

基于 NC-OFDM 的认知无线电自适应 动态资源分配算法

刘 允 彭启琮 邵怀宗 陈兴峰 王 玲
(电子科技大学通信与信息工程学院)

摘要: 如何提高无线电资源的利用率已经成为国内外研究的一个热点, 而认知无线电技术为解决这个问题提供了一个新思路。非连续正交频分复用(NC-OFDM)技术灵活的选频方案为实现认知无线电系统提供了良好的平台。本文针对 NC-OFDM 系统的特点, 提出了一种新的无线电资源分配算法, 在该算法中认知无线电用户根据感知的资源环境, 针对用户的带宽以及 QoS 等要求, 在“比例公平”原则下通过对子载波和功率的分配使得整个信道容量达到最大。本算法引入了“衰减因子”和用户设备终端, 在不干扰授权用户通信的前提下进行多用户子载波和功率的分配。计算机仿真结果表明: 在多径衰落信道下, 与 FDMA 分配方案相比, 本文中算法的信道容量得到了显著的提高, 其误码率相比于等比特分配算法也有了明显的降低。

关键词: 认知无线电(CR); 非连续正交频分复用(NC-OFDM); 子载波分配; 功率分配

中图分类号: TN929.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0530(2011)04-0619-05

Adaptive Dynamic Resource Allocation in Cognitive Radio System based on NC-OFDM

LIU Yun PENG Qi-cong SHAO Huai-zong CHEN Xing-feng WANG Ling

(University of Electronic Science and Technology of China, School of Communication and Information Engineering)

Abstract: How to improve the efficiency of radio resources which attracts a lot of interest becomes a hot spot problem. The cognitive radio (CR) technology is a new method for solving this problem. And the Non-Contiguous Orthogonal Frequency Division Multiplexing (NC-OFDM) technology provides a good platform for CR systems because of its agile choice mechanism of frequency. This paper introduces a novel adaptive dynamic resource allocation scheme for NC-OFDM based CR system. In this scheme, the secondary users choose their subcarriers and powers to achieve their QoS requirements based on the knowledge of channel detections and proportional fairness principle. The maximal channel capability is achieved accordingly. Meanwhile a decline parameter and terminal types are also introduced during the subcarriers and power allocation, so the interference to the primary users is avoided. The simulation results show that the channel capacity of this algorithm has been improved significantly compared with FDMA and bit error rate compared to same bit allocation algorithm has also been significantly reduced in frequency selective fading channels.

Key words: Cognitive Radio(CR); Non-Contiguous Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (NC-OFDM); Subcarrier Allocation; Power Distribution

1 引言

在无线通信领域, 大部分频率已经分配给授权用户使用。随着新业务和新用户的不断增多, 频谱资源变得越来越贫乏, 但是频谱资源的使用效率却十分低下然而根据美国联邦通信委员会(FCC)[1]提供的数据来看, 已经分配的频谱利用率却只有 15% - 85%, 这

是由于现行的频谱授权机制采用固定的频谱分配, 使得频谱利用率低, 造成大量频谱资源浪费。而认知无线电技术(CR)[2]被认为是解决频谱利用率低的最佳解决方案。CR 技术提出一种动态频谱共享的框架, 允许次用户在不影响授权用户工作的前提下智能地利用大量闲置频谱(也称为频谱空洞), 动态地进行频谱分配并且随时随地、高可靠性地通信[2]。认知无线电是

一种智能无线通信系统,它能感知周围环境,运用“理解—构建”的方法来从周围环境中获取信息,并通过实时改变诸如传输功率、载频、调制方式等传输参数来适应运行环境的变化,从而达到提高频谱利用率、缓解频谱资源紧张的目的。认知无线电技术中诸如信道估计、功率控制、频谱资源分配[3-4]等很多问题都需要研究,最终实现资源的最佳配置。

