

# 基于 USRP2 的 TDCS 系统的设计与实现

李奎<sup>1</sup>, 柏鹏<sup>1</sup>, 卢虎<sup>2</sup>, 李孟达<sup>1</sup>, 李明阳<sup>1</sup>

(1.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;

2.空军工程大学信息与导航学院,陕西西安,710077)

**摘要** 对于变换域通信系统(TDCS)的研究多集中于理论上的仿真验证,而涉及到硬件平台的较少,为此将一种主流的认知无线电平台——USRP2应用到TDCS系统的硬件实现上。首先分析并解决了TDCS系统的基本原理和关键技术,分析了USRP2的基本工作原理,在此基础上设计了一个基于USRP2的TDCS系统,采用Level-2 Matlab S-Function函数编写TDCS系统所需的动态仿真模块库,然后在MATLAB/Simulink环境下搭建了该系统,最后在2台USRP2之间进行无线数据的收发测试。实验结果表明:文中所设计的基于USRP2的TDCS系统能够实现实际无线信道中信号的准确发射与接收,具有很好的数据传输误码率,实现了TDCS系统的无线通信。

**关键词** 变换域通信系统;认知无线电;USRP2

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.03.019

**中图分类号** TN914.3 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)03-0083-04

## Design and Implementation of Transform Domain Communication System Based on USRP2

LI Kui<sup>1</sup>, BAI Peng<sup>1</sup>, LU Hu<sup>2</sup>, LI Meng-da<sup>1</sup>, LI Ming-yang<sup>1</sup>

(1. Research Center for Integrated Electronic & Information System and Electronic Countermeasure Technology, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

**Abstract:** Researches on Transform Domain Communication System (TDCS) are almost confined to theoretical simulation and corroboration, and rarely involve hardware platform. In this paper, firstly, the fundamental and key techniques of TDCS are analyzed, the working principle of USRP2 is introduced; and then a dynamic platform of TDCS based on USRP2 is designed, the dynamic simulation module library of TDCS is compiled by Level-2 Matlab S-Function. Finally, the communication system is set up in the environment of Matlab/Simulink. Signal transmission and reception in actual wireless channel are tested through two USRP2. The results indicate that the TDCS system designed in this paper based on USRP2 can accurately realized signal transmission and reception in actual wireless channel, and has better data transmission error rate. This paper is of a certain value to the practical application of Cognitive Radio technology.

**Key words:** transform domain communication system; cognitive radio; USRP2

收稿日期:2012-12-11

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(20110196004)

基金项目:李奎(1988-),男,河南信阳人,硕士生,主要从事信号与信息处理研究。

E-mail:lk85160423@163.com

认知无线电技术(Cognitive Radio, CR)为有效解决频谱利用率提供了一种新方法,允许次用户在不干扰授权用户正常通信的前提下,择机地使用空闲频谱,得到了广泛地认可<sup>[1-2]</sup>。

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)<sup>[3]</sup>具有良好的抗干扰性能和低截获率并且能够灵活智能地利用频谱资源,因此非常适合作为 CR 的传输方案。

目前国内外的大部分研究都集中在理论上的仿真验证,涉及到硬件平台的比较少<sup>[4-5]</sup>。基于此,本文在研究了 TDCS 基本原理、关键技术和实现方法的基础上,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了一个基于 USRP2<sup>[6]</sup>的 TDCS 系统,最后利用 2 台 USRP2 实现了数据经过无线信道的发送与接收测试,且具有较好的误码率性能。

## 1 TDCS 的原理及模型

一般的通信系统通过滤除信号频段内的干扰杂波达到抗干扰的目的,而 TDCS 则通过 CR 对周围的频谱环境进行采样、感知,估计出干扰所在的频段,在发射端和接收端主动避开这些干扰的频段和正被使用的授权频段,使调制后的信号频段不包含

