

基于自适应多门限的基函数生成算法

任清华,熊金石,刘 岗,褚振勇

空军工程大学电讯工程学院,西安 710077

摘要 变换域通信系统(TDCS)具有对环境感知的能力,可以躲避干扰,具有优异的抗干扰性能。基函数生成算法是 TDCS 的核心算法。通过分析现有基函数生成算法存在的问题,提出了一种采用自适应多门限的基函数生成算法。该算法在传统二元判决的基础上,引入多元结构,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。理论分析表明,采用本文所提出的基函数生成算法产生的基函数,能够较好地克服传统门限估计算法对于信道环境自适应性不强等缺点,并且算法的门限设计简单,获得了较好的干扰抑制性能。

关键词 变换域通信系统;基函数;自适应多门限;干扰抑制

中图分类号 TN92

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)21-0082-04

Algorithm for Base Function Generation Based on Adaptive Multi-threshold

REN Qinghua, XIONG Jinshi, LIU Gang,
CHU Zhenyong

College of Telecommunication Engineering, Air Force
Engineering University, Xi'an 710077, China

Abstract With the ability of sensing the electromagnetic environment, the Transform Domain Communication System (TDCS) can avoid jamming, with an excellent performance of anti-jamming. The base function generation is the core in the algorithms of TDCS. After an analysis of shortcomings of existing algorithms for base function generation, an algorithm of using adaptive multi-threshold in the base function generation is proposed in the paper for the TDCS. The algorithm uses a multi-structure, making the traditional adjudicate result more refined to reflect the difference of channel quality more accurately, based on the traditional binary adjudicate. The theoretical analysis shows that the algorithm of generating base functions based on adaptive multi-threshold can overcome the shortcoming of the traditional threshold estimation algorithm of bad adaptability with respect to channel circumstance. And the threshold design of the algorithm is simple, with good interference suppression performance.

Keywords Transform Domain Communication System; basis function; adaptive multi-threshold; interference suppression

0 引言

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是在扩频通信和变换域处理技术的基础上发展的。它采用了扩频通信中的伪随机序列生成技术和变换域信号处理技术,使收发双方同时避免使用被污染的频谱(包括对方实施干扰的频谱及己方正使用的频谱)进行信号的传输^[1]。这样就相当于在复杂的电磁环境中找到了一个干净频段进行通信,接收的信噪比不会因为干扰信号的存在而下降,从而实现了抗干扰,提高了通信的可靠性和有效性。

1 TDCS 中基函数的构成

基函数生成算法是 TDCS 的核心算法。TDCS 的基函数生成算法主要由基函数幅值算法和伪随机相位算法两项构成^[2]。

1.1 基函数幅值算法

基函数幅值算法,即 $A'(\omega)$ 的产生方法,是由信道估计、门限剔除和谐成型几部分组成。基函数幅值生成算法决定了基函数在变换域中的能量分布能否避免干扰,即 TDCS 的抗干扰能力的大小由基函数幅值算法决定。不同的变换方法采用的基函数幅值生成算法也不同。目前使用最多的是傅里叶变换和小波变换^[3]。

1.2 伪随机相位生成

为了使 TDCS 实现 LPI/LPD(低截获/低检测)特性,系统

收稿日期:2009-07-27

基金项目:中国高技术研究发展计划(863 计划)创新基金项目(2007AAJ130);中国博士后科学基金项目(20070421136)

作者简介:任清华(中国科协所属全国学会个人会员登记号:E190001121M,E212936024M),教授,研究方向为军事航空通信与组网,电子信箱:tsinghuaren@163.com

也采用了直扩中使用的 PN 序列。通过相应的映射计算,相位映射器根据该序列构造了一个伪随机复相位矢量 $e^{j\phi(i)}$,该矢量与前面的谱矢量 $A'(\omega)$ 长度相同。图 1 说明了伪随机复相位生成器的工作原理,一个 m 序列每 r bits 抽样后将与 2^r 个复相位值匹配。这种相位值的选择以及随后的为频率分量分配的过程也被称为频谱编码。

