

基于 USRP2 平台的高效 NC - OFDM 系统设计

李孟达^{1,2}, 柏鹏², 彭卫东², 卢虎¹, 李飞³, 李寰宇²

(1. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学综合电子信息系统与电子对抗技术研究中心, 陕西西安, 710051; 3. 95883 部队, 北京, 102206)

摘要 为了能将认知无线电的理论研究与实物研究较好地结合在一起, 基于 USRP2 平台设计并实现了一个 NC - OFDM 认知无线电传输系统, 给出了系统的软硬件设计详细流程和关键问题的解决方案, 并针对 NC - OFDM 系统的特殊性提出了一种将传统算法和修剪算法相结合的快速有效的 FFT 自适应处理算法。软硬件仿真结果表明, 本系统能够在 USRP2 平台上成功实现无线通信的数据传送与接收, 提出的算法可以有效缩短数据处理时间, 提升数据传输的鲁棒性, 改善系统的整体性能。

关键词 认知无线电; 非连续正交频分复用 (NC - OFDM); USRP2; FFT

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.02.014

中图分类号 TN914.3 **文献标识码** A **文章编号** 1009-3516(2012)02-0065-05

认知无线电 (Cognitive Radio, CR)^[1] 的出现给提高频谱资源利用率带来了革命性的解决方案, 它被国内外许多研究机构公认为是解决频谱利用率低的最佳解决方案^[2]。目前普遍认为应该采用多载波技术进行 CR 的数据传输, 其中正交频分复用 (OFDM) 是最佳候选技术之一^[3]。但是 CR 中可用频谱的特性是分布宽、非连续且动态变化, 所以传统的 OFDM 技术无法适应 CR 的频谱特性。基于频谱池思想的非连续正交频分复用技术 (NC - OFDM)^[4], 能够灵活实现频谱资源的组合利用, 有效地适应动态频谱环境, 同时还可以实现次用户和主用户之间的多系统共存, 因此它很适合作为 CR 的数据传输体制。

目前国内外的课题研究^[3-5] 都集中于认知无线电的理论上, 涉及实验平台的研究较少。本文在设计 NC - OFDM 传输系统的基础上, 提出了一种将传统算法和修剪算法相结合的快速有效的 FFT 自适应处理算法, 并解决了该系统传输数据时的其它关键问题, 最后利用 USRP2 平台实现 NC - OFDM 系统的数据的发送与接收。本文设计的系统具有一定的实用价值, 为认知无线电由理论研究步入实际应用奠定了原型基础, 同时也为其它基于 USRP2 的无线通信系统设计提供了有益借鉴。

1 NC - OFDM 系统的原理及模型

认知无线电是一种智能无线通信系统, 它可以主动感知无线环境, 感知周围频谱使用情况。依据文中传输数据的特点, 我们改进了文献[3]中的框图, 得到 CR 环境中基于 QPSK 调制的 NC - OFDM 系统实现框图, 见图 1。在发送端, 生成的数据流进行 QPSK 调制, 然后根据子载波开/关控制信息将数据进行串并变换, 变成 N 路较低速率的数据流, 分配到当前可用的子载波上。

* 收稿日期: 2011-11-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61174194); 航空科学基金资助项目 (20090196004; 20110196004); 陕西省重点实验室基金资助项目 (200908A; 201102Y02)

