

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.10.013

基于幅度谱编码的基函数生成算法性能分析*

李 奎^{1,**}, 柏 鹏¹, 卢 虎²

(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, 西安 710051; 2. 空军工程大学 信息与导航学院, 西安 710077)

摘 要:通过对变换域通信系统的基函数生成算法的研究, 在传统的使用一维伪随机(PN)序列对相位进行随机化方法的基础上, 提出了一种新的基于随机幅度谱编码的算法用于基函数生成: 用另一个一维 PN 序列与基函数的幅度谱向量进行点乘, 对其随机化处理, 该方法生成的基函数较传统的一维 PN 序列方法产生的基函数的随机性提高 N (N 为基函数长度) 倍, 大大增强了系统的抗截获能力和多址容量; 最后对系统的误码率进行了仿真, 验证了该方法可以提高多址通信时的系统性能。

关键词:变换域通信系统; 基函数; 幅度谱编码; 多址通信

中图分类号: TN911 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-893X(2013)10-1321-06

Performance Analysis of Amplitude Spectrum Coding Based Basis Function Generation Algorithm

LI Kui¹, BAI Peng¹, LU Hu²

(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: The fundamental and basis function generation algorithm of transform domain communication system (TDCS) are analyzed firstly. On the basis of one-ary PN sequence phase randomization, the basis function generation algorithm based on amplitude spectrum coding is studied by using another one-ary PN sequence multiplied by the amplitude spectrum of basis function. The randomness of this method is N (N is the length of basis function) times by that of traditional method, which will increase the ability of anti-intercepting and capacity of multiple access. The simulation results show that performance on multiple access communication BER (Bit Error Ratio) is better.

Key words: transform domain communication system; basis function; amplitude spectrum coding; multiple access communication

1 引 言

变换域通信系统 (Transform Domain Communication System, TDCS) 作为认知无线电 (Cognitive Radio, CR) 技术的一种重要的传输体制, 得到了广泛的关注。TDCS 不同于传统的通信系统, 它在变换域中设计用于传输数据所需的基函数, 根据所检测的频谱环境变化, 可以主动避开授权用户和干扰所在的频段, 达到解决“频谱短缺”的目的^[1-2]。

基函数的波形设计是实现 TDCS 抗干扰、低截获 (Low Probability of Interception, LPI) 和多址性能的关键^[1,3]。目前, 对 TDCS 基函数设计的研究主要集中于幅度谱设计、随机相位生成算法等方面。TDCS 在多址通信时, 要保证每个用户的随机相位向量各不相同, 在随机相位生成时均需要配置不同的线性反馈移位寄存器 (Linear Feedback Shift Reg-

* 收稿日期: 2013-06-07; 修回日期: 2013-09-25 Received date: 2013-06-07; Revised date: 2013-09-25
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61174194); 航空科学基金项目 (20110196004)
Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61174194); Aeronautical Science Fund (No. 20110196004)
** 通讯作者: lk815160423@163.com Corresponding author: lk815160423@163.com

ister, LFSR) 及相位映射器, 会增大系统的复杂度。针对这个问题, 文献[4]提出了一种基于扩频相位编码的随机相位生成的方法, 降低了系统的复杂性, 具有良好的多址接入能力, 同时增大了系统的用户容量。针对 m 序列集中能构成最小互相关性的序列很少, 难以满足多址通信的用户容量要求的问题, 文献[5]提出一种基于混沌映射的随机相位产生方法, 但是混沌序列的产生过程极其复杂, 并且混沌序列对初始值非常敏感, 不利于随机相位生成的实现。文献[6]提出了一种采用双 m 序列控制的随机相位生成算法, 即用 m 序列的移位寄存器的值去控制另一个 m 序列的映射级数 r 。随机相位由二维参数控制, 较普通的一维 m 序列控制法, 提高了基函数的随机性。

传统的方法均是对基函数的相位进行随机化编码, 而对于基函数的幅度谱向量的随机化并未进行

研究。本文在传统的使用一维伪随机 (Pseudo Noise, PN) 序列对相位进行随机化的基础上, 提出了一种基于随机幅度谱编码基函数生成算法, 用一维 PN 序列与基函数的幅度谱向量进行点乘, 对其进行随机化处理, 由于同时使用了两个不同的 PN 序列, 因此该方法生成的基函数较传统的一维 PN 序列产生的基函数的随机性提高 N (N 为基函数长度) 倍, 这就大大增强了系统的抗截获能力。对系统的误码率进行了仿真验证了该方法可以提高多址通信时的系统性能和容量。

