

一种新的 TDCS 基函数生成方法及性能分析

王 杰, 毛玉泉, 张衡阳, 袁 天, 郭 尧

(空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077)

摘要 针对变换域通信系统基函数生成过程中硬判决门限难以精确设置且判决复杂度高的问题,提出了一种功率谱翻转的基函数生成方法。该方法在对电磁环境采样估计的基础上,利用环境谱翻转来构造基函数幅度谱,省去了传统门限值设置和判决的步骤,从而大大降低了通信系统的运算复杂度;另外,由于没有完全舍弃被干扰的频段,与传统的“0”、“1”硬判决相比,该方法生成的基函数频率组成更加丰富而具有更好的相关特性。仿真结果表明:功率反转的基函数生成方法可以降低系统的运算复杂度,同时提高基函数的相关性能,为 TDCS 的深入研究提供了新的思路。

关键词 变换域通信系统;基函数;功率谱翻转;抗干扰

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2014.01.015

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2014)01-0067-05

A New Method of Generating TDCS's Basis Function and the Analysis of Its Performance

WANG Jie, MAO Yu-quan, ZHANG Heng-yang, YUAN Tian, GUO Yao

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

Abstract: Aimed at the problem that the decision threshold is difficult to precisely set and the complexity of hard decision is high, a new method of power spectrum flip to generate basis function is proposed based on the sampling and estimates of electromagnetic environmental and the environmental spectrum flip is used to construct basis function's amplitude spectrum. In this way, lots of the threshold setting and decision steps are eliminated, thus greatly reducing the computational complexity in the communication system. Furthermore, compared with the traditional '0' and '1' hard decision method, the new method can be used to generate the basis function with more frequency components and a better correlation performance because the jammed band is not discarded completely. Simulation results show that the new method of generating basis function in power spectrum flip can reduce the computational complexity of the communication system and simultaneously improve the correlation performance of the basis function, which provides a new way of thinking for the in-depth study of TDCS.

Key words: TDCS; basis function; power spectrum flip; anti-jamming

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是基于认知无线电(Cogni-

tive Radio, CR)、扩频通信和变换域处理技术发展起来的一项新技术^[1-2]。它通过收发两端分别对通

收稿日期:2013-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61202490);陕西省自然科学基金资助项目(2010JQ8010)

作者简介:王 杰(1987-),男,云南昭通人,硕士生,主要从事变换域通信抗干扰技术研究。E-mail:xdwj061216@126.com

引用格式:王杰,毛玉泉,张衡阳,等.一种新的 TDCS 基函数生成方法及性能分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2014,15(1):67-71. WANG Jie, MAO Yuquan, ZHANG Hengyang, et al. A new method of generating TDCS's basis function and the analysis of its performance [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2014, 15(1): 67-71.

信信道进行频谱估计,在变换域内主动地避开干扰的影响。TDCS 以其独特的抗干扰方式、灵活的频谱接入能力和低截获率/低检测概率(Low Probability of Intercept/Low Probability of Detect, LPI/LPD)特性^[3],受到国内外广泛的关注和研究。

基本调制波形——基函数(Basis Function, BF)的设计是实现 TDCS 抗干扰和 LPI/LPD 性能的一个关键技术,也是 TDCS 的核心内容。目前,对 TDCS 基函数设计的研究主要是判决门限的设置和干扰剔除方面^[4-5],然而判决门限选择存在很大的困难,若门限值取得过大,可能会导致窄带干扰信号的漏检,不能将干扰剔除干净而使 BF 中混有干扰的频率分量,使系统误码率增加;反之,若取得过小,可能将本不存在干扰的子带剔除掉,导致可用频带的浪费,更重要的是使 BF 频率组成简单而降低其相关性能。针对这一问题,文献[6~7]提出了采用多级门限判决的 BF 生成方法,将传统的二元判决推广到多元领域,对传统判决结果进一步细化,更加准确地反映了信道质量差别;文献[8]将分形理论运用到 BF 生成过程中,采用以盒维数为判据的谱峰检测算法,从而提高了 TDCS 的误码率性能;文献[9]则在分数阶傅里叶域对 TDCS 的 BF 生成及其性能展开研究,在一个新的变换域内进一步提升 TDCS 抗干扰性能,其对非平稳干扰的抵抗具有极大的优势。