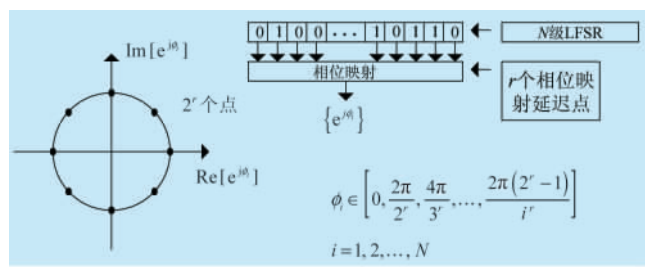


图 1 TDCS 相位匹配过程

Fig. 1 The phase mapping process of TDCS

2 传统空闲频谱标记算法存在的问题

在基于门限检测的干扰剔除算法中,干扰检测门限的设计是算法实现的关键问题。传统 TDCS 的门限剔除方法中,对整个子带进行门限剔除,也就是说整个子带被置为 0 或 1。这种方法潜在的问题是由于各种变换基都存在着能量泄漏效应,某个子带内的干扰能量如果很高会导致相邻子带的能量也随之升高,因此基于子带的门限剔除有可能将根本不存在干扰的子带剔除掉;而且,如果干扰检测门限估计过高,可能会导致无法检测和抑制窄带干扰信号的旁瓣,从而使得输出判决变量的信噪比减小,系统误码率提高^[4]。

目前文献中对门限选取的方法讨论较少,常见的方法有 N-sigma 算法^[5]和 σ^2 最大似然估计法^[6]等。以上两种门限估计方法,都可以实现无干扰条件下,接收信号功率的有效估计,但是分析可知,当接收信号中存在窄带干扰分量时,由于干扰信号经过 DFT 变换之后,不满足高斯分布假设,因此上述两种方法都需要根据信道环境适当调整门限。

为了克服上述门限估计算法对于信道环境自适应性不强等缺点,文献[7]提出一种新的自适应多门限估计与干扰检测算法。理论分析和数字仿真结果表明,该算法可以有效抑制直扩通信系统中的窄带干扰,并且相对于传统的门限检测算法,有自适应强、门限设计简单等优点。在借鉴文献[7]思想的基础上,下面给出一种变换域通信系统中基于自适应多门限的基函数幅值生成算法。

3 基于自适应多门限的基函数幅值生成算法

3.1 信号分析

假设信道为理想的加性高斯白噪声(AWGN)信道,信号在信道传输过程中混入了白噪声和窄带干扰信号,分别用 $v(t)$ 和 $i(t)$ 表示,则接收端接收信号可表示为

$$x(t)=s(t)+v(t)+i(t) \quad (1)$$

接收端将尽量对干扰 $i(t)$ 进行抑制,以正确恢复信息序列 $\{S_k\}$ 。接收端先经过匹配滤波,然后按 $1/T_c$ 采样,得到接收信号的离散形式:

$$x(k)=s(k)+v(k)+i(k) \quad (2)$$

DFT 变换可看作将时域信号 $x(n)$ 通过一组归一化中心频率分别为 $2\pi k/N (k=0, 1, 2, \dots, N-1)$, 频率响应为 $|\sin Nx/\sin x|$ 的窄带滤波器组。

$X(k)$ 即输入序列 $x(n)$ 经过第 k 个滤波器之后进行临界下采样之后的输出

$$X(k)=\sum_{n=0}^{N-1} x(n)\exp(-j2\pi kn/N) \quad (3)$$

对于 BPSK 调制,不妨假设接收端信号中 $s(n)$ 服从均值为 0 的 0~1 分布,且不同时刻的分布相互独立,即 $s(n)$ 与 $s(n-1)$ 相互独立。容易证明,接收信号中的噪声分量 $v(n)$ 是均值为 0, 方差为 σ_n^2 的高斯白噪声。当系统扩展比较大,接收信号中期望信号淹没在信道噪声中,即 $E_b/N_0 \ll L$ (L 为序列长度)时,可以认为 $s(n)+v(n)$ 的 DFT 变换 $S(k)+V(k)$ 近似服从高斯分布。又 DFT 是一组窄带滤波器,所以可以近似认为 $S(k)+V(k)$ 是一个窄带高斯信号。

