

DOI: 10.7652/xjtuxb201702015

变换域通信系统抗干扰编码幅度谱成型算法

刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 孙乐, 郑博
(空军工程大学信息与导航学院, 710077, 西安)

摘要: 针对变换域通信系统收发双方电磁环境不一致、频谱失配导致有用信号能量损失和降低系统抗干扰性能的问题, 提出接收端多元编码幅度谱成型算法。首先, 在发送信号频谱组成未知的条件下, 采用变换域技术对接收端干扰和噪声进行处理, 由于干扰会在变换域能量聚焦, 而噪声没有能量聚焦特性, 因此变换域处理能够有效的将干扰和噪声进行分离; 然后, 对分离后的干扰和噪声幅度谱进行归一化处理; 最后, 对归一化处理的幅度谱进行多元编码, 无干扰的频点幅度谱设置为1, 有干扰的频点幅度谱设置为归一化幅度谱最大值与该点的差值。采用该算法生成的基函数能够有效降低有用信号能量的损失并躲避干扰。仿真结果表明, 相比接收端直接生成基函数和基于类似等增益合并的算法, 在信噪比为 $-8\sim 8$ dB的条件下, 多元编码幅度谱成型算法能够有效形成接收端幅度谱, 基函数误差分别降低了16.2%和13.1%, 提高了系统的抗干扰性能。

关键词: 变换域通信系统; 频谱失配; 多元编码; 抗干扰

中图分类号: TN92 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)02-0091-06

A Shaping Algorithm of Coded Amplitude Spectrum for Anti-Interference in Transform Domain Communication System

LIU Li, ZHANG Hengyang, MAO Yuquan, SUN Le, ZHENG Bo
(Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: A novel shaping algorithm of amplitude spectrums based on multiple code is proposed for the receiver to solve the problem that electromagnetic environments of a transmitter and a receiver are inconsistent and the mismatch of spectrums results in the loss of useful signal energy and the weakening of the anti-interference performance of a system. The transform domain technology is adopted to deal with the interference and noise at the receiver under the condition where the transmit signal spectrum in the receiver is unknown. Based on the fact that the energy of interference will be focused in transform domain while the noise will not, transform domain processing can effectively separate the interference and noise. Then the amplitude spectrums of the separated interference and noise are normalized, and the normalized amplitude spectrums are multiply coded. Specifically, the amplitude spectrum without interference is set to "1" and the amplitude spectrum with interference is set to the difference between the maximum value of normalized amplitude spectrum and the value of this point. The basic function generated by the proposed method can reduce the loss of useful signal energy and avoid interferences. Simulation results in the range of signal-to-noise ratio from -8 to 8 dB and comparisons with the approach in

收稿日期: 2016-06-29。 作者简介: 刘立(1990—),男,硕士生;张衡阳(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61202490);航空科学基金资助项目(20150896010)。

网络出版时间: 2016-12-30

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20161230.1906.018.html>

which the basic function is generated directly by the receiver and the method based on similar to equal-gain combining show that the proposed algorithm forms the receiving amplitude spectrum effectively and basis function errors are reduced by 16.2% and 13.1%, respectively. The anti-interference performance of systems is improved.

Keywords: transform domain communication system; spectral mismatch; multiple coding; anti-interference

变换域通信系统(transform domain communication system, TDCS)是一种兼顾抗干扰与射频隐身新型无线通信系统^[1-2],基函数是实现系统性能的关键,收发双方基函数一致会提高系统的性能,不一致会严重影响系统的性能。近距离条件下,通信双方所处电磁环境一致,幅度谱完全匹配,采用相同的映射机制产生伪随机相位,收发双方形成相同的基函数进行调制解调,实现系统的抗干扰性能;通信距离较远时,通信双方可能面临不同的电磁环境,幅度谱可能出现失配,接收端基函数相对发送端基函数可能会产生错误,降低系统的抗干扰性能。由于远距离基函数频谱失配问题限制了TDCS的应用,因此研究频谱失配情况下基函数的一致性具有重要意义。