目前普遍认为实现频谱自适应的 CR 数据传输有 2 个研究方向:采用多载波技术或采用基带信号发射波形设计。在多载波传输技术中,正交频分复用(OFDM)是最佳候选技术。但是传统的 OFDM 技术,数据的传输建立在一段连续的频谱上,如果利用基于 OFDM 技术的系统来占用上述频谱空洞,将会对系统所处通信环境中正在工作的授权用户造成干扰。非连续正交频分复用(NC-OFDM)技术改进了传统的 OFDM 技术,它利用频谱感知和信道估计技术发现通信环境中的频谱空洞,将数据的传输只建立在与频谱空洞相对应的非连续的子载波上,这样就可以解决在利用频谱空洞的过程中对授权用户造成干扰的问题。以往的认知无线电频谱分配算法没有结合系统的传输方式以及信道特性,虽然具有通用性,但是动态性和灵活性不足;论文[5-6]虽然考虑了系统的速率,功率等特性对频谱资源进行最优及次优的分配,但算法实现复杂,不利于工程的实现。本文将认知无线电与 NC-OFDM 技术相结合,充分利用 OFDM 资源分配的动态性和信道自适应性,针对用户的带宽以及 QoS 等要求,在“比例公平”原则下通过对子载波和功率的灵活分配而实现有效的功率控制和频谱管理,从而使得整个信道容量达到最大;并且本算法引入了“衰减因子”和用户设备终端,在不干扰授权用户通信的前提下实现了多用户子载波和功率的分配。

2 基于 NC-OFDM 的认知无线电系统模型

认知无线电是一种智能无线通信系统,它可以主动地感知无线环境,感知周围频谱使用情况,因此认知无线电系统必须具有频谱检测和信道估计单元负责检测频谱,寻找可以使用的频谱空洞,以实现频谱管理与功率分配。

文献[7]设计了 NC-OFDM 系统的实现框图,如图 1 所示。在发送端,高速的数据流 $x(n)$ 首先进行调制,然后进行串并变换,把已调制的高速数据流分配到 N 个较低速率的子载波上。进行串并变换时,并不是像传统的 OFDM 系统那样把串行的数据流分配到系统所

有的子载波上,而是受到产生的“子载波开/关信息”控制,只将数据分配给状态信息为“开”的子载波,状态信息为“关”的子载波不传送任何数据。用于控制上述串并变换的“子载波开/关信息”是由频谱估计得到的,利用频谱感知和信道估计技术探测系统所处的通信环境,与频谱空洞相对应的子载波设定为“开”的状态,与授权用户占用频率相对应的子载波设定为“关”的状态。数据经过串并变换后,按照梳状导频插入法插入导频,然后进行 N 点反傅里叶变换。为了降低信号间干扰(ISI)和载波间干扰(ICI)的影响,在发送数据前给每一个 NC-OFDM 符号插入保护间隔(循环前缀)。再进行并串变换,恢复成串行的数据流,便得到了基带信号 $s(n)$ 。 $s(n)$ 经过射频调制,调制到希望的载波频率上发送出去。

