

变换域通信系统中干扰信号的逐次消除

王传丹 张忠培 李少谦

(电子科技大学通信与信息工程学院 成都 610054)

摘要: 该文通过对影响变换域通信系统(TDCS)抗干扰性能的基函数相关参数的理论分析, 提出基于 RAT+FRFT+IFRFT 的环境干扰的逐次估计方法, 避免强干扰对弱干扰的屏蔽, 实现了 TDCS 环境干扰的准确估计; 提出基于环境干扰参数的准确估计, 产生与各干扰分量相正交的子基函数, 通过子基函数级联产生系统基函数的方法, 彻底剔除基函数中的干扰谱。采用该方法生成的基函数使 TDCS 系统具有良好的抗干扰性能及环境适应性。

关键词: 变换域通信系统; 非平稳; 多干扰; 分数傅里叶变换; 基函数

中图分类号: TN92

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2008)10-2439-03

Interferences Mitigation One by One in Transform Domain Communication System

Wang Chuan-dan Zhang Zhong-pei Li Shao-qian

(School of Communication Engineering, UEST of China, Chengdu 610054, China)

Abstract: In this paper, the relation between anti-interferences performances of Transform Domain Communication System(TDCS) and basis function's relational parameters are analyzed theoretically; a method of interferences mitigation one by one based on RAT+FRFT+IFRFT is proposed, it can avoid masking affection of strong jammer on weak jammer, and estimate the circumstance jams exactly; a method of system basis function generation based on sub-basis functions concatenation is proposed, these sub-basis functions are generated by the results of every jam estimation exactly and they are orthogonal with every corresponding jam, the circumstance jams' spectrums are mitigated completely from system basis function with the method. The advantage anti-interferences performance and adaptability to communication circumstances for TDCS can be produced with the proposed methods.

Key words: TDCS(Transform Domain Communication System); Non-stationary; Multi-interferences; FRFT; Basis function

1 引言

变换域通信系统(TDCS)是近年来发展起来的一种通信方式, 具有独特的抗干扰性能, 特别适合于频谱拥挤、频段共用、军事领域等环境下的应用。TDCS 通过对发送信号进行信号设计、从信号构成中消除干扰频谱、彻底解决干扰信号对传输信号影响的方式, 提高系统的抗干扰性能, 是一种与传统通信系统抗干扰原理完全不同的抗干扰通信系统^[1]。

在现有的研究中, 对平稳干扰、干扰类型较少时的 TDCS 系统研究较多^[2], 而对包含平稳、非平稳干扰、并且干扰较多时如何彻底剔除基函数(BF)中干扰谱的研究较少; 另外, 在已知环境干扰时, 如何得到最佳设计信号频谱的研究也未见报道。本研究通过对 TDCS 基函数的产生原理及与系统性能相关参数的详细理论分析, 提出 TDCS 最佳基函数的实现条件; 为实现 TDCS 环境干扰的准确估计, 提出基于 RAT

+FRFT+IFRFT 的环境干扰的逐次估计方法; 并提出在环境干扰参数的准确估计的基础上, 产生与各干扰分量相正交的子基函数、通过子基函数级联产生系统基函数的方法, 彻底剔除基函数中的干扰谱。采用所提方法, 达到 BF 性能最优、抗信道剩余干扰能力最强的目的, 使 TDCS 系统具有最佳性能。

2 基函数的产生

2.1 基函数的产生

在 TDCS 中, BF 决定发射信号波形及系统抗干扰性能, 对系统具有十分重要的作用。经过对环境采样、门限判决、相位映射等处理, 得到频谱与干扰谱正交的基函数 $B(u)$ ^[3]:

$$B(u) = A'(u)e^{j\varphi(u)} \quad (1)$$

u 是变换域, 可以是频域、分数域、小波域等; $B(u)$ 的幅值 $A'(u)$ 通过环境谱估计与门限 A_T 判决产生, 当环境谱估计超过 A_T 时 $A'(u)$ 为 0, 否则为 1。

2.2 基函数设计要求

采用得到的 $b(t)$ 调制数据时通常有两种方法, 一种是反

2007-04-02 收到, 2007-09-24 改回

国家自然科学基金(60496313)和电子科技大学通信抗干扰技术国家重点实验室基金资助课题

极性调制, 另一种是正交调制^[2, 3]。反极性调制采用 $b(t)$ 和 $-b(t)$ 分别表示调制数据 1 和 0; 正交调制则用 $b(t)$ 和 $b(t)$ 的半周期移位分别表示 1 和 0^[3]。不同调制具有不同的误码率 (BER) 性能, 可统一表示为^[3]

$$BER = Q(\sqrt{\alpha E_b / N_0}) \quad (2)$$

E_b 是每比特信号能量, N_0 是噪声功率谱, $\alpha = 1$ 为正交调制, $\alpha = 2$ 为双极性调制。

若发送数据为 1, 信号为 $b(t)$, 则接收端接收到的信号为

$$r(t) = b(t) + n_0 + J \quad (3)$$

其中 n_0 是信道加性高斯噪声, J 是信道干扰。经过与本地接收基函数 $\bar{b}(t)$ 相关后, 接收数据估值为

$$\hat{d}(t) = r(t) * \bar{b}(t) = (b(t) + n(t) + J(t)) * \bar{b}(t) = b(t) * \bar{b}(t) + (n(t) + J(t)) * \bar{b}(t) = 1 + n(t) * \bar{b}(t) + J(t) * \bar{b}(t) \quad (4)$$

