

联合信道状态编码的基函数生成算法

赵 玮, 刘 立, 张衡阳, 郑 博

(空军工程大学信息与导航学院, 西安, 710077)

摘要 针对远距离情况下基函数频谱失配导致的 TDCS 性能下降的问题, 提出一种联合信道状态编码的远距离 TDCS 基函数生成算法。该算法通过对远距离收发两端的信道状态进行四进制合成编码, 将联合信道划分为 4 种状态, 根据频谱失配程度选择信道状态好的频点进行数据传输, 并在解调前对接收信号进行滤波。理论分析表明, 在相同情况下, 使用联合信道状态编码机制的频谱利用率高于频谱交换机制的频谱利用率, 从而有效避免收发两端放弃通信, 更加接近 TDCS 的实际应用。仿真结果表明: 该算法的抗干扰性能优于频谱交换机制, 能够有效提高系统的频谱利用率, 降低频谱失配对抗干扰性能的影响, 扩展 TDCS 的应用范围。

关键词 变换域通信系统; 基函数; 频谱失配; 信道状态编码; 抗干扰

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2017.06.015

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2017)10-0089-06

A Function Generation Algorithm Based on Joint Channel Status Coding

ZHAO Wei, LIU Li, ZHANG Hengyang, ZHENG Bo

(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: In view of the performance decline caused by spectrum mismatch in transform domain communication system, a basic function generation algorithm based on joint channel status coding is proposed in this paper. The algorithm is used to conduct quaternary synthetic coding on the channel status of both transmitter and receiver, divide the joint channel into four states, choose good frequency points for data transmission according to the mismatch rate, and then implement filtering on the received signal before demodulation. Theoretical analysis implies that, in the same situation, the spectrum utilization rate of the joint channel status coding is higher than that of spectrum exchange mechanism, thus avoiding the transmitter and receiver to give up communication further close to the real situation. The simulation results show that the anti-interference performance of the algorithm is superior to that of spectrum exchange mechanism, and can effectively improve the spectrum utilization of the system, and reduce the impact of spectrum mismatch on interference performance, and expand the scope of application of TDCS.

Key words: transform domain communication system; basic function; spectrum mismatch; channel status coding; anti-interference

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是一种新型无线通信系

收稿日期: 2017-04-23

基金项目: 航空科学基金(20150896010;20161996010)

作者简介: 赵 玮(1993—),男,陕西西安人,硕士生,主要从事变换域通信系统研究. E-mail: 1004462852@qq.com

引用格式: 赵玮, 刘立, 张衡阳, 等. 联合信道状态编码的基函数生成算法 [J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 89-94.
ZHAO Wei, LIU Li, ZHANG Hengyang, et al. A Function Generation Algorithm Based on Joint Channel Status Coding [J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 89-94.

统^[1-11],具有良好的抗干扰和射频隐身能力。基函数生成算法是 TDCS 的核心算法,是实现系统性能的关键,主要包含幅度谱成型技术与伪随机相位生成技术。伪随机相位由伪随机序列在线性移位寄存器中映射产生,相同的序列与映射规则保证收发两端相位的一致性。近距离条件下,收发两端电磁环境相同,频谱估计结果一致,远距离通信时,收发两端电磁环境不同,频谱感知结果存在差异,将严重影响系统的抗干扰性能,限制 TDCS 的远距离应用。因此,如何实现远距离条件下基函数幅度谱同步对扩展 TDCS 应用范围具有重要意义。

目前,国内外学者针对 TDCS 的研究主要是在收发两端电磁环境一致的条件^[12-16]展开的,而对 TDCS 远距离应用的研究比较少。当发送端和接收端距离较远时,其电磁环境不一致会严重降低系统抗干扰性能^[17-18],并且当干扰存在于接收端时对系统的影响更大,而文献^[18]没有给出可行的解决方案;文献^[19]基于认知无线电技术引入频谱交换机制从而实现 TDCS 远距离应用,该机制使收发两端能够互换电磁环境频谱信息,选择通信两端未被干扰的频谱交集进行基函数生成,从而有效提高系统的抗干扰性能,但存在频谱利用率低的缺点;利用类似等增益合并的方法设计接收端基函数^[20],能够完成系统的次优接收,但系统复杂度较高,实现较为困难。