研究TDCS远距离幅度谱一致性会极大扩展其在航空数据链中的应用,国内外对TDCS的研究主要集中在收发两端电磁环境一致条件下^[3-6],关于远距离TDCS的相关研究较少。目前,对TDCS收发两端电磁环境不一致条件下的研究主要有两种思想:一是采用频谱交换机制,通过在收发两端建立互传频谱信息的链路机制,使得通信双方获知对方的幅度谱信息,从而实现收发双方幅度谱同步;二是采用盲处理技术,不对发送端频谱信息进行分析,只分析接收端频谱信息,通过对接收端的幅度谱进行相关处理生成接收端基函数,取共轭后与接收信号进行相关解调,输出判决数据。文献[7]发现当收发两端距离较远时,电磁环境不一致会严重降低系统抗干扰性能,并且接收端干扰对系统的影响大于发射端对系统的影响,但文献没有给出解决方案;文献[8]在认知无线电背景下采用频谱交换机制实现远距离TDCS通信,该机制通过互换收发端电磁环境频谱信息,选择通信两端干净频谱交集进行基函数生成,能够有效提高抗干扰性能,但频谱利用率不高并且链路建立会提高系统的复杂度;文献[9]提出类似等增益合并的算法设计接收端基函数,该算法能够增强系统的抗干扰能力,但接收端干扰仍然存在,会严重影响系统的性能,在干扰强度较大时影响更

明显。为解决远距离基函数频谱失配的问题,本文在现有研究基础上提出接收端多元编码幅度谱成型算法。针对影响系统抗干扰性能的因素,分析幅度谱组成对误码率的影响,使接收端信号干扰噪声比最大,实现远距离条件下的有效接收,扩展TDCS的远距离应用。

1 频谱失配分析

1.1 TDCS系统模型

TDCS的经典系统模型在文献[1]中已经进行了详细的分析。首先,TDCS在变换域对电磁环境进行频谱感知,并与相应的门限值进行比较,高于门限值的频点设置为0,表示此频点被干扰或被占用,低于门限值的频点设置为1,表示此频点可用,两者形成一个由0、1组成的幅度谱 A_{tk} ,由此实现信号传输与干扰躲避。其次,伪随机相位生成模块在线性移位寄存器中产生与幅度谱 A_{tk} 长度相同的伪随机相位 $\exp(j\theta_k)$,二者相乘后进行幅度谱调整。最后,经反变换产生时域基函数进行调制,接收端通过相同过程产生基函数,经共轭运算后与接收信号进行相关解调,判决输出接收数据。

根据文献[1]的发射机原理,采用二元循环移位键控(binary cyclic shift keying, BCSK)调制,信息经过调制后的时域表达式为

$$s(n) = \frac{1}{N^{1/2}} \left[\sum_{k=1}^{N-1} c_t A_{tk} \exp(j\theta_k) \exp(j2\pi kn/N) \cdot \exp(-j\pi d_i k) \right] \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为发送信号; N 为基函数归一化幅度谱值的总数量; $c_t = (N/N_A)^{1/2}$ 为发射端功率调整因子; N_A 为归一化幅度谱值为1的数量; A_{tk} 为发射端基函数幅度谱; $\exp(j\theta_k)$ 为伪随机相位且 θ_k 服从 $[0, 2\pi]$ 上的均匀分布; d_i 为发送数据,由于采用BCSK调制, $d_i \in (0, 1)$ 。

1.2 频谱失配问题

通信双方进行远距离通信时,可能会面临不同的电磁环境,干扰样式、干扰位置、噪声强度可能不同,收发两端通过频谱感知、门限判决会形成不同的

幅度谱,通过相位匹配后形成频域基函数。收发两端电磁环境不一致会导致基函数产生频谱失配问题。失配对 TDCS 的影响主要有以下 3 个方面:

(1)发射端携带信号能量的频点在接收端是干扰频点位置所在,无法进行有效解调,造成发射信号的损失,降低系统的抗干扰能力;

(2)接收端基函数在提高与发射端基函数相似度的同时,无法保证与接收端干扰良好的正交性,使干扰对解调产生严重影响;