2 TDCS 的基本原理及系统组成

传统的基于傅里叶变换的 TDCS 系统框图如图 1 所示, 主要包括频谱感知、基函数幅度谱构造、随机相位生成、IDFT、调制解调和接收判决^[7]。

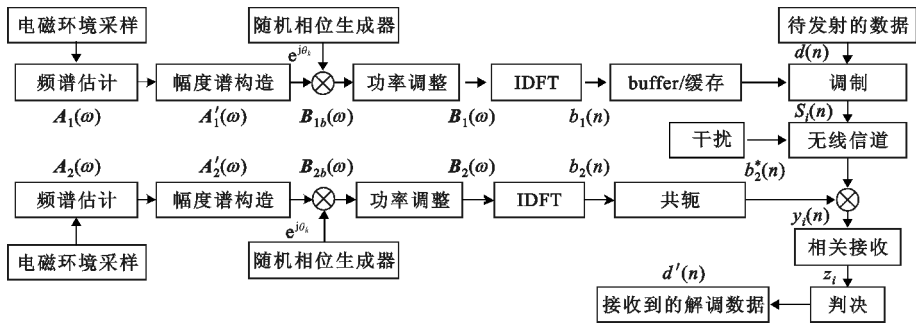


图 1 TDCS 系统框图
Fig. 1The system block diagram of TDCS

TDCS 发射端的信号处理流程: 通过频谱感知模块感知给定的电磁环境, 估计出环境频谱向量 $A_1(\omega)$, 通过阈值处理, 即超过预先设定的门限值时认为存在授权用户或干扰, 频段不能使用, 幅值设为 0; 否则认为无授权用户或干扰, 可以使用该频段用于信息的传输, 幅值设为 1; 得到由 0、1 构成的发射端基函数的幅度谱向量

$$A'_1(\omega) = [A_0, A_1, \cdots, A_k, \cdots, A_{N-1}]$$

式中, $A_k \in \{0, 1\}$, $k = 0, 1, \cdots, N - 1, N$ 为基函数的长度。将 $A'_1(\omega)$ 与随机相位映射器产生的等长度的复随机相位向量 $e^{j\theta_k}$ 相点乘得到 $B_{1b}(\omega)$, 经过功率调整得到 $B_1(\omega)$:

$$B_1(\omega) = C B_{1b}(\omega) = C A'_1(\omega) e^{j\theta_k} \tag{1}$$

式中, $C = \sqrt{\varepsilon_s N / N_A}$ 为幅度调整因子, ε_s 为发送一个码元所需要的能量, N_A 为 $A'_1(\omega)$ 中 1 的个数。 $B_1(\omega)$ 经过 IDFT, 得到时域基函数 $b_1(n)$:

$$b_1(n) = \text{IDFT}[B_1(\omega)] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_s}{N_A}} A_k e^{j\theta_k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{2}$$

将 $b_1(n)$ 存储用以调制信息数据; 发送信号时, 使用 $b_1(n)$ 对数据 $d(n)$ 进行调制, 经过上变频后通过天线发送出去^[8]。

TDCS 接收端的信号处理流程是发射端的逆过程, 在此不再赘述。

3 基函数的波形设计

通过上面的分析可知, TDCS 使用 PN 序列用于生成基函数的相位, 载波调制特性具有噪声特性。这不仅有利于减少对其他用户的干扰, 也降低了被窃听和被截获的概率, 如果对方不掌握 PN 序列的生成规律, 就解调不出有用的信息; 同时, 由于系统使用基函数来调制数据, 这与超宽带 (Ultra-wide Band, UWB) 通信相类似, 可以使 TDCS 具有准确定

位跟踪的能力^[9];通过给不同用户分配不同的序列码片就可以生成不同的基函数,由于基函数良好的相关特性,不同用户的基函数之间几乎是正交的,可以避免不同用户间的干扰,使 TDCS 具有多址接入能力。因此,基函数波形设计是 TDCS 能够实现抗干扰、低截获和多址性能的重要前提。基函数波形设计包括基函数的幅度谱设计和随机相位生成^[10]。

基函数的幅度谱设计是将感知到的环境频谱向量 $\mathbf{A}(\omega)$ 与预先给定的阈值门限进行比较,确定哪些频段可以用于信号传输。幅度谱设计方法包括平坦幅度成型法、编码幅度成型法、分形门限法和分段迭代门限法等^[11]。