下面分析窄带高斯信号波形的统计特性。窄带高斯信号可以表示为^[8]

$$x(t)=A_m(t)\cos[\omega_c(t)-\phi(t)] \quad (4)$$

其中, $A_m(t) \geq 0$, 为信号的随机包络函数。进一步展开得到

$$\begin{aligned} x(t) &= A_m(t)\cos\phi(t)\cos\omega_c(t) - A_m(t)\sin\phi(t)\sin\omega_c(t) \\ &= x_c(t)\cos\omega_c(t) - x_s(t)\sin\omega_c(t) \end{aligned} \quad (5)$$

其中, $x_c(t)$ 称为信号的同相分量, $x_s(t)$ 称为信号的正交分量, 即

$$\begin{cases} x_c(t)=A_m(t)\cos\phi(t) \\ x_s(t)=A_m(t)\sin\phi(t) \end{cases} \quad (6)$$

此时, 信号的随机包络函数为

$$A_m(t)=\sqrt{x_c^2(t)+x_s^2(t)} \quad (7)$$

信号的随机相位函数为

$$\phi(t)=\arctan \frac{x_s(t)}{x_c(t)} \quad (8)$$

从式(6)~式(8)可以看到, 窄带高斯信号 $x(t)$ 的统计特性将表现在 $x_c(t)$ 、 $x_s(t)$ 、 $A_m(t)$ 和 $\phi(t)$ 中, 当窄带高斯信号 $x(t)$ 的统计特性确定之后, 就可以进一步确定 $x_c(t)$ 、 $x_s(t)$ 、 $A_m(t)$ 和 $\phi(t)$ 的统计特性。对于一些特定的窄带高斯信号 $x(t)$, 可以比较容易地求出 $x_c(t)$ 和 $x_s(t)$ 的统计特性, 然后结合概率论的知识, 利用式(6)就可以求出 $A_m(t)$ 和 $\phi(t)$ 的统计特性。

假设 $x(t)$ 是平稳高斯窄带信号, 其均值为 0、方差为 σ_n^2 , 可以证明随机过程 $x_c(t)$ 和 $x_s(t)$ 有如下特性^[9]:

- 1) $x_c(t)$ 和 $x_s(t)$ 都是平稳的高斯过程。
- 2) 它们的均值为 0, 即 $E[x_c(t)]=E[x_s(t)]=0$; 方差均为 σ_n^2 , 也就是 $\sigma_{x_c}^2=\sigma_{x_s}^2=\sigma_n^2$ 。
- 3) $x_c(t)$ 和 $x_s(t)$ 在同一时刻的取值是线性不相关的随机变量。因为它们是高斯的, 所以也是统计独立的。

由随机过程的知识可知, 对于高斯过程, 当已知其均值

方差和相关函数后,可以立即得到它的分布函数。根据 $x_c(t)$ 和 $x_s(t)$ 的特性,可以得到其联合概率密度函数:

$$f(x_c, x_s) = f(x_c) \cdot f(x_s) = \frac{1}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left(-\frac{x_c^2 + x_s^2}{2\sigma_n^2}\right) \quad (9)$$

由概率论,利用式(9),可以计算 $A_m(t)$ 和 $\phi(t)$ 的联合概率密度函数

$$f(A_m, \phi) = J \cdot f(x_c, x_s) \quad (10)$$

其中, J 为雅克比因子,

$$J = \left| \frac{\partial(x_c, x_s)}{\partial(A_m, \phi)} \right| = \left| \begin{array}{cc} \partial x_c / \partial A_m & \partial x_c / \partial \phi \\ \partial x_s / \partial A_m & \partial x_s / \partial \phi \end{array} \right| = \left| \begin{array}{cc} \cos \phi & \sin \phi \\ -A_m \sin \phi & A_m \cos \phi \end{array} \right| = A_m \quad (11)$$