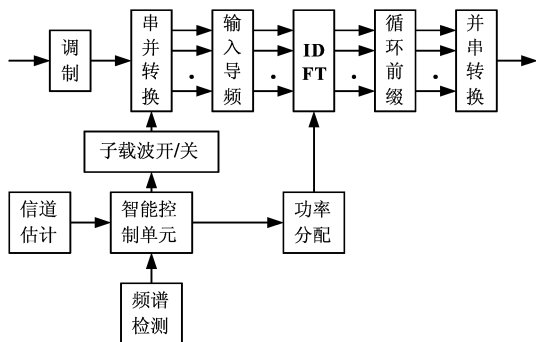


图 1 基于 NC-OFDM 的认知无线电发射模型

3 基于 NC-OFDM 的多用户资源分配算法

认知无线电多用户资源分配是指在认知节点的下行链路上针对多种类型的认知用户的资源分配算法研究。认知节点高效地利用检测到的频谱空洞,实时动态的分配下行链路中的频谱资源,资源分配算法主要考虑功率受限和设备类型 2 个因素。认知节点在收到要求进行通信的认知用户请求信息后,首先对周围的频谱使用情况进行检测,找到可以使用的频谱空洞,同时要获得所有认知用户在可以使用的频谱空洞上所呈现的衰落特性,以及整个系统功率覆盖范围内的授权用户的信息。认知节点根据上述获得的信息要在下行链路中完成功率分配和子载波的指配,认知无线电的功率分配算法要考虑对授权用户的功率干扰。在进行资源分配时,功率受限子载波的分配功率不能超过各自的功率上限,这要求分配算法要给每个子载波分配一个预分配功率,以保证不干扰授权用户的正常通信。在资源分配过程中遵循比例公平原则,防止信道特性比较好的用户占用了大部分频谱空洞,而其他用户尤

其是信道特性比较差的用户不能保证正常通信。认知无线电不能干扰授权用户的正常通信,也就是说授权用户在共享信道中的SIR必须满足QoS要求。本文中只考虑认知用户对于授权用户的干扰,认知用户对授权用户的干扰集中体现在对授权用户信干比(SIR)的干扰。

设 R_{Si} 表示授权用户处的SIR:

$$R_{Si} = P_i G_{ij} / \left(\sum_{k=1, k \neq i}^N p_k G_{kj} I(k, j) + p_m^c G_{mj} \right) \quad (1)$$

其中 P_i 是授权用户 i 的发射功率, G_{ij} 是授权用户 i 到 j 的增益,或者称为衰减因子。 $I(k, j)$ 是一个选择因子,其具体含义为:

$$I(k, j) = \begin{cases} 1, & \text{若 } i \text{ 用户和 } j \text{ 用户在同一信道中} \\ 0, & \text{若 } i \text{ 用户和 } j \text{ 用户在不同的信道中} \end{cases}$$

p_m^c 为认知用户 m 发送的功率。如果给出SIR的最小值,就可以计算出 p_m^c 的上限 \tilde{p}_n 。假设系统中一共有 K 个认用户共享 N 个子信道,认知节点最大发射功率为 P_{total} 。分配算法的目标是通过对子载波和功率的分配使得整个信道容量达到最大,同时要兼顾比例公平原则。比例公平原则的引入可能会使得信道容量有所下降,但是保障了每个用户都能满足一定的通信要求。

目标函数的表达式[8]可以表示为:

$$C = \sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N \frac{P_{k,n}}{N} \log_2 \left[1 + \frac{P_{k,n} g_{k,n}^2}{P_{noise}} \right] \quad (2)$$

其约束条件为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{total}; \quad p_{i,j} \leq \tilde{p}_{i,j}, \quad j \text{ 是功率受限子载波}$$

$$p_{k,n} \geq 0, \quad \forall k, n; \quad \sum_{k=1}^K p_{k,n} = 1, \quad \forall n$$

使目标函数式(2)最大的分配方案就是所要找的分配方案。从公式中可以看出其最优值的求解很复杂,本文中给出了一种首先分配子载波再分配功率的次优值求解算法。

3.1 子载波分配算法

首先根据各个用户所需要的频谱资源给各个用户分配信道。设 N_k 分配给用户 K 信道数目, N'_k 是用户 K 所需要的最小信道数目则:

$$N'_k = \begin{cases} \text{round}(R_k/M), & N'_k \geq 1 \\ 1, & N'_k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 M 是每个信道可以传输的最大比特数目, R_k 是用户 K 的数据传输速率。为了公平起见,各个用户所需

要的带宽应该与所占用的信道数目成正比,所以用户 K 所需要的信道数如式(4)所示:

$$N_k = \max(\text{round}(NR_k / \sum R_k), N'_k) \quad (4)$$

如果用户总数超过了实际总数 N ,则去掉最后加上的那个用户重新计算。

在确定用户需要的子信道数目以后,就需要具体给用户分配具体的子信道。如果仅仅从信息传输的最大化来分配,子信道应该分给在信道上增益最大的用户,但这样分配具有明显的缺点,即当子信道的数目不能满足要求时,有些用户就分不到信道,无法体现公平性原则。因此不能仅仅考虑信道利用率。定义参数 $D_k = N_k / N$ 表示每个用户所需要的子信道数目在总的信道中所占的比例。在给用户进行子信道分配的时候,首先计算 D_k ,给 D_k 最大的用户分配增益最大的那个子信道,然后 N_k 减1并重新计算 D_k ,进行第二轮的子信道分配,直到所有的用户都可以分配到子信道。