为解决远距离基函数频谱失配的问题,在现有研究基础上,提出联合信道状态编码的远距离 TDCS 基函数生成算法,同时在接收端进行解调前滤波,滤除残余干扰。该算法能够有效的提高远距离航空通信抗干扰性能,扩展 TDCS 应用范围。

1 远距离 TDCS 模型

在文献^[2]中提出的通用 TDCS 模型的基础上,对接收端进行改进,远距离 TDCS 模型见图 1、图 2,发射机保持原模型,在接收机进行数据解调之前设置滤波模块,见图 2 中虚线框。

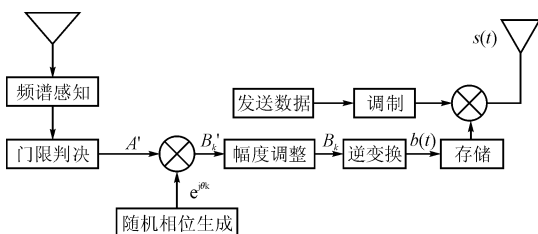


图 1 TDCS 发送机原理图

Fig. 1 Schematic diagram of TDCS transmitter

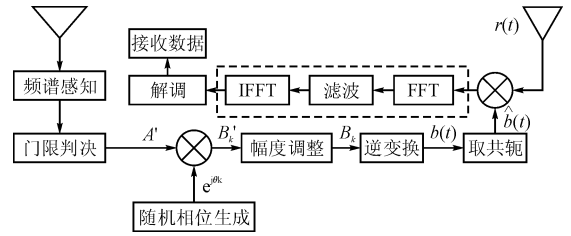


图 2 TDCS 接收机原理图

Fig. 2 Principle diagram of TDCS receiver

如图 2 所示,近距离条件下,收发两端电磁环境一致时,干扰可以被完全剔除,滤波模块不影响系统性能,接收机和近距离模型一致;当距离较远时,收发两端会面临不同的电磁环境,滤波模块可以滤除未完全衰减的干扰,提高频谱利用率,降低频谱失配对系统的影响。

通过频谱感知,将感知的功率谱与事先设定好的门限值进行比较,把高于门限值的频点置为“0”,表示此频点被干扰或被占用而无法使用,低于门限值的频点置为“1”,表示此频点可以使用,形成一个由“0”、“1”组成的幅度谱 A'_k ,从而实现通信过程中的干扰躲避。远距离收发两端电磁环境不一致,干扰样式和位置可能不同,TDCS 接收信号模型如下:

$$r(t) = b(t) + \sum_{i=1}^N J_i(t) + \sum_{j=1}^M J_j + n_0 \quad (1)$$

式中: $b(t)$ 为信号; $J_i(t)$ 为发射端干扰; J_j 为接收端干扰; n_0 为加性高斯白噪声,接收数据为:

$$\begin{aligned} d(t) &= r(t) * \hat{b}(t) = \left(b(t) + \sum_{i=1}^N J_i(t) + \sum_{j=1}^M J_j + n_0 \right) * \hat{b}(t) \\ &= b(t) * \hat{b}(t) + \sum_{i=1}^N J_i(t) * \hat{b}(t) + \sum_{j=1}^M J_j * \hat{b}(t) + n_0 * \hat{b}(t) \\ &= 1 + \sum_{i=1}^N J_i(t) * \hat{b}(t) + 0 + n_0 * \hat{b}(t) \end{aligned} \quad (2)$$

发射端干扰与接收端基函数没有正交性,

$\sum_{i=1}^N J_i(t) * \hat{b}(t) \neq 0$,经过远距离传输,若发射端干扰没有完全衰减,将会严重影响接收端抗干扰性能,滤波模块的功能就是滤除发射端未完全衰减的干扰,保证数据的可靠接收。