所以, $A_m(t)$ 和 $\phi(t)$ 的联合概率密度函数

$$\begin{aligned} f(A_m, \phi) &= A_m \cdot f(x_c, x_s) = \frac{A_m}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{x_c^2 + x_s^2}{2\sigma_n^2}\right] \\ &= \frac{A_m}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{A_m^2}{2\sigma_n^2}\right] \end{aligned} \quad (12)$$

上式中, $A_m \geq 0, \phi \in (0, 2\pi)$ 。利用概率论中的边缘分布,分别求得 $f(A_m)$ 和 $f(\phi)$ 如下:

$$\begin{aligned} f(A_m) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(A_m, \phi) d\phi = \int_0^{2\pi} \frac{A_m}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{A_m^2}{2\sigma_n^2}\right] d\phi \\ &= \frac{A_m}{\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{A_m^2}{2\sigma_n^2}\right] \\ f(\phi) &= \int_{-\infty}^{\infty} f(A_m, \phi) dA_m = \int_0^{\infty} \frac{A_m}{2\pi\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{A_m^2}{2\sigma_n^2}\right] dA_m \\ &= \frac{1}{2\pi} \end{aligned} \quad (13)$$

其中, $A_m \geq 0, 0 \leq \phi \leq 2\pi$ 。

可见,窄带高斯信号的包络服从 Rayleigh 分布,而相位服从 $(0, 2\pi)$ 的均匀分布。

令 $u(t) = A_m^2(t), A_m \geq 0$, 则

$$A_m(t) = \sqrt{u(t)}$$

由此得到新的雅克比因子为

$$J' = \frac{1}{2\sqrt{u(t)}} \quad (14)$$

所以,

$$f(u) = |J'| f(A_m) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \exp\left[-\frac{u}{2\sigma_n^2}\right] \quad u \geq 0 \quad (15)$$

式(15)表明,窄带高斯信号包络的平方服从参数为 λ 的指数分布。其中, $\lambda = 1/2\sigma_n^2$ 。

以上分析可知,在无干扰的情况下,可以认为接收序列经过 DFT 变换之后得到的 N 根谱线的幅度的平方服从参数为 λ 的指数分布。

3.2 门限选取

假定频域干扰检测的门限设定为 T , 根据上一节的分析,记 $|S(k) + V(k)|^2$ 不超过该门限的概率 P 为^[7]

$$P = P(|S(k) + V(k)|^2 < T) = 1 - \int_T^{\infty} \lambda e^{-\lambda x} dx \quad (16)$$

分别取 $T_n = n/\lambda, n = 1, 2, \dots$ 。式(16)化简得

$$P = 1 - e^{-n} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (17)$$

可见, P 与指数分布的参数 λ 无关。在 Matlab 下仿真如图 2 所示。

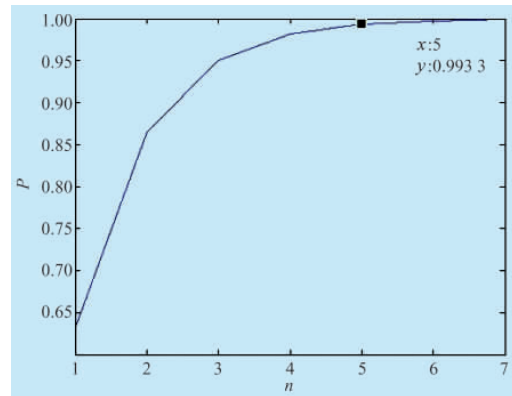


图 2 检验概率与参数 n 的关系

Fig. 2 Relationship between test probability and parameter n

从图 2 中可以很明显地看出,当接收信号中无窄带干扰存在时,经过 DFT 变换后,谱线模的平方 $|S(k) + V(k)|^2 > 5/\lambda$ 的概率 $P_5 = 0.0067$,即在显著性水平 $\alpha = 0.0067$ 的条件下,模的平方 $|S(k) + V(k)|^2 > 5/\lambda$ 的谱线可以认为是不存在的。