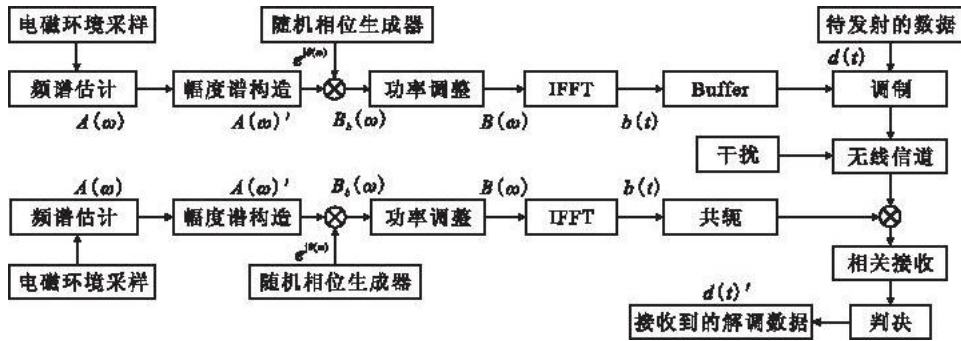


图1 基于傅里叶变换的 TDCS 系统框图

Fig.1 TDCS' block diagram based on FFT

其中,TDCS 系统的关键技术包括:

1) 频谱感知技术,有经典谱估计和现代谱估计法;

2) 基函数波形设计,有基函数的幅度谱  $A(\omega)$  设计和伪随机相位  $e^{j\alpha(\omega)}$  产生;

3) 调制解调技术,有双极性调制和正交调制,本文使用循环移位键控调制(Cyclic Code Shifting Keying, CSK)<sup>[8]</sup>,用基函数的各个时移波形代表不同的码元,解调时使用相关解调技术;

4) 捕获跟踪技术,主要有直接时间相关法和 German 法;由相关文献可知,TDCS 可以实现良好的同步<sup>[9]</sup>。

TDCS 具有以下特点:

干扰。在认知无线电的环境中的 TDCS 系统框图见图 1,主要包括频谱感知、基函数幅度谱构造、随机相位生成、IFFT、调制解调<sup>[7]</sup>。

TDCS 信号发射的基本流程:利用频谱感知模块对给定的频谱环境进行采样,给出环境功率谱,通过阈值处理得到由 0、1 构成的基函数的幅度谱  $A(\omega)$ ;将得到的幅度谱与随机相位映射器产生的等长度的复随机相位向量  $e^{j\alpha(\omega)}$  相乘得到  $B_s(\omega)$ ,使基函数具有类噪声特性;为了使其具有一定的发射功率,对  $B_s(\omega)$  进行功率调整。

$$B(\omega) = CB_s(\omega) = CA(\omega) e^{j\alpha(\omega)} \quad (1)$$

式中  $C$  为幅度调整因子。

对  $B(\omega)$  进行逆傅里叶变换 IFFT,得到时域的基函数  $b(t)$ :

$$b(t) = \text{IFFT}(B(\omega)) \quad (2)$$

将  $b(t)$  存储用以调制信息数据,最后通过 CSK 将数据  $d(t)$  调制发射出去。调制后的信号见式(3):

$$\begin{aligned} d(t) &= b(t) \\ d_e(t) &= b(t - T/2) r \dots \end{aligned} \quad (3)$$

TDCS 的数据接收是发射的逆过程,原理与发射过程类似。

1) TDCS 利用 CR 的频谱感知技术,根据频谱环境,实现频谱的实时动态接入;

2) 在频域、时频域设计系统的基函数,而不是传统的时域;

3) TDCS 系统使用伪随机序列码用于生成基函数的相位,载波调制特性具有噪声特性,使得系统具有良好的 LPI 特性<sup>[10]</sup>。

## 2 基于 USRP2 平台 TDCS 系统设计

### 2.1 USRP2 平台

USRP2(Second Universal Software Radio Pe-

ripheral)是当今认知无线电技术研究领域功能最全面、使用最方便、普及最广泛的实验平台<sup>[11]</sup>。它通常是由母板和子板组成的集成电路板构成,在母板中 FPGA 模块是核心,用以算法的实现、编程和计算;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;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。子板的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,又被称为射频发射板<sup>[6]</sup>。

Matlab/Simulink 有为 USRP2 平台专门提供的 USRP2 Receiver 和 USRP2 Transmitter 两个功能模块,用于 Simulink 和 USRP2 之间的数据动态交互,借助 Simulink 来对 USRP2 进行指令控制和信号数据传输。USRP2 Transmitter 的工作原理:模块先将输入的数据暂存到一个 Buffer 中,当 Buffer 满时再进行处理,最后由 UDP 发送给相连的 USRP2,其中 Buffer 模块的输出缓存大小是 358 Byte。