2 远距离 TDCS 基函数生成算法

2.1 频谱失配分析

当航空编队中高速移动的节点远距离通信时,会面临不同的电磁环境,其环境中的干扰样式、干扰位置、噪声强度都可能不同,所以收发两端通过频谱

感知、门限判决会形成不同的幅度谱,如图3、图4所示。

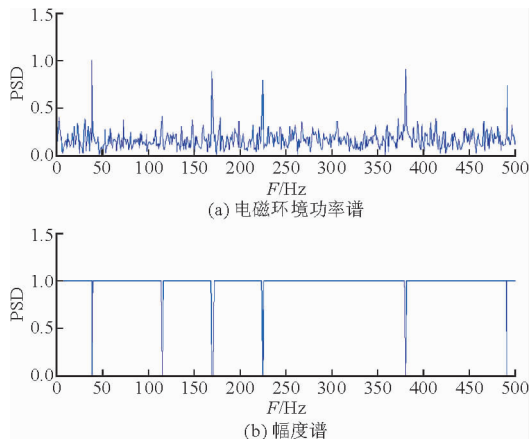


图3 发送端

Fig. 3 Sending end

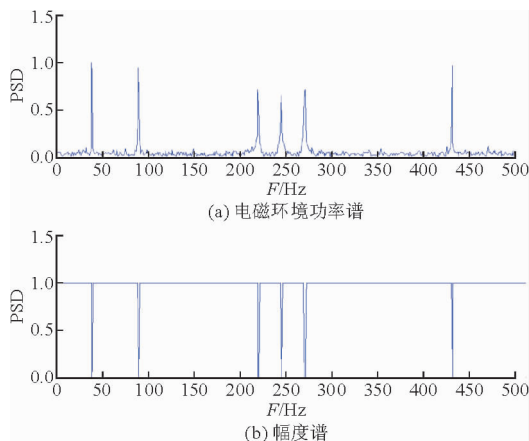


图4 接收端

Fig. 4 Receiving end

由图3、图4知远距离通信收发两端周围电磁环境不一致,频谱感知与判决结果存在差异,从而造成基函数生成时出现频谱失配的问题,频谱失配对TDCS的影响有以下几方面:①发射端干扰未完全衰减,干扰频谱扩频到基函数带宽上,对接收性能产生影响;②接收机避开的频带包含信号能量,解调时造成信号能量的丢失;③导致基函数带宽降低,严重时会使收发双方无法完成通信。

定义频谱失配率为:

$$\eta = \frac{N_d}{N} \quad (3)$$

式中: N_d 为幅度谱不一致频点数; N 为总频点数; η 反应收发两端幅度谱失配程度。发射端频谱估计结果与接收端估计结果不一致,导致接收端基函数存在误差:

$$\hat{b}(t) = \sum_{n=1}^{N-N_d} \exp(j(\omega_n t + \phi_n)) +$$

$$\sum_{k=1}^{N_d} \exp(j(\omega'_k t + \phi_k)) \quad (4)$$

远距离收发两端基函数互相关函数为:

$$R_{bf,bf_r} = \int_0^T \sum_{n=1}^N \exp(j(\omega_n t + \phi_n)) \left(\sum_{n=1}^{N-N_d} \exp(-j(\omega_n t + \phi_n)) + \sum_{k=1}^{N_d} \exp(-j(\omega'_k t + \phi_k)) \right) dt \quad (5)$$

基函数的自相关值为 $R_{bf} = NT$,由此可得:

$$R_{bf,bf_r} = \int_0^T \sum_{n=1}^N \exp(j(\omega_n t + \phi_n)) \left(\sum_{n=1}^{N-N_d} \exp(-j(\omega_n t + \phi_n)) + \sum_{k=1}^{N_d} \exp(-j(\omega'_k t + \phi_k)) \right) dt = (N - N_d)T + \int_0^T \sum_{k=1}^{N_d} \exp(j(\omega_k t + \phi_k)) \int_0^T \sum_{k=1}^{N_d} \exp(-j(\omega'_k t + \phi_k)) dt \geq (N - N_d)T = (1 - \eta)NT \quad (6)$$