(3)频谱交换机制会极大降低基函数带宽,严重时会导致收发双方放弃通信。

1.3 接收信号分析

已调信号经过信道到达接收端,接收信号模型如下

$$\mathbf{r}(n) = \begin{cases} \mathbf{s}(n) + \mathbf{n}_0, & H_0 \\ \mathbf{s}(n) + \mathbf{n}_0 + \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i, & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{r}(n)$ 为接收端信号; H_0 代表收发两端频谱相同,干扰被完全躲避; H_1 代表收发两端频谱失配,接收端存在干扰; $\mathbf{n}_0$ 为环境噪声; $\sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i$ 为接收端本地干扰。若远距离条件下收发两端频谱相同,基函数生成与调制解调过程与近距离条件下完全相同,对于收发两端频谱失配情况,接收信号为

$$\mathbf{r}(n) = \mathbf{s}(n) + \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i + \mathbf{n}_0 \quad (3)$$

接收数据为

$$\begin{aligned} \mathbf{d}(n) = \mathbf{r}(n)\hat{\mathbf{b}}(n) &= (\mathbf{s}(n) + \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i + \mathbf{n}_0)\hat{\mathbf{b}}(n) = \\ &\mathbf{s}(n)\hat{\mathbf{b}}(n) + \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i\hat{\mathbf{b}}(n) + \mathbf{n}_0\hat{\mathbf{b}}(n) = \\ &\frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} c_{\text{r}} c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{tk}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\pi d_{\text{rk}}) + \\ &\frac{1}{N^{1/2}} \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\theta_k) \exp(-j2\pi kn/N) + \\ &\frac{1}{N^{1/2}} \sum_{k=1}^{N-1} c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\theta_k) \exp(-j2\pi kn/N) \mathbf{n}_0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{d}(n)$ 为接收数据; $\hat{\mathbf{b}}(n)$ 为接收端基函数; c_{r} 为接收端功率调整因子; $\mathbf{A}_{\text{tk}}$ 和 $\mathbf{A}_{\text{rk}}$ 分别为发送端和接收端幅度谱; $\mathbf{J}_i$ 为接收端干扰。

将接收数据进行分解,可得

$$d_{\text{s}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} c_{\text{r}} c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{tk}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\pi d_{\text{rk}}) \quad (5)$$

$$d_{\text{j}} = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{k=1}^{N-1} \sum_{i=1}^M \mathbf{J}_i c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\theta_k) \exp(-j2\pi kn/N) \quad (6)$$

$$d_{\text{z}} = \frac{1}{N^{1/2}} \sum_{k=1}^{N-1} c_{\text{r}} \mathbf{A}_{\text{rk}} \exp(-j\theta_k) \exp(-j2\pi kn/N) \mathbf{n}_0 \quad (7)$$

式中: d_{s} 为有用信号分量; d_{j} 为干扰信号分量; d_{z} 为噪声信号分量。系统采用 BCSK 调制方式,误码率为 $P_{\text{e}} = Q(R_{\text{SINR}}^{1/2})$,其中 R_{SINR} 为信号干扰噪声比

$$R_{\text{SINR}} = \frac{|d_{\text{s}}|^2}{|d_{\text{j}}|^2 + |d_{\text{z}}|^2} \quad (8)$$

由于 $Q(x)$ 是关于自变量的递减函数,要使系统的抗干扰性能最优, R_{SINR} 要满足以下条件:

(1)有用信号损失应该越小越好,即 d_{s} 最大;

(2)干扰分量 d_{j} 应最小化。

近距离条件下,收发两端频谱一致,干扰完全剔除,

$d_{\text{s}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-1} c_{\text{r}}^2 \mathbf{A}_{\text{tk}}^2 \exp(-j\pi d_{\text{rk}})$ 最大, $d_{\text{j}}=0$,信号干扰噪声比变为

$$R_{\text{SINR}} = \frac{|d_{\text{s}}|^2}{|d_{\text{j}}|^2 + |d_{\text{z}}|^2} = \frac{|d_{\text{s}}|^2}{|d_{\text{z}}|^2} = R_{\text{SNR}} \quad (9)$$