3.2 子载波功率分配算法

目标函数的数学表达式为:

$$\Psi = \max \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k} \frac{1}{N} \log_2 \left[1 + \frac{P_{k,n} g_{k,n}^2}{P_{noise}} \right] \right) \quad (5)$$

其约束条件为:

$$\sum_{k=1}^K \sum_{n=1}^N p_{k,n} \leq P_{total}; \quad p_{i,j} \leq \tilde{p}_{i,j}, \quad p_{k,n} \geq 0, \quad \forall k, n, j \text{ 是功率受限子载波, 其中 } \Omega_k \text{ 表示分配给用户 } K \text{ 的子载波集合。}$$

在引入拉格朗日松弛算子[9]构造代价函数前,首先对上述的最优化问题进行化简, $\tilde{p}_{k,n}$ 的取值若忽略用户地理位置的差异而造成的影响,则 $\tilde{p}_{k,n}$ 的取值只与 n 的取值有关,则 $\tilde{p}_{k,n} = \tilde{p}_{j,n}, 1 \leq k, j \leq K$ 可以简化为 $\tilde{p}_{k,n} = \tilde{p}_n$ 。根据频谱检测得到的授权用户占用的子信道位置,从而得到受限子载波的位置;若受限频段上的功率受到明显限制,且假设功率达到该信道上的功率上限,则有 $p_{x(n),n} = \tilde{p}_n, 1 \leq x(n) \leq K$ 表示信道 n 被指派的用户,此时所用功率受限子载波上功率分配都是已知的了。将 Ω_k 中的功率受限子载波删除后,得到 Ω_k^{new} ,则 $P_{total}^{new} = P_{total} - \sum p_{constra}$,公式(5)中的最优化问题则可以转换为:

$$\Psi = \max \left(\sum_{k=1}^K \sum_{n \in \Omega_k^{new}} \frac{1}{N} \log_2 \left[1 + \frac{P_{k,n} g_{k,n}^2}{P_{noise}} \right] \right) \quad (6)$$

这时候的最优化问题转变成普通NC-OFDM多用户系

统的子载波分配问题。

由拉格朗日松弛算法可得:

$$(1/H_{k,n} + p_{k,n})N_k = \sum_{1 \leq j \leq N_k} (1/H_{k,j}) + p_{total} \quad (7)$$

由上式可以得到如下的子载波功率分配公式为:

$$p_{k,n} = \frac{P_{k,total}}{N_k} + \left[\left(\sum_{j=1}^{N_k} \frac{1}{g_{k,j}^2} \right) / N_k - \frac{1}{g_{k,n}^2} \right] p_{noise} \quad (8)$$

从式(8)可以看出衰减小的信道分配的功率多,衰减大的信道分配的功率少,体现了注水原理,设: $\Delta p = \left[\left(\sum_{j=1}^{N_k} \frac{1}{g_{k,j}^2} \right) / N_k - \frac{1}{g_{k,n}^2} \right] p_{noise}$, 则 Δp 可以看成是一个偏移量。信道的衰减的特性越接近, 每个子信道所分配的功率越接近 $p_{k,total} / N_k$, 只要计算出 $p_{k,total}$, 既可以计算出所有的 $p_{k,n}$ 。上述算法兼顾了比例公平原则, 分配到信道性能最好的子载波的用户同时分配到了信道性能最差的子载波。