根据TDCS原理知自相关值 $R_{bf} = NT$ 为信号能量 E_b ,因此信噪比下降为 $(1 - \eta)E_b/N_0$,系统采用二元循环移位键控(Binary Cyclic Shift Keying, BCSK)调制方式^[21],误码率为:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{(1 - \eta)E_b}{N_0}}\right) \quad (7)$$

由式(7)知, η 越大,收发两端频谱失配越严重,信道质量越差,误码率越高。频谱失配对系统抗干扰性能的影响见图5、图6。

接收端基函数在未知发射端基函数频谱状况的情况下按照近距离接收机制进行接收,信号能量可能处于接收端避开的频带内,造成信号能量的丢失,严重降低误码率性能,见图5。

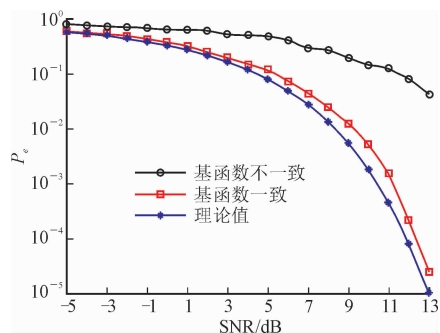


图5 基函数不一致误码率

Fig. 5 BER under the condition of inconsistent base functions

由于频谱失配导致收发两端基函数存在巨大差异,失配率对接收性能的影响见图 6,失配率越大,误码率越高,抗干扰性能越差。

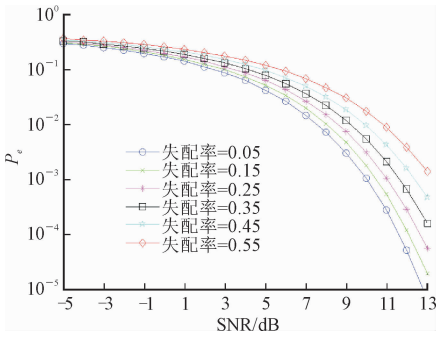


图 6 不同频谱失配率误码率

Fig. 6 BER under different frequency mismatch rates

2.2 联合信道状态编码

2.1 节分析了远距离条件下频谱失配对系统性能的影响,由分析可知,在频谱失配条件下,传统方式两端生成的基函数会严重降低系统的性能,可以考虑使用收发两端未完全被干扰的频谱进行数据传输,提高传输功率和频谱利用率。

当 TDCS 进行近距离通信时,收发两端所处电磁环境一致,信道状态有 2 种情况:1 表示信道可用,0 表示信道不可用,信道状态表示为 $C_{s_i} = (0, 1), i=1, 2$ 。远距离收发两端所处电磁环境不一致,收发两端各信道状态存在 4 种情况:

$$(C_t, C_r) = \begin{cases} c_1 = (0, 0) \\ c_2 = (0, 1) \\ c_3 = (1, 0) \\ c_4 = (1, 1) \end{cases} \quad (8)$$

式中: c_1, c_2, c_3 表示信道有干扰; c_4 表示信道无干扰,收发两端联合信道矩阵 $C = \begin{bmatrix} 00 & 01 \\ 10 & 11 \end{bmatrix}$,根据编码

规则对联合信道状态进行四进制编码 $C_t = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}$,

四进制数值大小表示信道质量相对于接收端的适用程度,各通信信道状态为:

$$C_{tr} = \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \dots \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \right\} \quad (9)$$

信道的状态转移概率矩阵:

$$P = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \\ \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (10)$$

根据频谱失配程度,区分优先级选择合适的信道进行通信:

$$C_{tr} = \begin{cases} 3 & \eta < 0.05 \\ 3, 2 & 0.05 < \eta < 0.20 \\ 3, 2, 1 & 0.20 < \eta < 0.35 \\ 3, 2, 1 & \eta > 0.35 \end{cases} \quad (11)$$