式中: R_{SNR} 为信噪比。此时系统能够达到最优解调。远距离条件下,收发两端频谱信息未知,系统性能的提高就是 d_{s} 和 d_{j} 的最优化过程。

2 多元编码幅度谱成型算法

通过 2.2 节的分析,收发两端在频谱失配条件下的通信状态、信号能量携带及解调情况如表 1、表 2 所示。

表 1 收发两端通信状态表

状态	发送端	接收端
A	无干扰	无干扰
B	无干扰	有干扰
C	有干扰	无干扰
D	有干扰	有干扰

表 2 收发两端能量携带和解调情况

状态	发送端	接收端
A	无干扰,携带能量	无干扰,能够进行有效解调
B	无干扰,携带能量	有干扰,有用能量损失
C	有干扰,不携带能量	接收端无影响
D	有干扰,不携带能量	接收端无影响

通过分析,状态 B 对系统的性能影响最大,在状态 B 下提高信号干扰噪声比是增强系统性能的关键。

对于频谱失配情况,发送端幅度谱向量为

$$\mathbf{A}_{tk} = [1 \ 1 \ 0 \ \cdots \ 1 \ 1] \quad (10)$$

式中:1表示携带信号能量;0表示不携带信号能量。接收端干扰经过量化后的向量为

$$\mathbf{a}_j = [1 \ 0 \ 0 \ 0 \ \cdots \ 1] \quad (11)$$

式中:1表示干扰存在;0表示干扰不存在。接收端幅度谱向量为

$$\mathbf{A}_{rk} = [l_1 \ l_2 \ l_3 \ \cdots \ l_{N-1} \ l_N] \quad (12)$$

近距离条件下, $\mathbf{A}_{rk}$ 满足

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{A}_{rk} &= \mathbf{A}_{tk} \\ \mathbf{a}_j \mathbf{A}_{rk} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式(13)为最优幅度谱条件,能够使式(8)取得最大值,在频谱失配条件下只能寻求接近式(13)的次优幅度谱。

多元编码幅度谱通过对接接收信号进行变换域频谱分析,获得接收功率谱 P_i ,根据自适应 N -sigma门限设置算法设置合适门限 $\psi = \mu + 3\sigma^{[12]}$,按照以下规则对功率谱进行多元编码

$$A'_k = \begin{cases} 1, & P_i < \psi \\ \max(P_i) - P_i, & P_i \geq \psi \end{cases} \quad (14)$$

式中:1表示接收端此频点无干扰,可以有效进行解调; $\max(P_i) - P_i$ 表示此频点有干扰,但是该点幅度谱不为0,能够进行解调,减小有用信号能量的损失。通过对功率谱进行多元编码,幅度谱不再是简单的0、1,接收端幅度谱向量为

$$\mathbf{A}_{rk} = [1 \ 1 \ \tau_i \ \tau_{i+1} \ \cdots \ 1] \quad (15)$$

式中: $\tau_i = \max(P_i) - P_i$ 。

分析 $\mathbf{A}_{tk}$ 、 $\mathbf{a}_j$ 、 $\mathbf{A}_{rk}$ 可知,直接解调和类似等增益合并的算法都无法接近式(9),在频谱失配条件下,多元编码幅度谱应充分考虑与发射端幅度谱的相似性以及干扰的正交性,收发两端幅度谱的对应关系有以下两种

$$1 \rightarrow \begin{cases} 1 \\ \max(P_i) - P_i \end{cases} \quad (16)$$

$$0 \rightarrow P_i \in [0, 1] \quad (17)$$

式中:式左为1表示发射端携带能量;式右为1或者 $\max(P_i) - P_i$ 表示接收端减小了能量的损失;式左为0表示发射端不携带能量,接收端幅度谱设置对系统的影响可以忽略,根据归一化幅度谱取值区间,在发送端幅度谱为0的情况下,收发两端幅度谱对应关系为 $0 \rightarrow P_i \in [0, 1]$;同时接收端幅度谱设置较好满足与干扰的正交性,减小干扰对相关解调的影响。