作者简介: 李孟达 (1988 -), 男, 河南商丘人, 硕士生, 主要从事通信与信息系统研究。
E-mail: lmd_0921@yahoo.com.cn

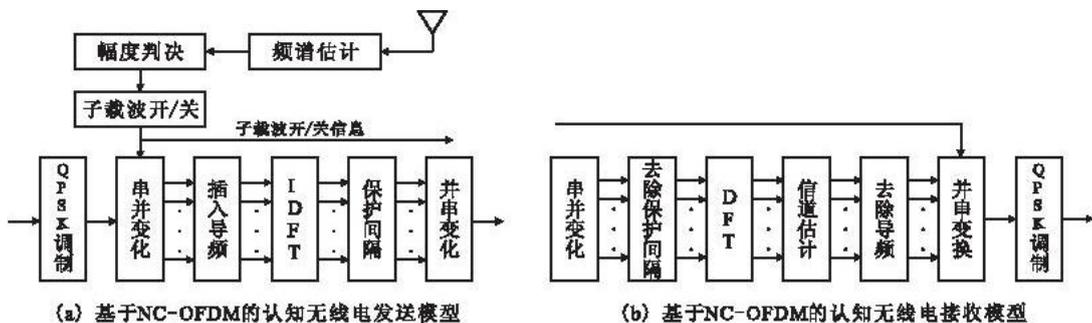


图 1 NC-OFDM 系统的实现框图

Fig. 1 Schematic of an NC-OFDM transceiver

子载波开/关信息是由频谱感知模块得到的,该模块包括频谱估计和幅度判决模块,利用频谱检测技术感知系统周围的无线通信环境,将检测到的功率谱密度(PSD)与预先设定好的门限值进行比较,PSD 小于门限值的为可用频带,反之为不可用频带,显然这时的可用频带是非连续并且是动态变化的。分布在可用频带上的子载波用于传输数据,开关处于“开”的状态;分布在不可用频带上的子载波不用来传输数据,开关处于“关”的状态,因此就得到了子载波开/关信息。数据经过串并变化后,按照梳状导频插入法插入导频,并进行 N 点傅里叶反变换。然后在发送数据前给每个符号插入保护间隔用以消除码间干扰 (ISI) 和载波间干扰 (ICI)。接着将数据恢复成串行的数据流,便得到了基带待发信号,最后经射频调制到相应的频率上发射出去。在接收端进行与发射端相反的操作,就能恢复出发送的原始数据。

2 基于 usrp2 平台实现 NC-OFDM 系统的数据传输

2.1 USRP2 平台

USR2 主要由母板和子板组成。板中有 FPGA 模块用于计算和编程,实现算法;RAM 模块用于数据的存储;设置模块用于 USRP2 内一些芯片功能设置,主要由一些串行 ADC 和 DAC 进行指令控制完成;以太网模块用于将来自电脑通过网线传输的 UDP 数据读入 USRP2 中;电源模块用于给 USRP2 中各个芯片和模块提供稳定电源;底板是连接所有模块以及使 USRP2 母板和子板得以通信的重要部分;子板为射频发射板,主要功能为将母板中接收到的数字中频信号上变频为所想要的射频信号。

MATLAB 的中 SIMULINK 有为用户提供的 USRP2 Transmitter 和 USRP2 Receiver 2 个模块^[6]。这 2 个模块都支持 SIMULINK 与 USRP2 之间的动态数据交互,以允许用户模拟和开发各种各样的认知无线电应用。

2.2 NC-OFDM 系统设计中的关键问题

在 OFDM 系统收发机中,无论是在调制还是解调过程中都要用到快速傅里叶变换(FFT)算法,当子载波的个数比较大时,算法的复杂度迅速增加,硬件的实现难度也比较大。在 NC-OFDM 系统中 IFFT 的输入端或者是 FFT 的输出端会有一些 0,在这种情况下如何减少 FFT 的运算量将是一个关键问题。

Cooley 和 Tukey 在 1965 年提出了快速傅里叶变换算法(即 CT 算法),它需要计算信号流图中的每一个蝶形单元,执行起来运算量比较大。

修剪算法实现^[7]:输入有 L 个非 0 值,进行 $N(N=2^M)$ 点 DFT 运算。产生一个 2^M 行 M 列的矩阵,矩阵的元素有 0 和 1 组成,矩阵中的每一个元素对应于 FFT 信号流图中的每一个节点。在计算每一个节点的值之前,先检查 M 矩阵对应的元素,以确定是否需要计算,当矩阵的元素为 1 时,对应的节点元素需要计算,否则不需要计算。

根据该算法可以得出实数乘法和实数加法的个数分别为:

$$\text{Num}_{\text{mul}} = 2N \lfloor \log_2 L \rfloor + 2L - 4L + \frac{2NL}{2^{\lfloor \log_2 L \rfloor}} \quad (1)$$

$$\text{Num}_{\text{add}} = 3N \lfloor \log_2 L \rfloor + 3L - 6L + \frac{3NL}{2^{\lfloor \log_2 L \rfloor}} \quad (2)$$

式中 $\lfloor \cdot \rfloor$ 表示最接近 2 的幂次方的数。

该算法在运算时需要执行条件语句,因此将会增加时间开销。文献[3]对此算法进行了改进,先生成矩

阵 M_i 和系数矩阵 M_{index} , 然后通过 M_{index} 的元素来计算 FFT, 此时避免了条件语句, 存在的不足就是矩阵 M_{index} 计算较为繁琐。