当频谱失配率大于 0.35 且 0 号信道较多时,电磁环境比较恶劣,干扰比较严重可能导致通信双方放弃通信。频谱交换机制只能使用 3 号信道,频谱利用率较低,通过解调前的滤波处理,如图 2 虚线框所示,可以有效地滤除未完全衰减的干扰,基于编码信道 TDCS 可以使用 3 号、2 号、1 号信道,能有效的提高频谱利用率,在实际通信中适用性更强,见图 7 所示。通过联合信道状态编码, TDCS 可以使用更多的频率参与通信的发送与接收,有效提高了频谱利用率。已知 TDCS 的基函数功率调整因子为 $c = \sqrt{N/N_A}^{[22]}$,通过联合信道状态编码会使 N_A 增大,从而减小功率调整因子,有效提高基函数的性能。

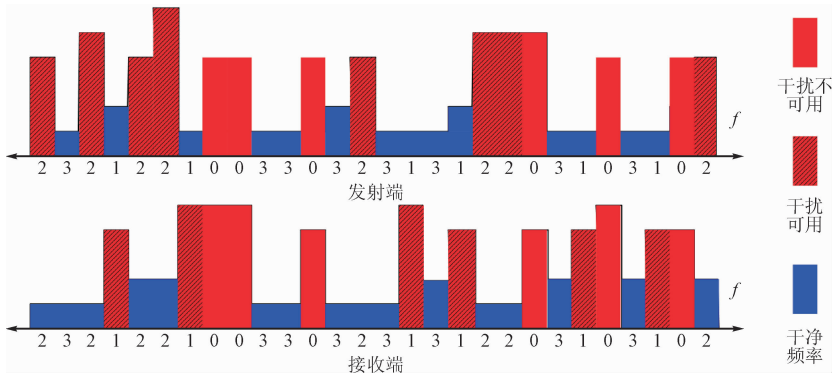


图 7 编码信道示意图

Fig. 7 Schematic diagram of coded channel

3 抗干扰性能分析

远距离 TDCS 的抗干扰性能与基函数带宽密切相关,对于已经剔除的干扰由于与接收端基函数正交,因此 $J * \hat{b}(t) = 0$,远距离接收未完全衰减的干扰会扩频到基函数所占频谱范围,将会严重削弱抗干扰性能。若采用 BCSK 调制,误码率的理论值为式(7),对于没有完全衰减的干扰,基函数的带宽为 B_{bf} ,BCSK 调制误码率修正为:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{(1-\eta)E_b}{(N_0 + J_u/B_{bf})}}\right) \quad (12)$$

系统带宽为 B_{TDCS} , N_J 个频点存在干扰,通过幅度谱成型剔除的干扰数为 N_{J_m} ,未剔除的干扰数 $N_{J_w} = N_J - N_{J_m}$,第 i 个干扰所占频谱为 B_{J_i} ,因此,由式(11)可得:

$$P_e = Q\left(\sqrt{\frac{(1-\eta)E_b}{\left(N_0 + \sum_{i=N_{J_m}+1}^{N_J} J_i / \left(B_{TDCS} - \sum_{i=1}^{N_{J_m}} B_{J_i}\right)\right)}}\right) \quad (13)$$

由式(12)可知影响误码率性能的因素有失配率、信噪比、基函数带宽,由(13)可知基函数带宽越大,误码率越低,基于联合信道状态编码的基函数生成算法较频谱交换机制基函数具有更大的带宽,因此误码率性能更好。仿真条件:①失配率 η 取 0.05、0.10、0.15、0.20、0.25、0.30、0.35;②信噪比 SNR 取 -5~9 dB;③干扰为多音干扰,信道为加性高斯白噪声信道;④基函数长度为 512,序列为 9 阶 m 序列;⑤调制方式为 BCSK 调制,双极性调制。仿真运行 1 000 次取平均值,结果见图 8、图 9。