通过式(8)分析接收端信号干扰噪声的情况,当

发送端在某一频点上携带能量时,由式(16)可知接收端必然能够进行相关接收,减少了有用信号能量的损失,提高了 d_s ,而式(14)中多元编码幅度谱一方面能保证接收端基函数与干扰的正交性,另一方面能够减小 d_j ,使信号干扰噪声比尽可能地接近式(9)。

3 仿真验证分析

抗干扰性能与基函数密切相关,收发两端基函数相似度越高,相关解调误码率越小。基函数相似度越差,相关解调误码率越高。接收端通过计算 d_s 、 d_j 、 d_z 获得 R_{SINR} ,计算系统的误码率。仿真条件为:信噪比 R_{SN} 取 $-8 \sim 8$ dB;干扰为多音干扰,信道为加性高斯白噪声信道;基函数长度为512 bit,序列为9阶m序列;调制方式采用BCSK调制。仿真运行1 000次取平均值,仿真结果如图1~图5所示。

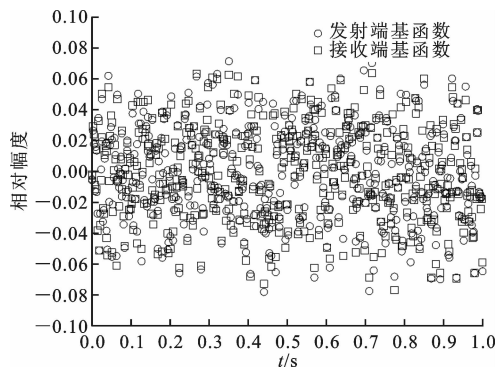


图1 文献[7]算法收发两端基函数对比图

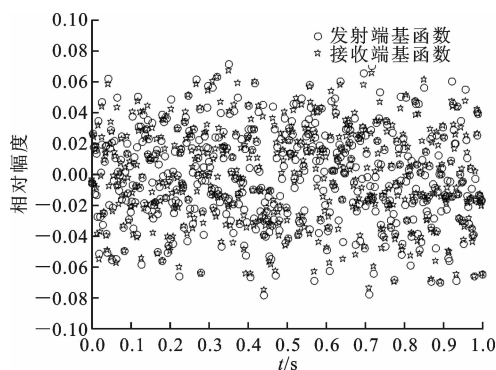


图2 文献[9]算法收发两端基函数对比图

图1为文献[7]算法收发两端基函数对比图,从中可看出,收发两端基函数存在较大误差;图2为文献[9]算法收发两端基函数对比图(干扰频谱占用率为1%),可看出文献[9]接收端相比发射端基函数存在许多点不匹配,相关解调时会出现较大偏差,误码率性能会恶化;图3为本文算法收发两端基函数