式中 “*” 表示相关运算。对于在 BF 中剔除的干扰信号, 因与发送信号正交, 则有 $J * \bar{b}(t) = 0$, 否则, $J * \bar{b}(t) \neq 0$, 该部分干扰即是未被剔除干扰, 接收时被扩频到 BF 所占频谱范围。此时, 若采用正交调制, 则 $\alpha = 1$, 式(2)修正为

$$BER = Q\left(\sqrt{E_b / (N_0 + J_u / B_{BF})}\right) \quad (5)$$

J_u 是 BF 频带 B_{BF} 内的未剔除干扰, B_{BF} 即是 BF 中非零频点频谱。

因此, 在不存在无干扰频谱或环境干扰不能完全剔除时, 系统误码率修正为

$$BER = Q\left(\sqrt{E_b / \left(N_0 + \sum_{i=N_{Jm}+1}^{N_J} J_i / \left(B - \sum_{i=1}^{N_{Jm}} B_{J(i)}\right)\right)}\right) \quad (6)$$

N_J 是干扰总数, 其中 $(1, \dots, N_{Jm})$ 是剔除掉的干扰的序号, $(N_{Jm} + 1, \dots, N_J)$ 是未剔除的干扰, 即残余干扰的序号; $B_{J(i)}$ 是第 i 个干扰所占频谱。

由式(6)可知, 为使系统性能更优, BER 应尽量小, 所以 BF 应满足以下条件: (1) 未剔除干扰应越小且越少越好; (2) $B(u)$ 的频谱 B_{BF} 应越宽越好。

即干扰 $N_{Jm} (N_{Jm} \in [1, \dots, N_J])$ 被剔除后, 应有以下结果:

$$W_J = \min\left(\sum_{i=N_{Jm}+1}^{N_J} J_i / B_{BF}\right) \text{ 及 } B_{BF} = \max\left(B - \sum_{i=1}^{N_{Jm}} B_{J(i)}\right) \quad (7)$$

W_J 是未剔除干扰的谱密度, B 是 TDCS 系统的总工作频带宽度。

因此在产生 $B(u)$ 时, 干扰能量越集中, 越有利于提高估计精度、减小频谱占用带宽。

基函数非零部分与估计频带之比可衡量信号的抗剩余干扰的能力, 其定义为

$$NZO = B_{BF} / B$$

NZO 越大, 则非零部分越宽, 则抗剩余干扰能力越强。

2.3 环境干扰估计

在 TDCS 系统中可采用的干扰估计方法有傅里叶变换 (FT), 小波变换 (WT), 自回归 (AR), FRFT 等, 而其中 FRFT

由于具有良好的非平稳干扰的估计性能而受到越来越多的重视。因此本研究采用 RAT+FRFT+IFRFT 进行环境干扰估计, 首先通过 RAT 变换得到 chirp 信号的调频率, 然后通过 chirp 信号的调频率与分数阶旋转角度对应关系求出旋转角度 α , 进而在 α 角度上进行 FRFT 变换, 从而避免了 FRFT 在整个分数阶域上的扫描, 降低了计算复杂度。

根据文献[4], 可以求得已知信号的 RAT 峰值 η_{\max} 与 chirp 信号的幅度有如下关系:

$$\eta_{\max} = A^2 N^2 / 2 \quad (8)$$

A 是 chirp 信号的幅度, N 是样点数。因此可以通过式 (8) 求得信号的幅度, 并且可以通过确定峰值所在的位置, 得到调频率 \hat{g}_0 , 所以可以得到分数阶傅里叶变换的角度为

$$a = 2 \arccot(-\hat{g}_0) / \pi \quad (9)$$

进而求出该角度的 FRFT 变换, 然后在分数阶域 u_a 上搜索出现的最大值的 u_{a0} 的坐标, 便可估计出 chirp 信号的初始频率 \hat{f}_0 为

$$\hat{f}_0 = u_{a0} \csc(a\pi/2) \quad (10)$$

对已知 FRFT 的 $X_\alpha(u)$, 经 IFRFT, 可得相应的时域表示。IFRFT 变换的定义为

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X_\alpha(u) B_{-\alpha}(t, u) du \quad (11)$$

2.4 基函数生成中的干扰逐次剔除

根据式(7)可知, BF 的设计应使得所包含的环境干扰最少。

干扰剔除主要考虑以下几种干扰: 单音、单线性调频、多线性调频等典型的平稳与非平稳干扰。

采用 RAT+FRFT 变换, 对环境采样 $A(u)$ 进行迭代干扰消除、估计, 避免强干扰对弱干扰的屏蔽影响。环境干扰估计、各干扰对应子基函数的产生及系统基函数的生成原理如图 1 所示。