随机相位生成是指伪随机相位向量 $e^{j\theta_k}$ 由 PN 序列经过相位映射器产生,可以使用的 PN 序列包括 m 序列、Gold 序列、Kasami 序列等。随机相位保证了 TDCS 的发射信号具有类似噪声的信号波形,使系统具有良好的 LPI 特性;在多址通信时,给每个用户分配不同的 PN 码,就实现了系统多址通信的能力^[8]。

本文以 m 序列为例,详细阐述随机相位生成的原理。随机相位生成就是给幅度谱向量的各个元素随机地分配一个相位的过程,TDCS 的相位生成方法如图 2 所示。首先由 n 阶 LFSR 产生周期 N 为 2^n-1 的 m 序列,然后从 n 个寄存器中随机选取 r 个,这些寄存器可以是 n 个寄存器中的任意组合,将选定的 r 个寄存器对应的状态值作为随机相位映射器的输入进行相位映射,产生一个随机相位。当 LFSR 偏移一个状态时,重复上述操作,得到下一个相位。重复偏移 N 次后,即得到一个长度与基函数一致的随机相位向量。随机相位的取值空间为

$$\theta_k \in \{0, \frac{2\pi}{2^r}, \frac{2\pi \times 2}{2^r}, \dots, \frac{2\pi \times (2^r-1)}{2^r}\}$$

其中, $k=0,1,\dots,N-1$ 。由 m 序列的平衡性可知,产生的随机相位 $e^{j\theta_k}$ 在 $(0,2\pi)$ 上服从均匀分布^[12]。

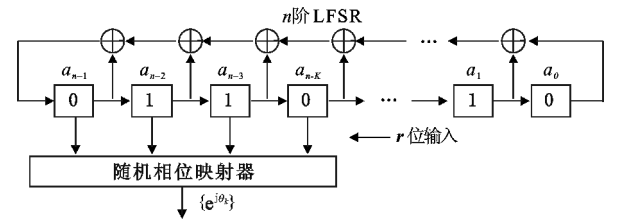


图 2 随机相位生成原理

Fig. 2 The principle diagram of the generated random phase

由公式(2)可以推导出任意两个长度相等的基

函数 $b_x(n)$ 与 $b_y(n)$ 的相关函数

$$\begin{aligned} R(m) &= \sum_{n=0}^{N-1-m} [b_x(n)b_y^*(n+m)] = \\ &= \sum_{n=0}^{N-1-m} \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{u=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_A}} A_u e^{j(\theta_u + \frac{2\pi un}{N})} \right) \cdot \\ &\quad \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{v=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_A}} A_v e^{-j(\theta_v + \frac{2\pi v(n+m)}{N})} \right) = \\ &= \frac{\mathcal{E}_s}{NN_A} \sum_{n=0}^{N-1-m} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} A_u A_v e^{j\frac{2\pi(uv - vn - vm)}{N}} \cdot \\ &\quad e^{j(\theta_u - \theta_v)} \end{aligned} \tag{3}$$

式中, A_u, A_v 为不同基函数的幅度谱值, θ_u, θ_v 为不同基函数的随机相位。当 $x=y$ 时,为基函数的自相关函数,可知当 $m=0$ 时有最大自相关峰值

$$R(0) = R_{\max}(m) = 1 \tag{4}$$

4 基于幅度谱编码的基函数生成研究

4.1 幅度谱编码基函数生成

基于幅度谱编码基函数生成的过程:在得到发射端基函数的幅度谱向量 $\mathbf{A}'(\omega)$ 后,用一个长度与 $\mathbf{A}'(\omega)$ 相同的 PN 序列构成的一维向量 $\mathbf{P}$ 与此幅度谱向量按元素进行点乘,对 $\mathbf{A}'(\omega)$ 随机化处理,得到新的幅度谱向量 $\mathbf{A}_p(\omega)$:

$$\mathbf{A}_p(\omega) = \mathbf{P} \cdot \mathbf{A}'(\omega) = [p_0 A_0, p_1 A_1, \dots, p_k A_k, \dots, p_{N-1} A_{N-1}] \tag{5}$$