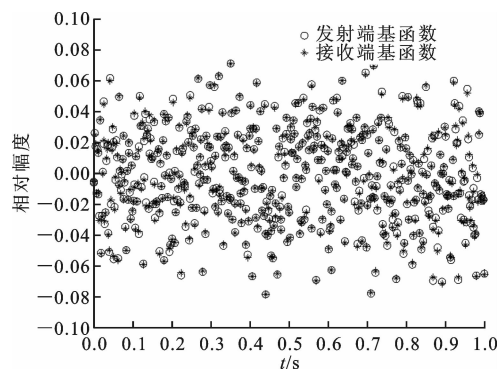


图 3 本文算法收发两端基函数对比图

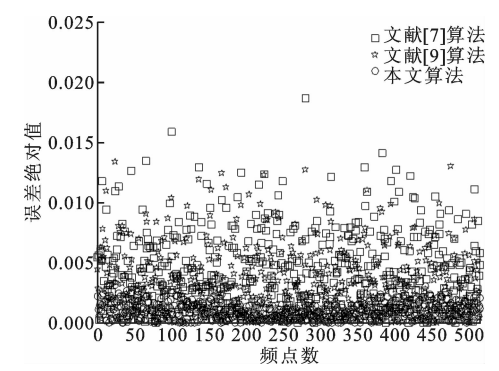


图 4 3 种算法基函数误差对比

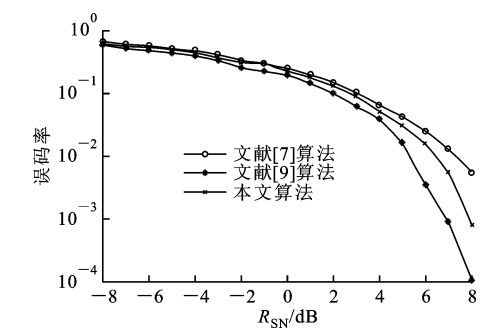


图 5 3 种算法的误码率

对比图,从中可以看出,本文算法产生的接收端基函数与发射端基函数相似度较好,大部分点与发射端基函数完全匹配,少数频点出现微小偏差,相关解调对输出信号影响较小,根据解调信号所在扇区区域可以判断输出信号,系统误码率性能较好;图 4 为文献[7]、文献[9]和本文算法的基函数误差对比图,可以看出本文算法的误差最小,基函数匹配程度最好,验证了算法的有效性。

图 5 为高斯白噪声信道条件下 3 种不同接收端基函数的抗干扰性能曲线,频谱占用率为 1%。由图 5 可知:文献[7]算法由于不考虑发送端基函数情况,直接以接收端本地基函数为准,频谱出现严重失配,会损失大量的信号能量,误码率较高;文献[9]采用类似等增益合并的算法设计接收端基函数,考虑

了信号能量的损失,有效减小了误码率,但是没有避免干扰对接收信号的影响;本文算法同时考虑信号能量的损失和接收端干扰对信号的影响,收发两端基函数相似度较高,相关接收误差很小,在频谱失配条件下具有良好的抗干扰性能。图 6 是不同干扰频谱占用率下 3 种机制的误码率性能,可以看出,相比直文献[7]和文献[9]的算法,本文的多元编码幅度谱成型算法具有更加优良的抗干扰性能。

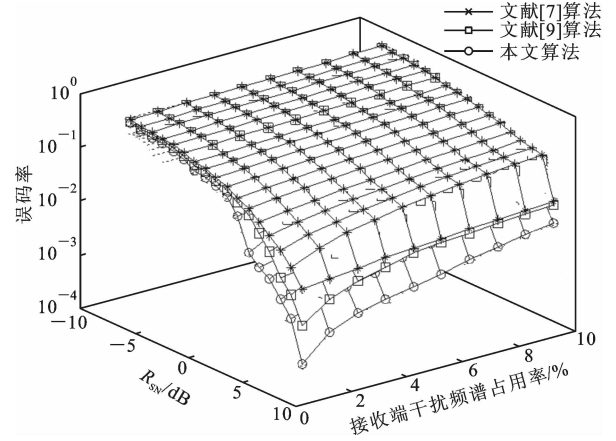


图 6 3 种算法在不同干扰频谱占用率下的误码率性能

4 结 论

本文通过分析 TDCS 在频谱失配条件下的信道传输状态,考虑影响系统接收性能的因素,提出远距离条件下多元编码幅度谱成型算法,并以此为基础产生基函数完成相关接收。本文算法同时考虑接收过程中信号能量的损失和干扰的影响,能够有效提高信号干扰噪声比。仿真结果表明,本文算法生成的基函数能够很好地匹配发射端基函数,提高抗干扰性能。本文算法可以解决远距离频谱失配抗干扰性能差的问题,扩展 TDCS 的应用。

参考文献:

[1] RADCLIFF R, RODNEY A, GREECE G C. Design and simulation of transform domain communication system [C]// IEEE International Conference for Military Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1997: 586-589.

[2] 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.

