	$\bar{g}$	$\bar{h}$	$\bar{i}$	$\bar{j}$	$\bar{k}$

$$(A \leq B \leq C \leq \dots I \leq J \leq K)$$

步骤2,3,4:以  $\mu_k = D$  作为初始注水面,  $D$  (包括  $D$ ) 之前信道的分配功率:  $p_k = C_k$ , 功率和:  $\bar{p}$ ; 剩余信道 ( $e \rightarrow k$ ), 选出噪声值  $I_k < D$  的信道, 用  $D$  减去这些信道的  $I_k$ , 得到各自  $p_k$ , 功率和:  $\hat{p}$ 。

令

$$w = P - \bar{p} - \hat{p} \quad (12)$$

- (1)  $w = 0$ , 最终注水面  $\mu = D$ , 功率正好分配完;
- (2)  $w > 0$ ,  $P$  未分配完;
- (3)  $w < 0$ ,  $P$  不够分配。

步骤5:以  $w > 0$  的情况进行说明:此时  $P$  没有分配完,注水面选取较小。接着以下一个信道的  $\mu_k = E$  作为注水面,则  $\bar{p} = \bar{p} + \bar{e}$ , 剩余信道为 ( $f \rightarrow k$ ), 从中选

出噪声值  $I_k < E$  的信道,用  $E$  减去这些信道的  $I_k$ , 得到各自  $p_k$ , 功率和:  $\hat{p}$ , 重新计算  $w = P - \bar{p} - \hat{p}$ 。

重复上述循环,直至  $w = 0$  或  $w < 0$ 。 $w = 0$  则功率分配完成;若当  $\mu_k = F$  时  $w < 0$ , 则  $E < \mu < F$ ; 可确定  $E$  (包括  $E$ ) 之前信道的各自功率:  $p_k = C_k$ , 和为  $\bar{p}$ , 这些信道不采用注水算法分配功率; 剩余信道 ( $f \rightarrow k$ ) 中, 取出所有噪声值  $I_k < F$  的信道, 剔除  $I_k \geq F$  的信道。由于采用注水法的信道满足:  $p_k + I_k = \mu$ , 即  $I_k < \mu$ , 剔除的信道:  $I_k > \mu$ , 这样就保证了最终采用注水法分配功率的信道只能产生于  $I_k < F$  的信道中, 而不在  $I_k \geq F$  的信道中, 保证了不会误剔除需要功率分配的信道, 也不会误保留信道, 造成功率分配不合理。将这些  $U$  个  $I_k < F$  的信道按照  $I_k$  的值由小到大排列。进一步剔除信道、确定最终注水面、分配功率; 信道排列如下:

$$\begin{array}{cccc} \mu_k & G & K & H & J \\ I_k & g & k & h & j \\ C_k & \bar{g} & \bar{k} & \bar{h} & \bar{j} \\ & (g \leq k \leq h \leq j) \end{array}$$

初始以最大噪声值  $j$  作为注水面, 因为  $g \leq k \leq h \leq j$ ,  $j < F \leq \min\{G, K, H, J\}$ , 所以以  $j$  作注水面时能保证  $j$  之前的  $U - 1$  个信道采用注水算法分配功率得到的  $p_k > 0$  ( $p_k = j - I_k$ ), 且  $p_k \leq C_k$ 。剩余功率  $\bar{p}^* : \bar{p}^* = P - \bar{p}$ , 总噪声值  $I : I = \sum_{k=1}^U I_k$ , 计算  $v = U * j - I$ ;

(1)  $v = 0$ , 则  $\mu = j$ ,  $j$  之前的  $U - 1$  个信道采用注水算法,  $p_k = \mu - I_k$ ;

(2)  $v < 0$ , 则  $j < \mu < F$ ,  $U$  个信道都采用注水算法,  $\mu = (\bar{p}^* + I) / U$ ,  $p_k = \mu - I_k$ ;

(3)  $v > 0$ , 则  $j$  大于最终注水面  $\mu$ , 剔除信道  $j$ , 令  $U = U - 1$ ,  $j = h$ ,  $I = I - j$ , 重新计算  $v = U * j - I$ , 直至  $v = 0$  或  $v < 0$ , 可确定最终采用注水算法分配功率的信道及个数。

当初始计算得到的  $w < 0$  时, 则  $D$  超出最终注水面, 下一步以前一个信道  $\mu_k = C$  为注水面并重新计算。后续循环步骤与上述类似。