式中, $p_k \in \{0,1\}, k=0,1,\dots,N-1, N$ 为基函数的长度。然后将 $\mathbf{A}_p(\omega)$ 与随机相位向量 $e^{j\theta_k}$ 进行点乘,再进行功率调整后得到新的频域基函数 $\mathbf{B}_p(\omega)$:

$$\mathbf{B}_p(\omega) = C \mathbf{A}_p(\omega) e^{j\theta_k} = [p_0 A_0 e^{j\theta_0}, p_1 A_1 e^{j\theta_1}, \dots, p_k A_k e^{j\theta_k}, \dots, p_{N-1} A_{N-1} e^{j\theta_{N-1}}] \tag{6}$$

$\mathbf{B}_p(\omega)$ 经过 IDFT,得到时域基函数 $b_p(n)$,用以调制发射数据

$$b_p(n) = \text{IDFT}[\mathbf{B}_p(\omega)] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_A}} p_k A_k e^{j\theta_k} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{7}$$

可得采用循环移位键控 (Cyclic Shift Keying, CSK) 调制时,发射信号的模型为

$$s_{ip}(n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} \sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{N_A}} p_k A_k e^{j\theta_k} e^{-j\frac{2\pi S_k}{M} n} e^{j\frac{2\pi kn}{N}} \tag{8}$$

这种方法容易实现,与传统的仅对相位进行随机化的方法相比,基函数的随机性提高 N 倍,大大增强了系统的抗截获能力,即提高了系统的 LPI 特性;同时可供多址通信时的序列数目变大,提高了系

统的容量。图 3 为采用该方法的发射机框图。

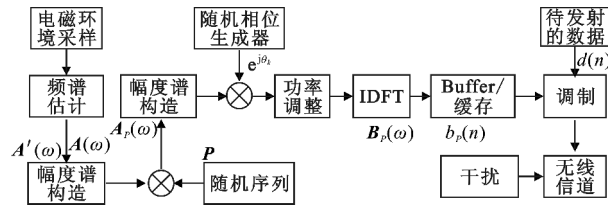


图 3 基于随机幅度谱编码的 TDCS 发射机框图
Fig. 3 The transmitter diagram based on amplitude spectrum coding

由公式(6)可以设计另一种基函数的模型,将随机幅度谱编码后得到的 $A_p(\omega)$ 直接与一个固定非 0 的相位值相乘,省去复杂的随机相位生成过程。此时得到新的基函数为

$$B_p(\omega) = C A_p(\omega) e^{j\theta} = [p_0 A_0, p_1 A_1, \dots, p_k A_k, \dots, p_{N-1} A_{N-1}] e^{j\theta} \quad (9)$$

式中, θ 为非 0 常数值。故图 3 可以简化为图 4 形式。

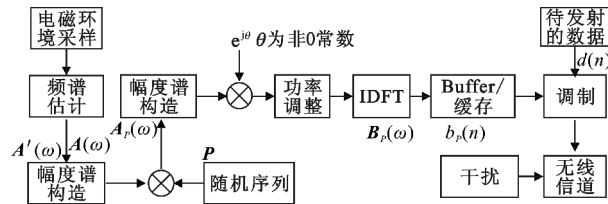


图 4 简化的基于随机幅度谱编码的 TDCS 发射机框图
Fig. 4 The simplified transmitter diagram based on amplitude spectrum coding

假设信道为 AWGN 信道,存在多个用户同时工作,采用 CSK 调制时,接收机接收到来自第 i 个用户的信号为

$$r_{ip} = \sqrt{\frac{\mathcal{E}_s}{NN_A}} \left(\sum_{k=0}^{N-1} p_k A_k e^{j(\theta_k - \frac{2\pi S_k}{M-ary} + \frac{2\pi kn}{N})} + \sum_{q=0}^{N-1} p_{k,q} A_k e^{j(\theta_{kq} - \frac{2\pi S_{kq}}{M-ary} + \frac{2\pi kn}{N})} \right) + w(n) \quad (10)$$

式中, Q 为用户的数量,第一项为待接收处理的信号,第二项为其他用户的干扰, $w(n)$ 为高斯白噪声。

4.2 仿真结果与分析

图 5 为单用户通信时的不同基函数长度下系统误码率对比图。由于相位映射器的阶数对系统影响较小,而且 m 序列的长度应当满足与基函数最大长度相等,故仿真条件为:基函数长度 $N=[64 \ 128 \ 256 \ 512]$;用于生成随机相位的为 9 阶 m 序列,相位映射器的阶数 $r=3$,序列的特征多项式为 $[0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$,移位寄存器的初始状态为 $[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$