对上述 2 种方法进行分析并仿真(仿真结果见第 3 节), 得出结论: 当子载波空闲率大于 P_u 时, 修剪算法的计算量将大幅度减少。而当子载波空闲率小于 P_u 时修剪算法与传统的 CT 算法在计算量上相差不大, CT 算法甚至稍优于修剪算法。根据这种情况, 本文提出将传统的 CT 算法和修剪算法相结合的自适应算法, 根据总载波个数合理设定系统门限值为 P_{th} , 通过比较决定具体采用哪种方法, 该自适应算法能够有效降低 FFT 模块中数据处理的计算量, 较大幅度地提升系统的整体性能。其流程图见图 2。

算法开始会根据频谱感知结果得出可用子载波数, 然后计算出 NC - OFDM 系统中子载波的空闲率 P , 如果小于预先给定的门限值 P_{th} , 信号将会送入 CT 算法模块。而当 P 大于给定的 P_{th} 时, 信号将会送入修剪算法模块进行处理。

另外, NC - OFDM 系统中同样需要处理峰值平均功率比 (PAPR) 较高的问题, 通常可以采用基于频域的算法, 主要有选择映射 (SLM)、部分传输序列 (PTS)、随机相位调整^[8-9] 等。

NC - OFDM 系统对同步的要求也是非常高的, 可以采用基于循环前缀的最大似然估计 (Maximum Likelihood Estimation, ML) 算法^[10], 来进行符号定时估计和载波频率偏移估计。

另一方面, 在整个数据传输过程中, 应当保证控制信道传输模块的正常工作, 也就是指发送端和接收端的子载波开/关信息必须保持高度一致, 否则将导致数据的解调顺序错乱, 无法得到正确的接收数据。我们可以在传输信息时在每帧数据的帧头部分加入一些识别信息, 接收端可根据识别信息来确定接收到的子载波开/关信息是否准确。

2.3 基于 USRP2 平台的 NC - OFDM 系统的设计与实现

根据 NC - OFDM 系统的框图模型及其原理, 应用 2.2 节中各种关键技术的解决方案, 在 SIMULINK 中设计并搭建了一个 NC - OFDM 传输系统, 并与 USRP2 平台互联, 以实现数据经过无线信道的发送与接收。本系统的发送数据由伯努利二进制序列随机生成, 在经过 RS 编码、QPSK 调制后, 数据进入 NC - OFDM 调制系统, 根据频谱感知模块得到的子载波开/关控制信息进行串并变换, 将数据分配到可用子载波上, 然后进行 IFFT 变换, 接着添加循环前缀 (CP), 数据进行并串变换后形成待发送数据比特流, 最后待发送数据通过 UDP 网络协议传送至 USRP2 平台, 并经由射频天线发射出去。在接收端, 接收到的数据信息将会被解调, 得到基带信号, 仿真结果见第 3 节。

3 仿真结果及分析

仿真条件: 硬件使用认知无线电平台——USRP2; 软件使用 MATLAB(2010b) 版。

仿真环境: 本设计中, 信源系统采用的是伯努利二进制序列, 所设置的占空比为 0.5, 所产生的序列是以帧的形式产生, 每帧数据是 44 位, 码元宽度为 $16E - 5/44/2$ s; 调制方式使用的 QPSK; 总载波数目 $N = 512$; 进行 64 点 IFFT 变换; 发送平台与接收平台相距 5 m; 射频频率: 2.45 GHz。

仿真实验 1: NC - OFDM 收、发端频谱分析。

在 NC - OFDM 系统进行数据发送时, 发送端频谱图如图 3(a) 所示, 可以很明显地看出发送数据使用的子载波部分和被屏蔽掉的子载波部分。NC - OFDM 系统发送数据时接收端频谱图如图 3(b) 所示。由于数据经过无线信道的传输, 必定会有能量的衰减和噪声的干扰, 而且在本文设计的系统中没有考虑带外干扰抑制, 所以会有少部分接收信号被干扰。但是, 经过对比和判断两张频谱图中载波的位置信息和峰值幅度信息, 还是可以认为接收信号频谱图基本与发送信号的频谱图相吻合, 使用相应的技术手段就能够较理想地从接收到的数据信息得到系统发送的数据信息。所以, 可以认为本文设计的基于 USRP2 平台的 NC - OFDM 系统可以进行无线通信的数据传输。