1 TDCS 原理

自 German 1988 年提出 TDCS 的思想^[10]以来,随着频率资源日益紧张和 TDCS 抗干扰性能的逐渐提升,TDCS 得到广泛的研究和发展,现已取得一定的成果^[11-14],但是由于 TDCS 实现比较复杂,并且对高速 DSP 芯片的依赖性强,所以目前对 TDCS 的研究还主要集中在模型建立、理论分析、仿真验证等方面。其基本工作原理见图 1、图 2,它是基于 FFT 的变换域通信系统,其他变换域通信系统的原理图基本一样,只是将相应变换模块更换为其他的变换方法。

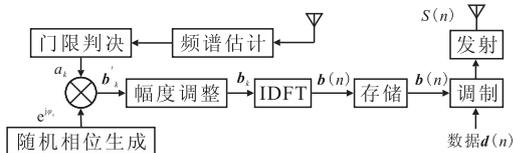


图1 TDCS发射机原理图

Fig.1 Schematics of TDCS transmitter

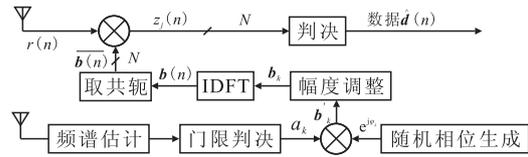


图2 TDCS接收机原理图

Fig.2 Schematics of TDCS receiver

由图 1 所示的发射机原理框图可知,发射机对其工作信道的电磁环境进行周期为 T_c 的采样,得到信道的实时功率谱,将每个采样点的功率谱幅值和门限值比较,大于门限值的对应位置设定为 0,小于或等于门限值的位置设定为 1,生成 BF 的幅度谱 a_k 。将 a_k 和 m 序列映射得到的随机相位对应相乘,得到 BF 的频域形式:

$$b'_k = a_k e^{j\theta_k}, k=1,2,\dots,N \quad (1)$$

为了确保发射信号矢量有相同的能量,对 b'_k 进行幅度调整:

$$b_k = c_k b'_k = c_k a_k e^{j\theta_k}, k=1,2,\dots,N \quad (2)$$

式中 $c_k = \sqrt{N/N_k}$, N_k 为频谱幅值为 1 的个数, N 为 BF 长度。将式(2)进行离散反傅里叶变换(Inverse Discrete Fourier Transform, IDFT)得到 BF 的时域离散形式 $b(n)$:

$$b(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k a_k e^{j(2\pi kn/N + \theta_k)}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (3)$$

式中 T_s 为 BF 的周期,且 $T_s = NT_c$ 。

最后将 $b(n)$ 存储起来作为基本调制波形 BF,如果信道的电磁环境在一段连续的频谱估计时间间隔内恒定不变,则只在该时间间隔起始时生成新的 BF;如果信道的电磁环境随时间而变,则根据其变化频率选择采样估计周期,然后按照该周期对存储器中的基函数作相应的更新。

由图 2 所示的接收机原理框图可知,接收机端采用与发射机端相同的技术生成相应的基函数,只是在 IDFT 变换后多一个共轭运算,得到 BF 的共轭 $\overline{b(n)}$:

$$\overline{b(n)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k a_k e^{j(2\pi kn/N - \theta_k)}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (4)$$

对 $\overline{b(n)}$ 做等间隔的 N 次循环移位得到 N 个信号矢量 $\overline{b(n)}_j$ 。

$$\overline{b(n)}_j = \overline{b(n)} \cdot \delta(n - j), j=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

式中“ \cdot ”表示向量 $\overline{b(n)}$ 与向量 $\delta(n - j)$ 的对应元素相乘,将接收到的信号矢量 $r(n)$ 分别和信号矢量 $\overline{b(n)}_j$ 做相关运算,得到结果 $z_j(n)$ 。

$$z_j(n) = r(n) \overline{b(n)}_j, j=0,1,\dots,N-1 \quad (6)$$

找出 $z_j(n)$ 中最大值的下标 j ,根据 $\overline{b(n)}_j$ 相对于参考信号矢量 $\overline{b(n)}$ 的循环移位估计出所传送的