3.3 算法设计

假设检验问题的数学描述可以表述如下,需要检验的问题为

$$\begin{aligned} H_0: Z(t) &= 0 \\ H_1: Z(t) &> 0 \end{aligned} \quad (18)$$

每次检验的样本容量等于 DFT 的点数 N ,由指数分布的统计特性,取检验统计量为

$$Z = \{\text{满足 } |X(k)|^2 > n/\lambda \text{ 的谱线根数}\} \quad (19)$$

当检验统计量满足 $Z=0$ 时,认为原假设 H_0 成立,否则如果 $Z(t) > 0$,则认为备选假设 H_1 成立。实际应用中,当 DFT 变换的点数 N 较大 ($N > 256$) 时,谱线幅度的平方和的平均值可以作为统计平均值 $E(x) = 1/\lambda$ 的无偏估计,即

$$\hat{\mu} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N |S(k) + V(k)|^2 = \frac{1}{\lambda} \quad (20)$$

DFT 变换后,当假设 H_0 成立时,则认为接收信号中无窄带干扰存在,否则假设 H_1 存在,则认为模的平方 $|X(k)|^2 > n/\lambda$ ($n = 1, 2, 3, 4, 5$) 的谱线包含了窄带干扰信号的能量。对不满足假设 H_0 的谱线进行重置,然后对处理之后的谱线重新计算 $\mu = 1/\lambda$ 的估计 $\hat{\mu}$,再进行上述的检验过程,直到不满足假设 H_0 的谱线不再存在。

自适应多门限干扰检测与处理算法的具体步骤描述如下。

1) 系统初始化

对整个频段进行扫描,并进行 DFT。

2) 基准估计

对 DFT 后的 N 根谱线的模进行平方累加, 然后除以 N , 得到样本的平均值, 作为对 $\mu=1/\lambda$ 的估计 $\hat{\mu}$ 。

3) 门限设定

根据 $T_n=n\hat{\mu}$ 设定门限值。 $n=5, n=n-1, n>0$ 。

4) 门限判决

对 N 根谱线进行统计, 计算检验统计量 Z , 如果 $Z>0$, 则对模的平方值大于门限 $T_n=n\hat{\mu}$ 的谱线 (这些谱线中包含有窄带干扰信号的能量) 进行重置, 令其为 $A=0$, 下次统计时忽略被重置的谱线, 转步骤 2)。否则, 如果 $Z=0$, 则表示该频段中没有干扰信号存在, $A=5, A=A-1, A>0$, 转步骤 5)。

5) 结束本次算法

通过自适应多门限干扰检测与处理算法, 对整个频段进行了重置, 得到自适应多门限幅值。最终的结果如图 3 所示。

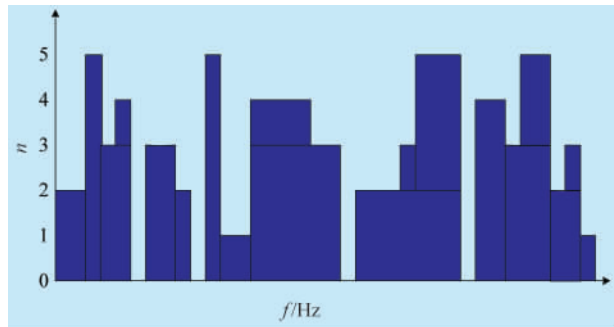


图 3 TDCS 自适应多门限幅值

Fig. 3 Adaptive multi-threshold amplitude of TDCS

4 多元伪随机相位和基函数生成

在 1.2 节中提到为了使 TDCS 实现 LPI/LPD (低截获/低检测) 特性, 传统的 TDCS 中采用了直扩中使用的二进制伪随机码 (PN 码) 发生器产生一个伪随机序列, 通过相应的映射计算, 相位映射器根据该序列构造了一个伪随机复相位矢量 $e^{j\theta(\omega)}$ 。通过上节的自适应多门限干扰检测与处理算法, 得到了自适应多门限幅值, 与之对应, 选用了多进制 m 序列生成伪随机相位。