## 2.2 基于 USRP2 实现 TDCS 系统数据传输

### 2.2.1 Simulink 下的仿真模块编写

由于 Simulink 提供的工具包中没有提供现成的 TDCS 仿真所需的模块,首先需要利用 Level-2 Matlab S-Function (System-Function) 函数编写各个模块,构成系统的功能模块库。S-Function 可以使用 Matlab、C 或 Fortran 语言来编写,使用一种特殊的调用格式让用户可以与 Simulink 方程求解器相互作用,为用户提供了一种在 Simulink 模型中使用相关语言来创建自己的模块。按照特定的规则,用户可以在 S-function 中实现自己的算法,其中采用 Level-2 Matlab S-Function 函数编写的模块可以实现以矩阵形式的多输入多输出<sup>[12]79-121</sup>。

### 2.2.2 模块库的构成

在 MATLAB/Simulink 环境下搭建 TDCS 系统需要使用到的动态仿真模块库,包括信号产生模块,基函数产生模块,调制解调模块,USRP2 模块,结果显示模块。

## 2.3 实验平台的搭建

按照 TDCS 的基本原理和系统框图,在 Simulink 中搭建了一个基于 USRP2 的 TDCS 传输系统,并在两台 USRP2 之间实现数据经过无线信道的发送与接收测试。

仿真条件:实验信源采用伯努利二进制序列,占空比设置为 0.5,序列是基于帧格式输出,每帧数据是 1 024 位,码元宽度为  $1\text{E}-5/1\ 024/2$ ;对数据进

行格雷编码后用 CSK 调制,叠加干扰噪声后形成待发射数据,每帧数据是 262 114 位;基函数每帧 1 024 位;USRP2 Transmitter 的 Buffer 模块的输出缓存大小是 358 帧。

实验环境:室内,收发端相距 3 m;射频频率:2.45 GHz。

## 3 实验结果及分析

仿真实验 1:系统发射和接收端频谱图对比。

在基于 USRP2 的 TDCS 系统在进行数据的发送时,发送端的频谱图为图 3 (a),可以看出,TDCS 系统所发射的数据的具有类似于噪声的特性,反映了该信号能够隐蔽在背景噪声中,所以具有良好的低截获性。

系统接收端的频谱图为图 3 (b)。由于实际的无线信道中存在着能量的衰减和带外干扰,发射端和接收端信号的频谱图会存在一定的差别。但经过对比和判断 2 张图中信号的位置和峰值幅度信息,可认为接收端频谱图与发射端频谱图基本相符,使用相应的技术手段便能恢复出发送的数据信息。所以,可认为本文设计并搭建的基于 USRP2 的 TDCS 系统能够成功实现数据的无线通信。

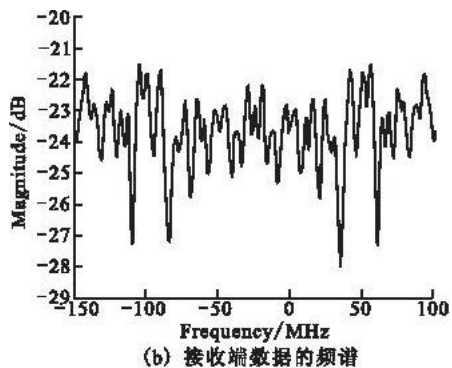
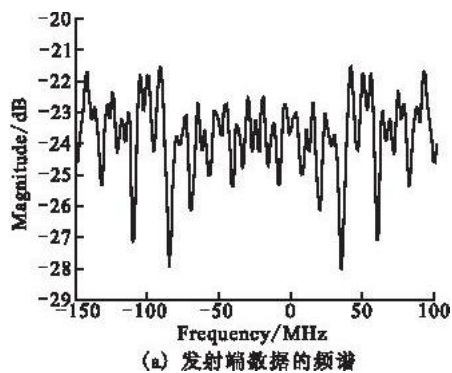


图 3 调制数据的频谱图

Fig. 3 Spectrum of modulated data

仿真实验 2;系统的误码率性能。

由图 4 可知,TDCS 系统在白噪声和窄带干扰的情况下,由于使用了躲避干扰算法并对信源进行了格雷编码,在信噪比小于 1 dB 的情况下,实际系统的误码率较理论值低,说明 TDCS 满足在恶劣复杂的电磁环境下的使用要求。由于实际的无线信道中存在着能量的衰减和带外干扰,造成系统的实际误码率比理论值偏高。