3.3 子信道比特分配算法

在对子信道进行分配比特时, 传统遵从的原则是功率最小化准则, 即发送相同的比特数目, 那一种分配方案需要最小的功率就采用那一种方案。给各个信道增加一个比特看需要增加多少功率增量, 功率增量最小的子信道就增加一个比特, 然后重复计算, 直到指定的比特数目分配完毕。这种分配算法是最优的但是复杂度也是最大的, 用户在很多的时候是很难实现完成分配, 因此本文的算法在最优分配算法的基础上进行了简化。设 B_{Nk} 是每个子信道所分配的比特数目, K 表示第 K 个用户, N 表示用户 K 所分配的子信道总数。按照公式(8)中计算的各个子信道的增益, 将各个子信道按照增益由大到小排列; 给各个子信道分配一个比特, 计算功率增量, 增量最小的信道增加一个比特; 将比特数目相同的子信道作为一个集合, 重新计算功率增量, 增量最小的信道增加一个比特; 只要子信道分配的比特数目小于它的传输速率就重复计算功率增量, 进行比特分配, 否则该子信道比特分配结束。算法中具体比较增量大小时候, 只用比较集合的第一个子信道, 从而大大降低了算法的复杂度。

4 计算机仿真结果

为了分析算法的性能, 本文分别对论文[5]中的最优算法、论文[6]中的最小干扰算法以及本文提出的算法在多径信道下进行了 1000 次 Monte Carlo 仿真。所仿真的认知无线电环境由 1 个认知节点和 20 个认知用户组成, 各用户到认知节点的仿真信道模型为 5 径

的多径信道, 各用户在信道中呈现出不同的衰落特性。IDFT 点数为 256, 空闲子载波数为 100, 每个子载波均采用 QPSK 调制方式, 各子载波的衰落深度分布在 $-5 \sim -25$ dB 之间, 认知用户的功率上限为 10 dBW。

在多用户资源分配算法中, 用户的数目直接影响着算法的分配结果。图 2 是本文中的算法、最优算法、以及最小干扰算法的归一化信道容量随用户数目变化的性能曲线。从图中可以看出本文提出算法的性能明显低于最优算法; 然而本文中的分配算法可以将信道分配给衰落特性较好(信道增益大)的用户, 并且每个用户的功率和比特集中在非连续的信道特性好的子载波上, 因此其性能相比与最小干扰算法较好; 同时三种算法的信道容量随着用户数目的增加都得到显著提高。

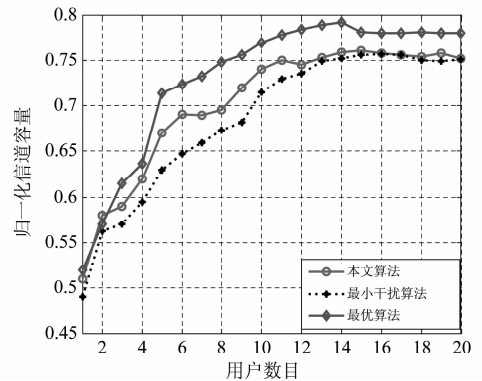


图2 信道总容量随用户数目的变化曲线

图 3 是用户数量对最小用户信道容量的影响曲线。由于整个系统的容量是有限的, 当系统中的空闲子载波数目一定时, 随着用户数目的增加, 信道容量最小的用户所得到信道容量逐渐下降。因此当认知用户数目超出一定程度时, 个别用户可能就不能保证正常通信了。从图 3 可以看出随着用户数目的增加, 所得的信道容量最小用户的信道容量逐渐降低, 且最优算法和最小干扰算法相对本文算法没有明显的性能的提高。

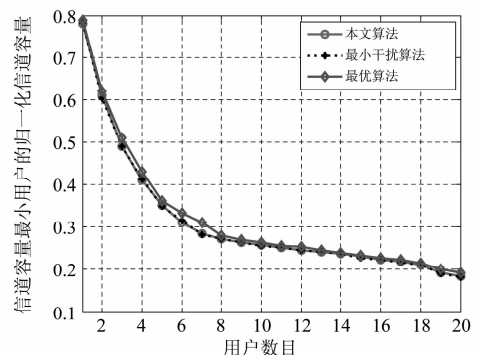


图3 最小用户信道总容量随用户数目的变化曲线

图4为本文中算法与等比特分配算法的误码率随信噪比变化曲线,从图中可以看出随着信噪比的提高,本文算法和等比特分配算法的误码率都有了明显的降低,并且本文中的算法明显优于等比特分配算法。