数据符号 $\hat{d}(n)$ 。

2 功率谱翻转的基函数生成方法

前面已经提到,传统的 BF 生成方法是通过设置门限值,然后对环境的频谱进行干扰剔除,形成一个“0”、“1”序列并与相应的伪随机相位相乘来实现。其主要思想是丢弃被干扰的频段,将需要传输的有用信息能量平均分配到“干净”的频段上,从源头上主动地躲避干扰对通信系统的影响,其中判决门限的设置一直是困扰研究者的一大难题,要做到精确定位和剔除干扰频段且不造成“干净”频段的浪费是相当困难的。为此,可以换个角度来考虑,将需要传输的有用信息能量非均等地分配到信道带宽上,即将信号能量从“干净”频段到干扰频段逐渐递减的分配,到环境功率谱峰值处即干扰频段则不分配能量。通过将环境功率谱翻转来代替传统的“0”、“1”序列,形成一个渐变的 BF 幅度谱,这种方法与文献[6~7]中的多元门限判决方法类似,但其运算复杂度要小得多。

功率谱翻转的基函数生成方法,首先把通信信道的谱估计结果做翻转,然后再做一个纵向平移,得到的幅度谱就作为基函数的幅度谱,具体按照式(7)进行计算,然后按照式(8)进行归一化处理,其中 $n = 0, 1, \dots, N-1$ 。

$$a(n) = \max(\text{PSD}(n)) - \text{PSD}(n) \quad (7)$$

$$a'(n) = \frac{a(n) - \min(a(n))}{\max(a(n)) - \min(a(n))} \quad (8)$$

式中: $a'(n)$ 表示功率谱翻转生成的基函数在频点 n 处的幅值; $\max(\text{PSD}(n))$ 表示通信信道谱估计的功率谱最大幅值; $\text{PSD}(n)$ 表示频率点 n 处的信道功率谱幅值; N 为 BF 长度。

图 3、图 4 分别为单音、多音干扰的谱估计结果。图 5、图 6 为单音、多音干扰下门限判决法与本文方法剔除干扰后基函数幅度谱,图 7、图 8 为所得基函数的时域仿真对比。在仿真中选用单音干扰、多音干扰作为干扰样式,其中单音干扰中心频率为 200 Hz,多音干扰由 7 个中心频率分别为 75 Hz、150 Hz、200 Hz、285 Hz、340 Hz、395 Hz、440 Hz 的单音干扰组成,谱估计采用 20 阶的 AR 模型,传统固定门限选为谱估计功率谱最大幅值的 40%,采用 9 级的最大移位寄存器序列映射产生相应的伪随机相位矢量,对信道采样频率为 512 Hz,采样点数 N 即生产基函数长度为 512,由仿真结果可以看出,传统的门限剔除方法未能将环境功率谱的细节信息充分利用,而本文所提的功率谱翻转基函数生成方