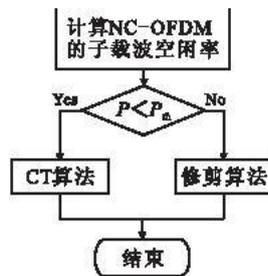
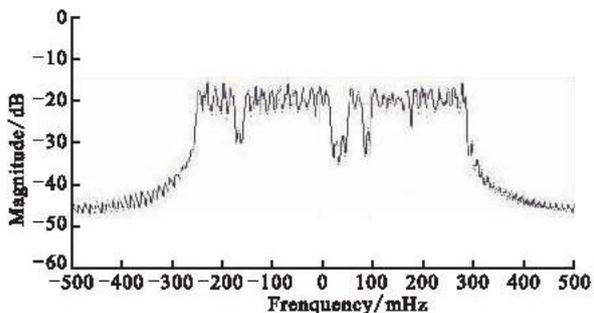
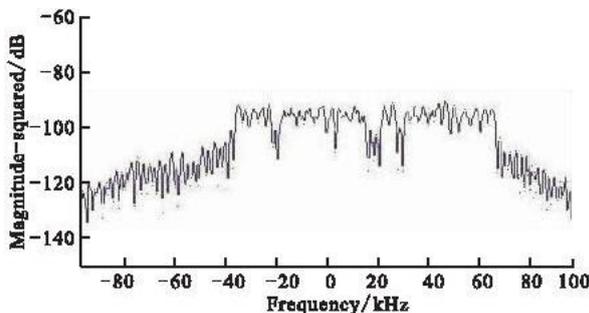


图 2 自适应算法流程图

Fig. 2 Self-adaptation algorithm flow diagram



(a) NC-OFDM发送端频谱图



(b) NC-OFDM接收端频谱图

图3 NC-OFDM系统频谱图

Fig.3 The spectrum graph of NC-OFDM system

仿真实验2:发送端与接收端码元波形分析。

如图4中所示,上半部分为发送端的码元波形,下半部分为接收端的码元波形,经过仔细对比,可以明显看出两路数据除了延迟以外数据内容几乎是一模一样的,因此可以说本文设计的NC-OFDM系统调制解调恢复出来的数据误码率很低,系统性能非常可靠。

仿真实验3:自适应FFT算法性能分析。

设定仿真的门限值 $P_{th} = 55\%$, 由图5、6可以看出,当子载波空闲率低于55%时,传统的CT算法和修剪算法在总的计算量上比较接近,甚至是稍微优于修剪算法,再加上修剪算法需要执行条件语句,还需要部分的时间开销,所以在此条件下应当选用传统的CT算法。而当子载波空闲率高于55%时,修剪算法便体现出较为明显的优势,计算量大幅减少,因此在子载波空闲率较高的情况下,应当采用修剪算法。本文设计的FFT自适应算法在提升通信数据鲁棒性的同时大大缩减了数据处理时间,并且节约了硬件资源,提升了系统的整体性能。

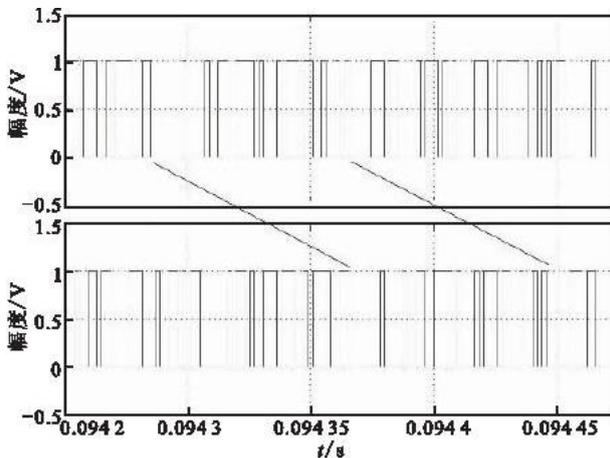


图4 发送与接收码元波形

Fig.4 The code wave of transmitter and receiver

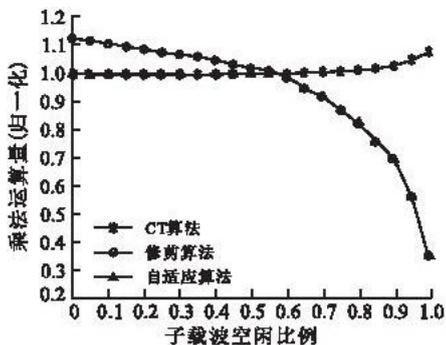


图5 3种FFT算法的乘法计算量比较

Fig.5 Mean execution times for the three FFT algorithms

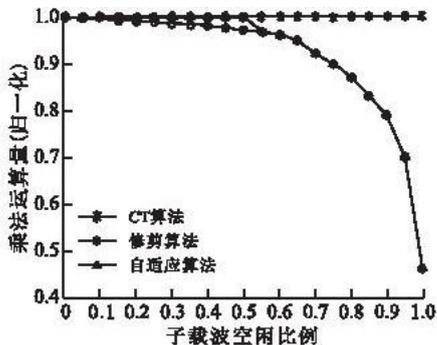


图6 3种FFT算法的乘加计算量比较

Fig.6 Mean number of addition and multiplication operations for the three FFT algorithms