为简化计算, 初始值可选取中间信道的  $\mu_k$  作为注水面。

### 3.3 算法分析

本算法的优点: 以若干信道的  $\mu_k$  试探最终注水面的大致范围、若干信道的噪声值来确定最终需要分配功率的信道个数。第一可确定不需要采用注水算法的信道; 第二正确剔除不需要分配功率的信道, 不会误剔除信道, 造成功率的不合理分配; 第三, 剩余采用注水算法的信道, 能保证功率最优分配, 传输速率最大化。

## 4 仿真与分析

### 4.1 仿真结果

仿真环境参数设置:系统带宽为 4 MHz,分为 250 个子载波,加性高斯白噪声(AWGN)功率谱密度为 $-80\text{dB} \cdot \text{W}/\text{Hz}$ ,各子载波服从瑞利衰落,每个子载波的 $C_k$ 设置为 $20\text{mW}$ 范围内均匀分布的随机变量。SU 可用的共享信道为 10 个,使用 Matlab 仿真工具,将提出的算法与已有的算法进行仿真结果比较。

从图 2 可以看到,随着总功率 $P$ 的增加,传统注水法和改进注水法的传输速率 $R$ 都会随之增加。当 $P$ 大于各个信道的 $C_k$ 之和(100)后, $R$ 不再增加,而是趋于稳定,因为每个信道的分配功率 $p_k$ 都是各自的 $C_k$ ,所以两种方法的 $R$ 相等;当 $P$ 小于各个信道的 $C_k$ 之和时, $0 \sim 60\text{mW}$ 区间,传统注水法在第一步计算初始注水面时会出现信道误剔除,影响后面的功率分配,导致 $P$ 未完全分配,后续信道功率分配不合理,以致其 $R$ 低于改进注水法;在 $60 \sim 80\text{mW}$ 范围内, $P$ 增加但传统注水法的 $R$ 在两个阶段保持不变,是因为传统注水法误剔除了能够分配功率的信道,使得剩余信道 $C_k$ 之和小于 $P$ ,因此,各个信道的 $p_k = C_k$ ,故这段区间内 $R$ 保持不变; $80 \sim 100\text{mW}$ 之间,由于没有误剔除信道,两种方法选取的信道数目一样,各信道 $p_k$ 也相同,所以 $R$ 也相等。改进注水法的 $R$ 则随着 $P$ 的增加而一直变大,先找出 $p_k = C_k$ 的信道,同时剔除不需要分配功率的信道,再按照注水方法在剩余信道得到精确注水面和分配功率,充分利用信道资源,性能要整体优于已有注水法。

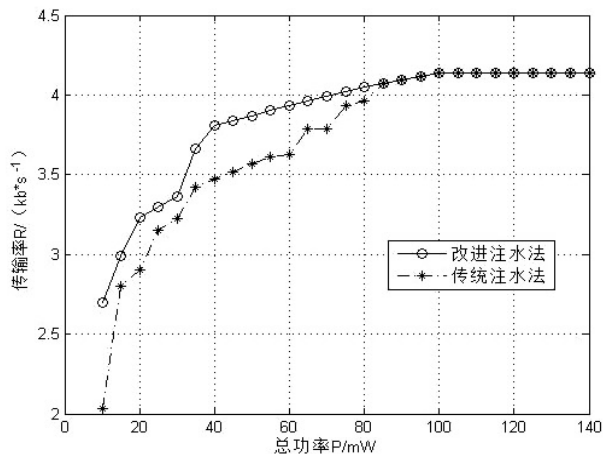


图 2 干扰限固定,总功率线性增加

图 3 是在总功率 $P = 55\text{mW}$ 保持不变,干扰限 $C_k$ 均值线性增加情况下两种方法的传输速率曲线, $C_k$ 均值较小时,随着 $C_k$ 变大,各个信道的 $p_k$ 能随之接近或达到各自 $C_k$ ,所以 $R$ 也会随之增加; $C_k$ 增加到一定程度时,由于 $P$ 的限制,能够参加功率分配信道的 $p_k$ 已经达到各自极限,保持固定值,不继续增加。图中改进