1];用于幅度谱编码的为 9 阶 m 序列,相位映射器的阶数 $r=3$,序列的特征多项式为 $[0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$,移位寄存器的初始状态为 $[0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1]$ 。

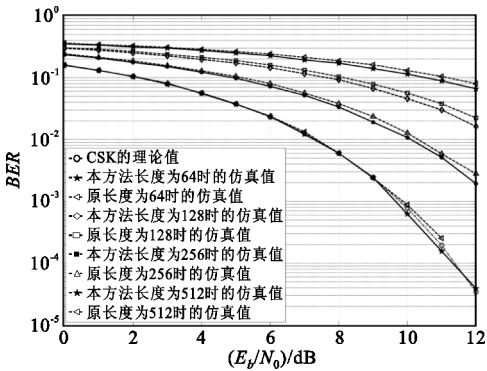


图 5 单用户时的系统误码率对比
Fig. 5 The system BER of single user

由图可知,基函数的长度越长,系统误码率越小,当基函数长度为 512 时,系统的误码率性能接近于理论值;当基函数长度小于 512 时,采用本方法的系统误码率要优于传统的方法,这说明本文提供的方法更能胜任恶劣的、可用频谱较少时工作环境;当基函数的长度 $N=512$ 时,采用本方法的系统误码率与理论值和传统方法相当。因此,本文提供的方法更能胜任恶劣的、可用频谱较少下的工作环境。

图 6 为传统方法下系统在多址环境下的误码率曲线图。仿真条件为:基函数的长度 $N=512$,采用 9 阶 m 序列,相位映射器的阶数 $r=3$ 。

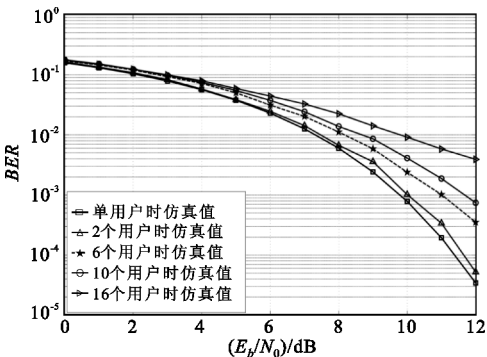


图 6 多址通信时的系统误码率
Fig. 6 The system BER of multiple access communication

由图可知,通过给每个用户分配不同的随机相位向量,可以实现系统的多址接入。随着用户数量的增加,系统的误码率升高,性能恶化,影响系统的容量,因此有必要研究相关的技术来提高 TDCS 的多址通信能力。

图 7 为使用本文方法时的多址通信的系统误码率曲线图。仿真条件为: 基函数长度 $N=512$; 用于生成随机相位的为 9 阶 m 序列, 相位映射器的阶数 $r=3$, 序列的特征多项式为 $[0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$, 移位寄存器的初始状态为 $[0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1]$; 用于幅度谱编码的为 9 阶 m 序列, 相位映射器的阶数 $r=3$, 序列的特征多项式为 $[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 1]$, 移位寄存器的初始状态为 $[0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 1]$ 。

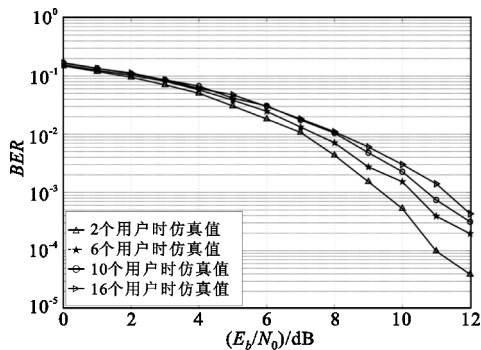


图 7 本文方法下多址通信时的系统误码率
Fig. 7 The system BER of multiple access communication under the proposed method

由图 7 可知, 随着用户数量的增多, 系统的误码率随之变大。与图 6 相比较可知, 采用本文提出的方法在系统性能上要优于传统的方法, 能够有效地降低多址通信时的误码率, 证明了本文提出算法的有效性; 而且在系统参数相同的条件下, 采用本文方法可以提高系统的用户数量。