根据 TDCS 的工作原理, 收发信机首先采样电磁环境, 形成空间电磁谱功率估计, 然后执行自适应多门限幅值生成算法, 识别并标记频谱质量, 形成自适应多门限幅值, 记为 $A'(\omega)$ 。同时, 伪随机相位生成器合成与用户相关的 M 元复随机矢量, 记为 $e^{j\theta(\omega)}$ 。频谱质量 (幅值) 矢量与 M 元复随机矢量作对应元素相乘, 形成新的 M 元复信号矢量, 该矢量经功率调整得到发射用复频域基函数矢量。至此, 复频域基函数矢量与干扰信号频域矢量正交。随后, 经 IFFT 变换, 得到时域离散信号矢量, 亦即 TDCS 的时域基函数。

5 结论

本文深入研究了变换域通信系统中的基函数生成问题, 在文献[6]的自适应多门限思想的基础上, 提出了一种变换域

通信系统中基于自适应多门限的基函数生成算法。理论分析表明, 本文提出的算法可以获得较好的干扰抑制性能。相对于传统算法, 文中算法门限设计简单, 对信道环境的自适应能力强。

参考文献 (References)

- [1] Chakravarthy V, Nunez A S, Stephens J P, et al. TDCS, OFDM, and MC-CDMA: A brief tutorial [J]. *IEEE Radio Communications*, 2005, 43(9): S11-S16
- [2] 李正刚. 复杂电磁环境下的远距离航空型变换域通信系统研究[D]. 西安: 空军工程大学电讯工程学院, 2008
Li Zhenggang. Research of long-distance aero transform domain communication system under complex electromagnetic environment [D]. Xi'an: College of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University, 2008.
- [3] Klein R W, Temple M A, Raines R A, et al. Interference avoidance communications using wavelet domain transformation techniques [J]. *IEEE Electronics Letters*, 2001, 37(25): 987-989.
- [4] 何智青, 任辉. 变换域通信系统动态仿真平台设计与系统研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 692-695.
He Zhiqing, Ren Hui. *Journal of System Simulation*, 2004, 16 (4): 692-695.
- [5] Capozza P T. A single chip narrow-band frequency-domain excisor for a Global Positioning System (GPS) receiver[J]. *IEEE J Solid State Circuits*, 2000, 35(3): 401-411.
- [6] 薛巍, 向敬成, 黄怀信. 基于门限估计的直扩通信系统窄带干扰变换域抑制方法[J]. 电子与信息学报, 2003, 25(7): 990-994.
Xue Wei, Xiang Jingcheng, Huang Huaixin. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2003, 25(7): 990-994.
- [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): 461-465.
Zhang Chunhai, Xue Lijun, Zhang Eryang. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2006, 28(3): 461-465.
- [8] 达新宇, 陈树新, 王瑜, 等. 通信原理教程 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2005.
Da Xinyu, Chen Shuxin, Wang Yu, et al. *Communication fundamental tutorial* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Post and Telecommunications, 2005.
- [9] 朱华, 黄辉宁, 李永庆, 等. 随机信号分析 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1995.
Zhu Hua, Huang Huining, Li Yongqing, et al. *Random signal analyze* [M]. Beijing: Publishing House of Beijing University of Science and Technology, 1995.

(责任编辑 杨书卷)

《科技导报》“科技工作者建议”征稿

“科技工作者建议”栏目专门刊登科技工作者近期提出的、与科学技术相关的工作意见和建议。科技建议应着眼于科技研究、发展、应用、政策等领域的实际问题, 要求有明确、具体的内容, 方法上尽量具有可操作性。文字应简洁明了, 非特别重大的建议以 500 字左右为宜, 特别重要的建议不超过 2 200 字。请注明建议人姓名、单位。欢迎国内外科技工作者及各级科协、学会投稿。栏目责任编辑: 王芷; 投稿邮箱: wangzhi@cast.org.cn。