法抓住环境功率谱的每一个细节,生成的基函数具有良好的伪噪声性质。

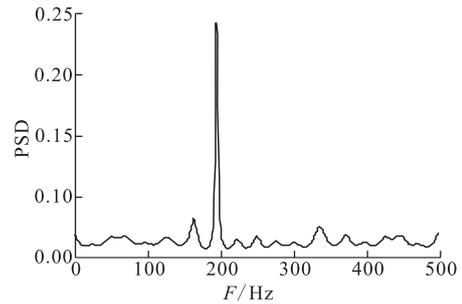


图 3 单音干扰功率谱估计结果

Fig.3 The spectrum estimated results of the single-tone jamming

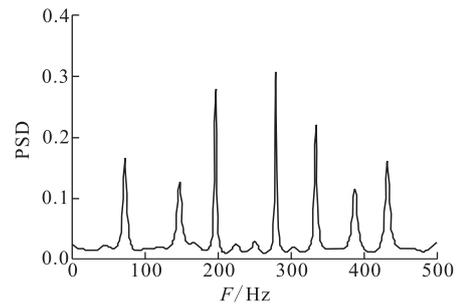


图 4 多音干扰功率谱估计结果

Fig.4 The spectrum estimated results of the multi-tone jamming

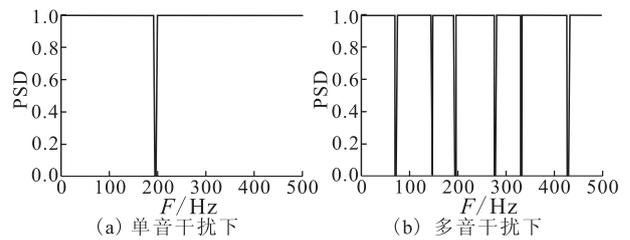


图 5 传统门限判决方法结果

Fig.5 The results of traditional threshold decision method

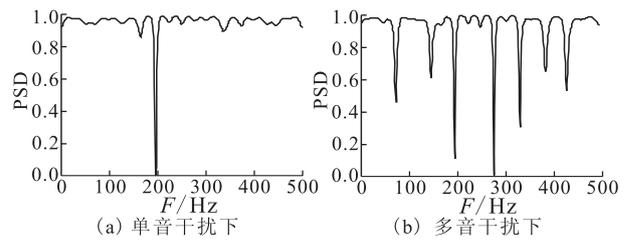


图 6 功率谱翻转方法结果

Fig.6 The results of power spectrum flip method

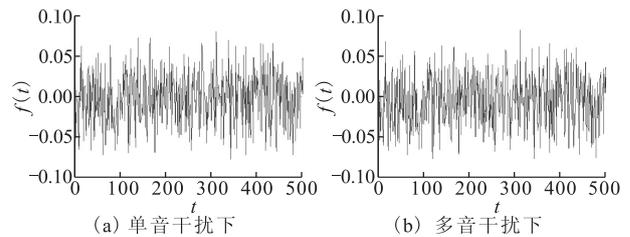


图 7 传统门限判决方法时域波形

Fig.7 The time-domain form of the traditional threshold decision method

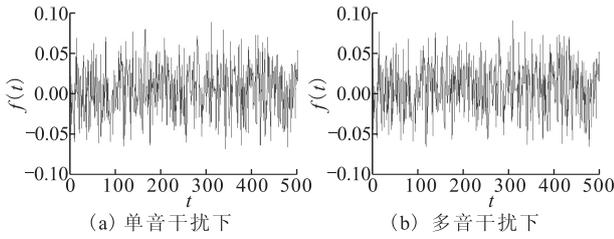


图 8 功率谱翻时域波形

Fig. 8 The time-domain form of the power spectrum flip method

3 基函数的相关性分析

2 个长度相同的时域基函数 $b_l(n)$ 、 $b_q^*(n)$ ，其相关函数：

$$R(m) = E[b_l(n)b_q^*(n+m)] = \frac{1}{N^2} \sum_{n=0}^{N-1-m} \sum_{u=0}^{N-1} \sum_{v=0}^{N-1} A_u A_v^* e^{j\frac{2\pi(mu-nv-mv)}{N} + \varphi_u - \varphi_v} \quad (9)$$

式中： N 为基函数采样点数； m 为基函数之间的时移； A_u 、 A_v^* 是 2 个基函数的频谱幅值； φ_u 、 φ_v 分别为 2 个基函数第 u 和 v 个子载波的相位。

当 $b_l(n) \neq b_q^*(n)$ ，且 $m=0$ 时，可以得到基函数的互相关函数最大值为：

$$R_{\text{cross}}(0) = \frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} |A_u|^2 e^{\varphi_u - \varphi_v} \quad (10)$$

当 $b_l(n) = b_q^*(n)$ ，且 $m \neq 0$ 时，可以得到基函数的自相关函数为：

$$R_{\text{auto}}(m) = \frac{1}{N^2} \sum_{u=0}^{N-1} |A_u|^2 e^{j\frac{2\pi mu}{N}} \quad (11)$$