4 结束语

NC-OFDM作为认知无线电技术的最佳候选传输方案之一,本文研究了该技术的基本原理和实现方法,运用提出的FFT自适应算法和其它一些关键技术解决了NC-OFDM系统进行传输数据时遇到的难题,

并且在认知无线电平台(USRP2)上进行了数据的传输检测,检测结果较为理想。该系统为认知无线电由理论研究步向实际应用奠定了原型基础,有一定的实用价值,同时该平台上的成功实验也为其它基于 USRP2 的无线系统设计提供了借鉴。然而认知无线电技术从概念到应用仍然存在许多困难和挑战,有许多关键技术需要突破,未来的工作可以考虑在诸如同步问题和带外干扰抑制等方面进行更为深入的研究。

参考文献(References):

- [1] Mitola J III, Maguire G Q Jr. Cognitive radio: making software radios more personal[J]. IEEE personal communications, 1999, 6(4): 13 - 18.
- [2] Haykin Cognitive radio: brain - empowered wireless communication[J]. IEEE journal on selected areas in communications, 2005, 23(2): 201 - 220.
- [3] 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. Mykonos Island: IEEE press, 2006: 1 - 5.
- [4] 王寅贺, 李彦, 牛德智. 基于冗余备份的协作感知数据传输方法研究[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2010, 11(6): 38 - 41.
WANG Yinhe, LI Yan, NIU Dezhi. Research on data merging together with optimization and reliable transmission of cooperation spectrum sensing[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2010, 11(6): 38 - 41. (in Chinese)
- [5] Wylie - Green M. Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation[C]// 2005 1st IEEE international symposium on new frontiers in dynamic spectrum access networks. [S. l.]: IEEE press, 2005: 619 - 625.
- [6] Ahmad Ali Tabassam, Farhan Azmat Ali. Building software - defined radio in MATLAB simulink; a step towards cognitive radios[C]// 2011 UKSim 13th international conference on modelling and simulation. Cambridge: IEEE press, 2011: 492 - 497.
- [7] Alves R G, Osorio P L, Swamy M N. General FFT pruning algorithm[C]// Proceedings of the 43rd IEEE midwest symposium on circuits and systems. Lansing, MI: IEEE press, 2000: 1192 - 1195.
- [8] 胡艳龙. 基于认知无线电的 NC - OFDM 关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
HU Yanlong. Research of key techniques for NC - OFDM based on cognitive radio[D]. Changsha: National university of defense technology, 2008. (in Chinese)
- [9] Nikoogar H, Lidsheim K S. Random phase updating algorithm for OFDM transmission with low PAPR[J]. IEEE transactions on broadcasting, 2002, 48(2): 123 - 128.
- [10] Van de Beek J J, Sandell M, Borjesson P O. ML estimation of time and frequency offset in OFDM system[J]. IEEE transactions on signal processing, 1997, 45(7): 1800 - 1805.

(编辑: 徐楠楠)

Design and Implementation of the NC - OFDM System Based on Cognitive Radio Platform

LI Meng - da^{1,2}, BAI Peng¹, PENG Wei - dong¹, LU Hu², LI Fei³, LI Huan - yu²

(1. Science Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Research Center for Integrated Electronic & Information System and Electronic Countermeasure Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 3. Unit 95883, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to combine the theory study and material object research together properly, this paper designs and implements a NC - OFDM system of CR based on USRP2, and presents the flow path of both software and hardware in detail, meanwhile, it also presents the solution to the key problems. The paper introduces a fast and effective self - adaption algorithm based on traditional algorithm and Pruning algorithm. The software and hardware simulation results show that this system is available to implement the wireless communication based on the USRP2. And the proposed algorithm not only can reduce the time of dealing with data effectively, but also can improve the robust of data transmitting and enhance the performance of the whole system.

Key words: cognitive radio; non - contiguous orthogonal frequency division multiplexing; universal software radio peripheral 2; FFT