注水法优于已有注水法的原因仍是因为 $P$ 不是非常大的时候,已有注水法误剔除了能够参与功率分配的信道,使得总功率没有分配完全,信道利用率降低。

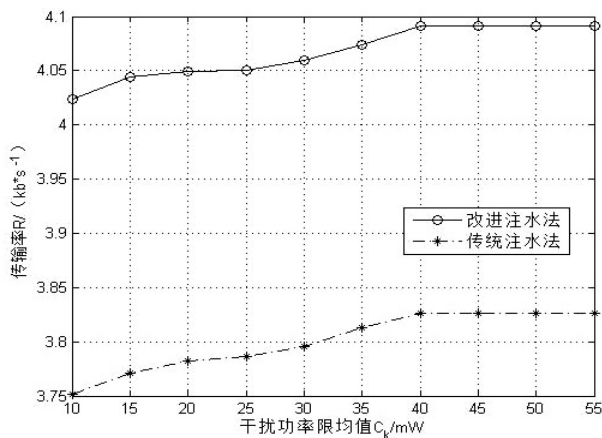


图 3 总功率固定,干扰限线性增加

### 4.2 复杂度分析

已有注水法运算量集中于式(10),改进注水法运算量集中于式(12),两种算法的运算量都与剔除信道数和迭代次数有关,难以用数学式表述,以最理想的情况:总信道数目 $K$ ,两种方法剔除信道数目 $N$ 相同,都是一次迭代正好分配完功率,运算量:已有注水法第一步 $2K + 1$ 次加法,1次乘法,第二步 $2(K - N) + 1$ 次加法,1次乘法,共 $4K - 2N + 2$ 次加法,2次乘法;改进方法第一步, $K + K/2 + K/2 + (K/2 - N - 1)$ 次加法,第二步,2次加法,共 $5K/2 - N + 1$ 次加法,信道排序,复杂度为 $O(K \log_2 K)$ ;随着迭代次数的增加,以图 1 中总功率为 $60\text{mW}$ 为例:已有算法只使用 7 个信道,误剔除 3 个,共需要 64 次加法和 4 次乘法;改进算法使用 10 个信道,共有 10 个数的插入排序 1 次和后续 5 个数的插入排序 1 次,共需 40 次加法,1 次乘法,由于排序的信道数目不是很大,运算量较已有方法没有提升太多,且不会误剔除信道,对功率进行了有效分配,提高传输率,改善了性能。

## 5 结束语

文中研究了 CRN 中,SU 在已知总功率和各个信道干扰限情况下,系统的传输速率和功率分配问题,并提出一种改进的注水功率分配算法,能在确定最终注水面的大致范围时,正确地保留需要采用注水方法分配功率的信道,提高信道利用率,优化功率分配,从而使得传输速率能够最大化,且不对 PU 造成干扰,仿真结果也证明了改进方法的正确性。

### 参考文献:

- [1] Mitola I J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for



可以作为实际应用的参考。

表 4 Foreman(QCIF) 下 8 \* 8 色度块  
的自适应算法测试结果

QP	$\Delta U$ (dB)	$\Delta V$ (dB)	$\Delta Bit$ (%)	参与计算的 模式数目	减少百分比
23	+0.01	-0.01	+0.043	34775	-51.3%
28	-0.05	-0.08	+0.045	34245	-52.0%
33	-0.12	-0.13	+0.071	33622	-52.9%

表 5 Carphone(QCIF) 下 8 \* 8 色度块  
的自适应算法测试结果

QP	$\Delta U$ (dB)	$\Delta V$ (dB)	$\Delta Bit$ (%)	参与计算的 模式数目	减少百分比
23	-0.02	0	+1.000	34521	-51.7%
28	0	0	+0.088	34079	-52.3%
33	-0.07	-0.08	+1.654	34013	-52.2%

表 6 Bus(CIF) 下 8 \* 8 色度块  
的自适应算法测试结果

QP	$\Delta U$ (dB)	$\Delta V$ (dB)	$\Delta Bit$ (%)	参与计算的 模式数目	减少百分比
23	0	-0.06	+0.026	36683	-48.6%
28	-0.02	-0.03	+0.026	36324	-49.1%
33	-0.12	-0.15	+0.032	34736	-51.4%

参考文献:

[1] 马力妮,郑志辉,潘 峰. H. 264/AVC 视频编码技术研究[J]. 计算机技术与发展,2008,18(7):163-166.