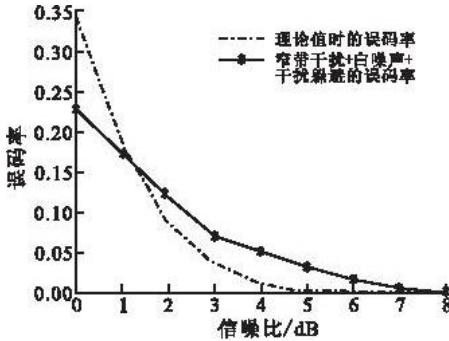


图 4 系统误码率比较图

Fig.4 System bit error rate comparison

从上述软硬件仿真结果可知,基于 USRP2 的 TDCS 系统能首先根据频谱感知模块检测周围的电磁频谱环境,主动躲避干扰和被占用的授权频段,利用可以用来传输数据的频段产生用于数据调制的基函数,不会影响到授权用户的正常通信,同时也保证了 TDCS 系统具有很好的抗干扰特性,实现了信号的准确地发射和接收。由于基函数的具有白噪声特性,使得系统具有良好的低截获性。本实验经验证具有很好的数据传输的误码率,完成了 USRP2 平台上 TDCS 系统的设计与实现,实验结果比较理想,基本达到预期的目标。

## 4 结语

TDCS 作为解决 CR 的数据传输问题的最佳候选技术之一,为有效解决频谱资源短缺提供了新的有效方法。本文通过对 TDCS 基本原理、关键技术和实现方法的研究,在 MATLAB/Simulink 环境下搭建了基于 USRP2 的 TDCS 系统,并且在 USRP2 平台上进行了数据的传输测试,实验结果准确,对认知无线电技术的实际应用具有一定的参考价值,具有一定的实用价值。然而 TDCS 的从理论到应用仍存在很多困难,许多关键技术需要深入研究以期突破。未来的工作可以考虑在多径衰落信道和基函数产生等方面进行深入研究。

### 参考文献(References):

[1] William Krenik, Anuj Batra. Cognitive radio techniques for wide area network[C]//Proc of the 42nd design automation conference. Anaheim, USA: [s. n.],2005:409-412.

- [2] Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio [D]. Stockholm Royal institute technology:2000.
- [3] 何智青.变换域通信系统设计、建模与仿真研究[D].西安:西北工业大学,2003.  
HE Zhiqing. Research of designing, modeling and simulation of transform domain communication [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2003. (in Chinese)
- [4] 徐俊峰.变换域通信与扩频通信抗干扰性能比较 [D].南京:南京理工大学,2007.  
XU Junfeng. Comparison of interferences suppression's performance of transform domain communication and direct sequence spread spectrum communication [D]. Nanjing: Nanjing university of science and technology, 2007. (in Chinese)
- [5] Lee Marion J. Wavelet domain communication system (WDCS): packet-based wavelet spectral estimation and  $m$ -ary signaling [D]. Ohio: Air force institute technology, 2002.
- [6] 李孟达,柏鹏,彭卫东,等.基于 USRP2 平台的高效 NC-OFDM 系统设计[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(2):65-69.  
LI Mengda, BAI Peng, PENG Weidong, et al. Design and implementation of the NC-OFDM system based on cognitive radio platform [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(2):65-69. (in Chinese)
- [7] 韩川.认知无线电场景中的变换域通信系统研究 [D].成都:电子科技大学,2007.  
HAN Chuan. Research of Transform domain communication system in the cognitive radio context [D]. Chengdu: University of electronic science and technology of China, 2007. (in Chinese)
- [8] Dillard G M, Reuter M, Zeidler J, et al. Cyclic code shift keying: a low probability of intercept communication technique [J]. IEEE transactions on aerospace and electronic system, 2003, 39(3):786-798.
- [9] Roberts M L. Initial acquisition performance of a transform domain communication system; modeling and simulation result [C]//ILCOM 2000. Los Angeles: [s. n.], 2000:1119-1123.
- [10] Chakravarthy D, Shaw A K, Temple M A, et al. Cognitive radio-an adaptive waveform with spectral sharing capability [J]. WCNC 2005, 2005, 17:724-729.
- [11] Ettus research LLC homepage [EB/OL]. [2012-11-19]. <http://www.ettus.com>.
- [12] 邵玉斌. Matlab/Simulink 通信系统建模与仿真实例分析 [M].北京:清华大学出版社,2008.  
SHAO Yubin. Matlab/Simulink communication system modeling and simulation case analysis [M]. Beijing: Tsinghua university publishing house, 2008. (in Chinese)