当 $b_l(n) = b_q^*(n)$ ，且 $m=0$ 时，可以得到基函数的自相关函数最大值为：

$$R_{\text{auto}}(0) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{N-1} |A_u|^2 \quad (12)$$

图 9 为存在单音、多音干扰下传统门限判决方法和本文方法生成其函数自相关函数对比。

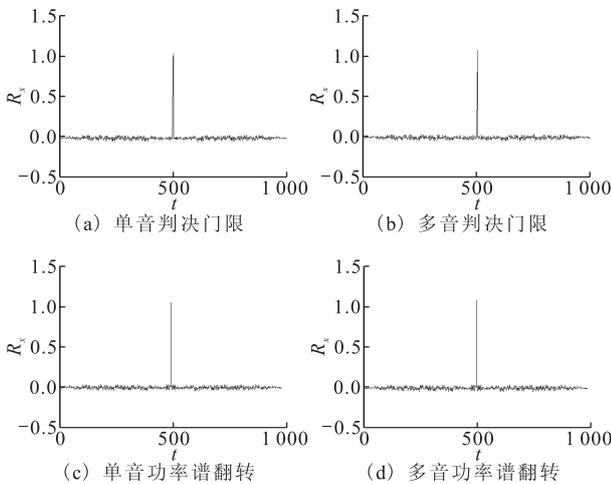


图 9 BF 自相关函数仿真结果

Fig. 9 The simulation results of BF's autocorrelation function

图 10 为其互相关函数仿真结果。由图可以看出，本文方法所得 TDCS 基函数具有良好的自相关峰值特性，且互相关值更低，从而验证了所提方法的有效性。

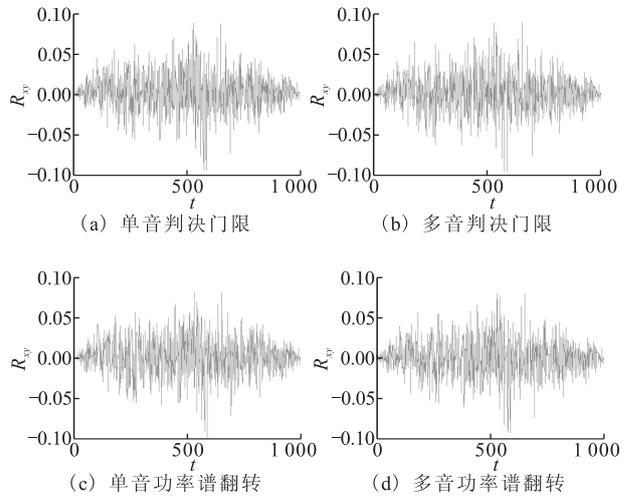


图 10 BF 互相关函数仿真结果

Fig. 10 The simulation results of BF's crosscorrelation function

表 1 是存在不同干扰样式下功率谱翻转的基函数生成方法和传统的门限硬判决方法得到的基函数最大互相关值的比较，单音、多音干扰与前面仿真参数相同；10%窄带干扰为中心频率为 $f_1=200$ Hz， $f_2=400$ Hz 且干扰带宽占信道总带宽的 10%；扫频干扰为初始相 $\phi_0=0$ ，中心频率 $f_0=150$ Hz，调频率 $u_0=248$ Hz/s，1 个码元周期内扫过 40%频带的干扰信号。从表 1 可以看出，所提方法生成的基函数具有更低的互相关峰值。

表 1 最大互相关值比较

Tab. 1 The maximum value of BF's cross-correlation

基函数生成方法	单音干扰	多音干扰	10%窄带干扰	扫频干扰
传统门限判决法	0.099 6	0.099 0	0.100 3	0.134 7
功率谱翻转法	0.098 8	0.097 0	0.098 5	0.091 0

4 结语

本文提出一种基于功率谱翻转的 TDCS 基函数生成方法，通过将通信环境的谱估计结果做翻转以替代传统二元硬判决结果“0”、“1”序列作为基函数的幅度谱。一方面避免了门限值的设置和判决的步骤，降低了系统运算复杂度；另一方面又保留了更多的频率成分，使生成的基函数具有更好的相关性。通过与传统门限值设置和判决方法生成的基函数的分析与仿真对比，表明利用功率谱翻转生成的基函数具有更好的相关特性，为 TDCS 的深入研究提供了新的途径。