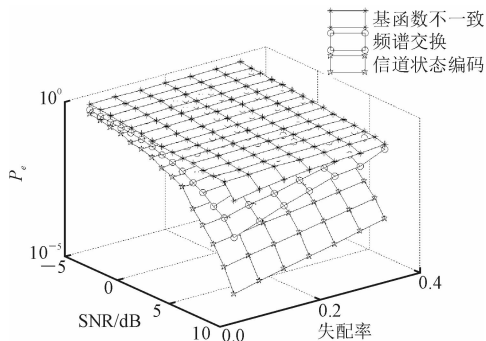


图 8 不同机制误码率特性

Fig. 8 BER characteristics of different mechanisms

远距离电磁环境不一致,收发两端形成的幅度谱存在巨大差异,直接解调将会严重降低抗干扰性能,无法有效进行通信,频谱交换机制能够保证收发双方基函数一致,提高抗干扰性能,但频谱利用率低,存在收发双方放弃通信的可能,信道状态编码的

基函数设计算法能有效的降低系统的误码率,提高频谱利用率。图 8 为不同机制下系统的误码率性能,由图可以看出基于信道状态编码的系统误码率性能优于频谱交换机制与基函数不一致的误码率特性;图 9 为不同调制方式下,基于信道状态编码的系统误码率与理论值仿真曲线,不同调制方式下,本文算法的误码率接近理论值,验证了此算法的有效性。

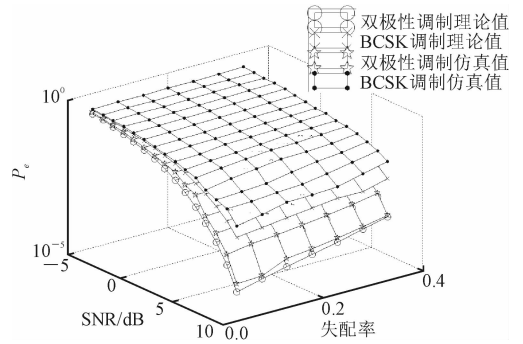


图 9 不同调制方式误码率特性

Fig. 9 BER characteristics of different modulation modes

4 结语

通过分析 TDCS 远距离传输信道状态,验证频谱失配会严重降低系统的性能,提出基于信道状态编码的远距离 TDCS 基函数生成算法。该算法对收发两端联合信道进行四进制编码,使联合信道存在 4 种状态,根据频谱失配程度区分优先级选择信道质量好的信道进行通信,通过解调前滤波模块,可以使用干扰未完全衰减和剔除的频段,有效提高频谱利用率,降低频谱失配对抗干扰性能的影响,扩展 TDCS 的应用范围。

参考文献 (References):

- [1] RADCLIFF R, RODNEY A, GREECE G C. Design and Simulation of Transform Domain Communication System [C]// IEEE the International Conference for Military Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 586-589.
- [2] ROBERTS M. Synchronization of a Transform Domain Communication System [D]. Air Force Institute of Technology, 2000.
- [3] ROBERTS M L, TEMPLE M A, MILLS R F, et al. Interference Suppression Characterizations for Spectrally Modulated, Spectrally Encode Signals [J]. Electronic Letters, 2006, 42(19): 1103-1104.
- [4] CHUAN H, JUN W, YANG Y L, et al. Addressing the Control Channel Design Problem: OFDM Based Transform Domain Communication System in Cogni-