5 结 语

本文提出了一种新的基函数生成算法, 即基于幅度谱编码的基函数生成算法, 并给出了所产生基函数的数学模型, 通过分析仿真可知, 该算法在单用户通信时, 当基函数长度小于 512, 即可认为电磁环境恶劣, 可用频谱资源较少时, 与传统算法比较, 可以提高系统的误码率性能; 当基函数长度大于等于 512 时, 与传统算法得到的误码率性能一致; 当进行多址通信时, 本文提供的算法能够提高系统的误码率和容量, 同时由于使用了两个 PN 序列, 进一步提高了基函数的随机性, 增强了系统的 LPI 特性。本文的系统性能仿真分析都是基于加性高斯白噪声信道下进行的, 没有考虑多径衰落的影响, 未来的工作可以考虑在多径衰落信道对算法进行深入研究。

参考文献:

- [1] Mitola J. Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio [D]. Stockholm, Sweden: Royal Institute Technology, 2000.
- [2] Zhou R L, Han Q, Cooper R, et al. A software defined radio based adaptive interference avoidance TDCS cognitive radio [C]//Proceedings of 2010 IEEE International Conference on Communication. Cape Town, South Africa: IEEE, 2010: 1-5.
- [3] 苟彦新. 无线电抗截获抗干扰通信 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2010.
GOU Yan-xin. Wireless Anti-jamming anti-interception Communication [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2010. (in Chinese)
- [4] 孙海欣. 基于动态谱接入的变换域通信系统及其关键技术研究 [D]. 吉林: 吉林大学, 2012.
SUN Hai-xin. TDCS Based on Dynamic Spectrum Access and its Key Technology [D]. Jilin: Jilin University, 2012. (in Chinese)
- [5] 何世彪, 季烨, 潘辉. TDCS 中随机相位的混沌产生方法 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2008, 31 (12): 1381-1385.
HE Shi-biao, JI Ye, PAN Hui. A method to generate pseudorandom phases in transform domain communication system by chaos mapping [J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 2008, 31 (12): 1381-1385. (in Chinese)
- [6] 王传丹, 张忠培, 李少谦. 一种新的基函数产生方法与性能分析 [J]. 电子科技大学学报 (社会科学版), 2006, 35 (4): 79-82.
WANG Chuan-dan, ZHANG Zhong-pei, LI Shao-qian. A New Method of Basis Function Generation and Its Performance Analysis [J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China (Social Sciences Edition), 2006, 35 (4): 79-82. (in Chinese)
- [7] 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 Zhi-qing. Research of Designing, Modeling and Simulation of Transform Domain Communication System [D]. Xi'an: Northwest Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [8] 郑瑜. 变换域通信系统的研究与仿真分析 [D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
ZHENG Yu. Study and Simulation Analysis of Transform Domain Communication System [D]. Chongqing: Chongqing University, 2010. (in Chinese)
- [9] 贺鹏飞. 超宽带无线通信关键技术研究 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2007.
HE Peng-fei. Research on Key Technologies for Ultra-Wideband Wireless Communications [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2007.

jing University of Posts and Telecommunications. 2007.
(in Chinese)

[10] 史军,迟永钢,张乃通. 变换域通信系统:原理、技术与发展趋势[J]. 南京邮电大学学报(自然科学版), 2009, 29(1):87-94.
SHI Jun,CHI Yong-gang,ZHANG Nai-tong. Principle, Technology and Tendency of Transform Domain Communication System [J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications, 2009, 29 (1): 87 - 94 .
(in Chinese)

[11] 芮国胜, 苗俊, 杨霄. 变换域通信系统的分形门限研究[J]. 系统仿真学报, 2009, 21(13):4077-4079.
RUI Guo-sheng, MIAO Jun, YANG Xiao. Research on Fractal Threshold for TDCS[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(13):4077-4079. (in Chinese)

[12] Zhang Xinyu. Analysis of M-sequence and Gold-sequence in CDMA system [C]//Proceedings of IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks. Xi'an;IEEE,2011:466-468.

作者简介:



李 奎(1988—),男,河南信阳人,空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为变换域通信系统;

LI Kui was born in Xinyang, Henan Province, in 1988. He is now a graduate student. His research concerns transform domain communication system.

Email:lk815160423@163.com

柏 鹏(1961—),男,四川成都人,空军工程大学教授、博士生导师,主要研究方向为通信系统工程;

BAI Peng was born in Chengdu, Sichuan Province, in 1961. He is now a professor and also the Ph. D. supervisor. His research concerns communication system engineering.

卢 虎(1975—),男,陕西西安人,空军工程大学副教授、硕士生导师,主要研究方向为信号处理。

LU Hu was born in Xi'an, Shaanxi Province, in 1975. He is now an associate professor and also the instructor of graduate students. His research concerns signal processing.