参考文献(References):

- [1] 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. The transform domain communication system design, modeling and simulation [D]. Xi'an: Northwestern polytechnical university, 2003. (in Chinese)
- [2] 史军,迟永刚,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(2):87-94.
SHI Jun, CHI Yonggang, ZHANG Naitong. Principle, technology and tendency of transform domain communication system [J]. Journal of Nanjing university of posts and telecommunications: natural science edition, 2009, 29(2): 87-94. (in Chinese)
- [3] Andren A F. Low probability of intercept communication system USA; Patent 5029184[P]. 1991.
- [4] 王杰,毛玉泉,张衡阳,等.基于 Otsu 准则的 TDCS 自适应判决门限算法[J].空军工程大学学报:自然科学版,2013,14(4):71-75.
WANG Jie, MAO Yuquan, ZHANG Hengyang, et al. TDCS adaptive threshold selection algorithm based on Otsu guidelines[J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2013, 14(4): 71-75. (in Chinese)
- [5] 任清华,李正刚.变换域通信系统及抗干扰性能仿真[J].空军工程大学学报:自然科学版,2009,10(4):86-90.
REN Qinghua, LI Zhenggang. Transform domain communication system and its performance simulation of interference suppression [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2009, 10(4): 86-90. (in Chinese)
- [6] 曾武,达新宇,申勇,等.基于多级门限判决的 TDCS 基函数生成及性能分析[J].重庆邮电大学学报:自然科学版,2012,24(3):354-357.
ZENG Wu, DA Xinyu, SHEN Yong, et al. TDCS basis function generation and performance analysis based on multi-level threshold detection [J]. Journal of Chongqing university of posts and telecommunications: natural science edition, 2012, 24(3): 354-357. (in Chinese)
- [7] 张春海,薛丽君,张尔扬.基于自适应多门限算法的变换域窄带干扰抑制[J].电子与信息学报,2006,28(3):461-464.
ZHANG Chunhai, XUE Lijun, ZHANG Eryang. Narrow-Band interference suppression in transform domain based on adaptive multi-threshold algorithm [J]. Journal of electronics & information technology, 2006, 28(3): 461-464. (in Chinese)
- [8] 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):4077-4083.
RUI Guosheng, MIAO Jun, YANG Xiao. Research on fractal threshold for TDCS [J]. Journal of system simulation, 2009, 21(13): 4077-4083. (in Chinese)
- [9] Wang C D, Zhang Z P, Li S Q. Interference avoidance using fractional Fourier transform in transform domain communication system [C]//Advanced communication technology, the 9th international conference. Phoenix: ICACT, 2007: 1756-1760.
- [10] German E H. Transform domain signal processing study final report [M]. Reisterstown, MD: AFRL, 1988.
- [11] 王舒,达新宇,褚振勇,等.载波频率偏差对变换域通信系统性能的影响分析[J].空军工程大学学报:自然科学版,2012,13(6):60-65.
WANG Shu, DA Xinyu, CHU Zhenyong, et al. Analysis of the effect of carrier frequency offset on the performance of transform domain communication system [J]. Journal of air force engineering university: natural science edition, 2012, 13(6): 60-65. (in Chinese)
- [12] Pei Soo-chang, Ding Jian-jun. Relations between gabor transforms and fractional fourier transforms and their applications for signal processing [J]. IEEE transactions on signal processing, 2007, 55(10): 4839-4850.
- [13] Zhou R L, Han Q, Cooper Reginald, et al. A software defined radio based adaptive interference avoidance TDCS cognitive radio [C]//IEEE international conference on communication. Cape Town, South Africa: IEEE press, 2010: 1-5.
- [14] Roberts M L, Temple M A, Mills R F, et al. Interference suppression characterization for spectrally modulated, spectrally encoded signals [J]. IEE electronic letters, 2006, 42(19): 1103-1104.

(编辑:徐楠楠)