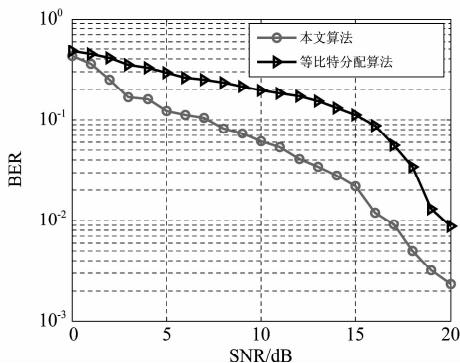


图4 误码率随信噪比的变化曲线

5 结论

传统的频谱分配算法只考虑到单一用户的特性,对于使用多种终端的认知无线电来说并不适用。本文针对 NC-OFDM 系统的特点,提出了一种新的无线电资源分配算法,解决了多类型通信终端的子载波和功率分配问题。在该算法中认知无线电用户根据感知的资源环境,针对用户的带宽以及 QoS 等要求,在“比例公平”原则下通过对子载波和功率的分配使得整个信道容量达到最大,并且保障了每个用户都能满足一定的通信要求。本文中提出的算法有效的解决了多个认知无线电用户的频谱共享问题,并且更有利于工程的实现,为认知无线电与下一代通信技术(4G, Wimax 等)合作使用频谱提供了基础。

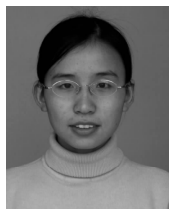
参考文献

- [1] William Krenik, Anuj Batra, “Cognitive Radio Techniques for Wide Area Network[C]”, Design Automation Conference, 2005, pp. 409-412.
- [2] HAYKIN S. Cognitive radio: brain-empowered wireless communications[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2005, 23(2), pp. 201-220.
- [3] CABRIC D, MISHRA S M, BRODERSEN R W, “Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios

[C]”, The 38th Sylmar Conference on Signals Systems and Computers. [S. 1.], 2004.

- [4] MITOLA J. “Cognitive radio: making software radios more personal”, IEEE Personal Communication, 1999, 6(4), pp. 13-18.
- [5] P. Cheng, Z. Zhang, H. -H. Chen, P. Qiu, “Optimal distributed joint frequency, rate, and power allocation in cognitive OFDMA systems”, IET Commun., Jul. 2008, vol2, no. 6, pp. 815-826.
- [6] Yonghong Zhang and Cyril Leung, “Resource allocation in an OFDM-based cognitive radio systems”, IEEE Trans. Commun, Jul. 2009, vol. 57, no. 7, pp. 1928-1931.
- [7] Rajbanshi Rakesh, Wyglinski Alexander M, Minden Gary J, “An Efficient Implementation of NC-OFDM Transceivers for Cognitive Radios[C]”, International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006, pp. 1-5.
- [8] Shen Zukang, Andrews J G, “Adaptive Resource Allocation in Multiuser OFDM Systems With Proportional Rate Constraints[J]”, IEEE Trans on Wireless Communications, Apr, 2005, pp. 2726-2736.
- [9] Choe K D, Lin Y J, Park S K, “subcarriers Adaptive for Multiuser OFDM Systems [C]”, Global Telecommunications Conference, Vol2. Dallas, IEEE 2004, pp. 1230-1233.

作者简介



刘允(1983-),女,博士,电子科技大学通信与信息工程学院,电子科技大学-美国德州仪器 DSP 技术与培训中心,主要研究方向为认知无线电系统中频谱感知与资源分配。

E-mail: liuyun001@uestc.edu.cn



彭启琮(1946-),男,教授/博士生导师,电子科技大学通信与信息工程学院,电子科技大学-美国德州仪器 DSP 技术与培训中心,主要研究领域通信与信息系统中的信号处理,自动测试系统中的信号处理,高速信号处理与实时信号处理等。

E-mail: qpeng@uestc.edu.cn