[2] 韩 青,李 莉,应 骏. H. 264 帧内 4×4 块预测模式选择快速算法研究[J]. 中国图象图形学报,2007,12(10):1745-1748.

[3] 孔 磊,于凤芹. 基于模式相关性的 H. 264 帧内预测快速

模式选择算法[J]. 江南大学学报(自然科学版),2009,8(1):33-37.

[4] La B, Eom M, Choe Y. Fast Mode Decision for Intra Prediction in H. 264/AVC Encoder[C]//IEEE International Conference on Image Processing. San Antonio: IEEE Conference Publications, 2007:321-324.

[5] Pan Feng, Lin Xiao, Rahardja S, et al. Fast Mode Decision Algorithm for Intraprediction in H. 264/AVC Video Coding[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2005, 15(7):813-820.

[6] 曹 雁,刘宁钟,崔子冠. 基于边缘方向直方图的 H. 264 帧内预测快速算法[J]. 计算机技术与发展,2008,18(5):60-63.

[7] Wang Jia-Ching, Wang Jhing-Fa, Yang Jar-Ferr, et al. A Fast Mode Decision Algorithm and Its VLSI Design for H. 264/AVC Intra-Prediction[J]. IEEE transactions on circuits and systems for video technology, 2007, 17(10):1414-1422.

[8] 罗 亮,刘春生,周芦明. H. 264/AVC 快速帧内预测模式选择算法[J]. 计算机应用,2008,28(4):1006-1008.

[9] 周 欣,段哲民,周 巍. 基于全零模块检测的 H. 264/AVC 快速帧内模式选择算法[J]. 计算机应用研究,2011,28(7):2766-2769.

[10] 刘西娟. H. 264 帧内预测算法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2010.

[11] 毕厚杰. 新一代视频压缩编码标准-H. 264/AVC[M]. 北京:人民邮电出版社,2005.

[12] SCHAFFERR. H. 264 JVT Reference Software Version8.6[CP/OL]. 2011-01-06[2012-03-20]. <http://iphone.hhi.de/suehring/tml/download/>.

(上接第 82 页)

software defined radio[D]. Sweden: KTH Royal Institute of Technology, 2000.

[2] Zhao Q, Sadler B M. A survey of dynamic spectrum access[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2007, 24(3):78-79.

[3] 胡心怡,方 睿,李日欣,等. OFDM 技术发展综述[J]. 通信技术,2010,43(8):132-134.

[4] Knopp R, Humblet P. Information capacity and power control in single cell multiuser communications[C]//IEEE International Conference on Communications. [s. l.]:[s. n.], 1995:331-335.

[5] Lu Qianxi, Peng Tao, Wang Wei, et al. Utility-based resource allocation in uplink of OFDMA-based cognitive radio networks[J]. International Journal of Communication Systems, 2010, 23(2):252-274.

[6] Musavian L, Aissa S. Capacity and power allocation for spectrum-sharing communications in fading channels[J]. IEEE Transactions on Wireless Communication, 2009, 8(1):148-156.

[7] Wu Jian, Yang Longxiang, Liu Xu. Subcarrier and power allo-

cation in OFDM based cognitive radio systems[C]//IEEE Fourth International Conference on Intelligent Technology and Automation. [s. l.]:[s. n.], 2011:728-731.

[8] Liu Yutao, Liu Liqiang, Xu Cong. Spectrum underlay-based water-filling algorithm in cognitive radio networks[C]//IEEE International Conference on Electric Information and Control Engineering. [s. l.]:[s. n.], 2011:2614-2617.

[9] 张国斌,冯穗力,柯 峰. 一种认知无线电系统中最优的功率分配算法[J]. 华南理工大学学报, 2011, 39(5):18-23.

[10] 孙大卫,郑宝玉,许晓荣. 基于认知 OFDM 的子载波功率分配改进算法[J]. 信号处理, 2010, 26(8):1200-1204.

[11] 张秀宁,谈振辉. 适合于感知无线网络的动态信道分配和注水功率联合的算法[J]. 铁道学报, 2011, 33(6):48-53.

[12] 刘鹏飞,卢光跃. 一种基于注水算法的认知 OFDM 系统资源分配方法[J]. 西安邮电学院学报, 2010, 15(1):9-12.

[13] 熊金石,任清华,管 伟,等. 基于注水原理的 TDCS 功率分配算法[J]. 电讯技术, 2010, 50(2):48-51.