- tive Radio [J]. Elsevier Computer Networks Journal, 2008, 52(4): 795-815.
- [5] LIKE E C, TEMPLE M A, WU Z. SMSE Waveform Design Using Soft Decision Selection and Dynamic Assignment of Subcarrier Modulation Order and Power [J]. Journal of Communications, 2009, 4(10): 766-780.
- [6] MARTIN R K, MARSHALL H. Reduction of Peak-to-Average Power Ratio in Transform Domain Communication Systems [J]. IEEE Transactions on Wireless Communications, 2009, 8(9): 4400-4405.
- [7] RAKESH K H R. Transform Domain Acquisition of Spread Spectrum Signals in a Low Signal to Noise Ratio Environment [D]. Electrical Engineering and Computer Science, 2010.
- [8] SUN H X, BIG A, GUAN Y L, et al. Novel Pseudorandom Phase Generation in Transform Domain Communication Systems [C]// Proc of International Conference on Innovations in Information Technology. Piscataway, NJ, USA, 2011: 18-22.
- [9] LIKE E C, TEMPLE M A, WU Z. Spectrally-Temporally Adapted SMSE Waveform Design Using Imperfect Channel Estimates [C] // IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). 2010: 1-6.
- [10] WANG S, DA X Y, CHU Z Y, et al. Magnitude Weighting Selection: A Method for Peak-to-Average Power Ratio Reduction in Transform Domain Communication System [J]. IET Communications, 2015, 9(15): 1894-1901.
- [11] 谢铁城, 达新宇, 褚振勇, 等. 基于神经网络的变换域通信系统接收技术 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014(2): 96-100.
XIE T C, DA X Y, CHU Z Y, et al. Neural Network Based Receiving Technology in Transform Domain Communication System [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2014(2): 96-100. (in Chinese)
- [12] HU S, BI G, GUAN Y L, et al. Spectrum Efficiency Transform Domain Communication Systems with Quadrature Cyclic Code Shift Keying [J]. IET Communications, 2013, 7(4): 382-390.
- [13] ROBERTS M L, TEMPLE M A, RAINNES R A, et al. Communication Waveform Design Using an Adaptive Spectrally Modulated, Spectrally Encoded (SMSE) Framework [J]. IEEE Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 203-213.
- [14] FUMAT G, CHARGE P, ZOUBIR A, et al. Transform Domain Communication Systems from a Multidimensional Perspective Impacts on Bit Error Rate and Spectrum Efficiency [J]. IET Communications, 2011, 5(4): 476-483.
- [15] MRINAL S, RAJAN G. Comparative Analysis of various Communication Systems for Intelligent Sensing of Spectrum [C]// Proc of IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics, 2014: 902-908.
- [16] HUANG X L, HU F, WU J, et al. Intelligent Cooperative Spectrum Sensing via Hierarchical Dirichlet Process in Cognitive Radio Networks [J]. IEEE Journal on Areas Communications, 2015, 33(5): 771-786.
- [17] IAN B, YEE H L, YI G. A Spectrum Trading Scheme for Licensed User Incentives [J]. IEEE Transactions on Communication, 2015, 63(11): 4026-4035.
- [18] LIU J Y, SU Y T. Performance Analysis of Transform Domain Communication Systems in the Presence of Spectral Mismatches [C]// IEEE Proc IEEE MILCOM 2007, Orlando F L, USA, 2007: 1-5.
- [19] HAN C. A Spectrum Exchange Mechanism IN Cognitive Radio Contexts [C]// The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, (PIMRC06). 2006, 9: 1-5.
- [20] 谢铁成, 达新宇, 褚振勇, 等. 收发频谱不一致条件下的变换域通信系统基函数设计 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2014, 44(6): 1825-1830.
XIE T C, DA X Y, CHU Z Y, et al. Basis Function Design for Transform Domain Communication System in the Presence of Spectral Mismatches [J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1825-1830. (in Chinese)
- [21] WANG C D, ZHANG Z P, LI S Q, et al. Transform Domain Communication Systems Based on Random Ambiguity and Fractional Fourier Transform [C]// International Conference on ITS Telecommunications, Chengdu, China, 2006: 194-197.
- [22] 刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 改进的 TDCS 基函数生成算法及性能分析 [J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2016, 28(3): 312-318.
LIU L, ZHANG H Y, MAO Y Q, et al. Modified Generation Algorithm of Basis Function in TDCS and Its Performance Analysis [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2016, 28(3): 312-318. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)