[3] HU Su, BI Guoan, GUAN Yongliang, et al. TDCS-based cognitive radio networks with multiuser interfer-

- ence avoidance [J]. IEEE Transactions on Communications, 2013, 61(12): 4828-4834.
- [4] ROBERTS M L, TEMPLE M A, RAINNES R A, et al. Communication waveform design using an adaptive spectrally modulated, spectrally encoded framework [J]. IEEE Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(1): 203-213.
- [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] SHARMA M, GUPTA R. Comparative analysis of various communication systems for intelligent sensing of spectrum [C]// Proceedings of IEEE International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 902-908.
- [7] LIU J Y, SU Y T. Performance analysis of transform domain communication systems in the presence of spectral mismatches [C]// Proceedings of IEEE Military Communications Conference Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 4454787.
- [8] HAN C. A spectrum exchange mechanism in cognitive radio contexts [C]// The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 4022497.
- [9] 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 Tiecheng, DA Xinyu, CHU Zhenyong, et al. Basic function design for transform domain communication system in the presence of spectral mismatches [J]. Journal of Jinli University (Engineering and Technology Edition), 2014, 44(6): 1825-1830.
- [10] HUANG Xinlin, HU Fei, WU Jun, 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.
- [11] BAJAJ I, LEE Y H, GONG Y. A spectrum trading scheme for licensed user incentives [J]. IEEE Transactions on Communications, 2015, 63(11): 4026-4035.
- [12] 刘立, 张衡阳, 毛玉泉, 等. 变换域通信系统自适应 N-sigma 幅度谱成型算法 [J]. 计算机应用, 2016, 36(6): 1492-1495.
- LIU Li, ZHANG Hengyang, MAO Yuquan, et al. Adaptive N-sigma amplitude spectrum shaping algorithm in TDCS [J]. Journal of Computer Applications, 2016, 36(6): 1492-1495.
- [13] 谢铁成, 达新宇, 褚振勇, 等. 采用时频分析的变换域通信系统基函数设计 [J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 42-47.
- XIE Tiecheng, DA Xinyu, CHU Zhenyong, et al. Design of basic functions for transform domain system using time-frequency analysis [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 42-47.

[本刊相关文献链接]

- 李彬, 李泉, 张若南, 等. 无线组播网络中应用网络编码的动态组合重传算法. 2016, 50(12): 38-44. [doi:10.7652/xjtuxb201612007]
- 沈连腾, 巩克现, 潘一苇, 等. 利用频谱峰值特征的窄带频谱感知方法. 2016, 50(6): 68-74. [doi:10.7652/xjtuxb201606011]
- 朱冰莲, 朱方方, 段青言, 等. 采用多策略离散人工蜂群的改进频谱分配算法. 2016, 50(2): 20-25. [doi:10.7652/xjtuxb201602004]
- 叶夏, 朱丰超, 高飞飞. 一种全双工物理层安全通信波束成形的低功耗方法. 2015, 49(8): 31-37. [doi:10.7652/xjtuxb201508006]
- 董恩清, 刘伟, 宋洋. 采用三角形节点块处理无线传感器网络节点定位中节点翻转歧义的迭代方法. 2015, 49(04): 84-90. [doi:10.7652/xjtuxb201504014]
- 钟艺玲, 穆鹏程. 单发多收无线窃听信道中的自适应保密速率传输方案. 2015, 49(4): 104-109. [doi:10.7652/xjtuxb201504017]
- 吴飞龙, 王文杰, 刘超文, 等. 接收空间调制信道容量计算及其鲁棒性设计. 2015, 49(2): 49-54. [doi:10.7652/xjtuxb201502009]
- 刘伎昭, 王泉. 车载自组网中联盟博弈的虚假数据检测策略. 2015, 49(2): 69-73. [doi:10.7652/xjtuxb201502012]
- 陈诚, 王磊, 李晓峰. 采用星座旋转的高速率空时分组码空间调制算法. 2014, 48(12): 113-119. [doi:10.7652/xjtuxb201412018]
- 张光华, 连峰, 韩崇昭, 等. 高斯混合扩展目标多伯努利滤波器. 2014, 48(10): 9-14. [doi:10.7652/xjtuxb201410002]
- 李建东, 郑杰, 刘勤, 等. 异构协作网络中采用令牌漏桶的多接入业务分配算法. 2014, 48(08): 7-11. [doi:10.7652/xjtuxb201408002]
- 王兵, 白智全, 董培浩, 等. 采用空时分组编码的动态分组加权合作频谱感知方案. 2014, 48(8): 23-28. [doi:10.7652/xjtuxb201408005]

(编辑 刘杨)