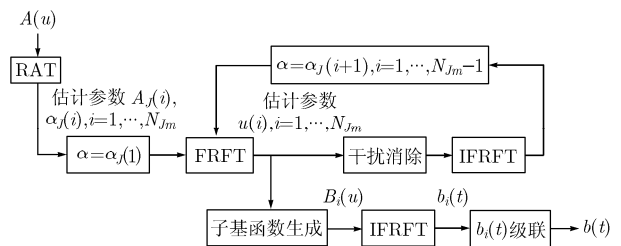


图 1 环境干扰估计、各干扰对应子基函数的产生及系统基函数的生成原理

由图 1 可见, 环境采样 $A(u)$ 经 RAT 变换, 得到线性调频类非平稳干扰 J_i 的变换角度 $\alpha_j(i)$ 及幅值 $A_j(i)$, 按照 $A_j(i)$ 由大到小, 以 $\alpha_j(i)$ 为变换角对环境采样进行逐次 FRFT 变换, 得到干扰 J_i 在 u 域相应的位置 $u(i)$; 根据得到的估计结果, 生成相应的子基函数, 并按下面将介绍的 BF 带宽优化的方法进行优化, 得到对应于干扰 J_i 的子基函数

$B_i(u)$, 经 IFRFT 变换后, 得到相应的时域表示 $b_i(t)$; 对经 FRFT 变换后的环境干扰, 进行干扰消除, 去掉其中的已估计干扰 J_i , 再进行 IFRFT 变换, 并更新变换角度 $\alpha = \alpha_{J_i} \cdot (i + 1)$, 重新进行 FRFT, 以完成下一干扰的估计; 依此方法, 按照干扰由强到弱的次序, 逐次得到各干扰的参数及生成相应的时域子基函数 $b_i(t)$, $i = 1, \dots, N_{J_m}$; $b_i(t)$ 级联后得到系统的时域基函数 $b(t)$:

$$b(t) = b_1(t) \otimes b_2(t) \otimes \dots \otimes b_{N_{J_m}}(t) \quad (12)$$

即基函数为各 J_i 对应的基函数的卷积。由于 $b_i(t)$ 与 J_i 的正交, 保证了 $b(t)$ 与 J_i ($i = 1, \dots, N_{J_m}$) 的正交性。

3 仿真

3.1 干扰模型

仿真中的干扰包括单音, 单 chirp, 多 chirp, 跳频, 宽带等类型, 重点分析多 chirp 的消除及基函数带宽优化的性能。

线性调频是典型的非平稳信号。多 chirp 的表示形式为

$$J(t) = \sum_{i=0}^{N_j} A \exp(j(2\pi f_0(i)t + \pi g_0(i)t^2)) \quad (13)$$

$i = 0$ 时是单 chirp 信号; f_0 为初始频率, g_0 是调频率, $g_0 = 0$ 时为单音, 是 chirp 信号的特例, 所以, 可剔除的非平稳干扰可表示成式(13)线性调频的统一形式。

仿真中假定 chirp 干扰 $J_a(t)$, $J_b(t)$, $J_c(t)$ 的初始频率 $f_{a0} = 1000\text{Hz}$; $f_{b0} = 500\text{Hz}$; $f_{c0} = 200\text{Hz}$, 归一化调频率分别为 $g_a = 0.3, g_b = 1, g_c = 0.1$, 采样频率为 4096 Hz, 信号采样点数为 4096; 加性高斯白噪声(AWGN) $n(t)$ 为 0dB; 调制方式为反极性调制; 采用跳频干扰为不可剔除干扰。

3.2 TDCS 系统误码率性能仿真

(1)噪声强度不同、干扰强度不变时的性能 环境干扰为单音, 单音+单 chirp 干扰, 干扰/噪声=10dB。在不同信噪比下的性能仿真如图 2 所示。

由图 2 可见, 采用所提方法, 单音或单音+单 chirp 干扰的剔除效果很好, 与无干扰理论情形下的性能非常接近。双 chirp 干扰下的系统性能等同于单音+单 chirp 干扰下的性能, 未再给出仿真结果。

(2)噪声强度不变、干扰强度不同时的性能 环境干扰为双 chirp+跳频干扰; chirp 干扰强度不变, chirp 干扰功率/噪声=10dB; 跳频干扰功率与信号能量之比在 0-10dB 范围内变化; 信号强度不变, SNR=7dB, 此时, 由于采用反极性调制, $\alpha = 2$, 根据式(2)可知, BER=0.00079; 基函数生成时分别采用所提干扰剔除方法及固定门限判决方法。固定门限判决时的判决门限 1 为最大值的 10%, 判决门限 2 为最大值的 20%。不同仿真方法时的仿真结果如图 3 所示。

跳频等非剔除或残余干扰依靠基函数的扩频功能加以抵抗, 基函数带宽越宽, 抗残余干扰能力越强。图 3 中门限 1 下 NZO $\approx 90\%$, 门限 2 下 NZO $\approx 80\%$ 。与直接序列扩频

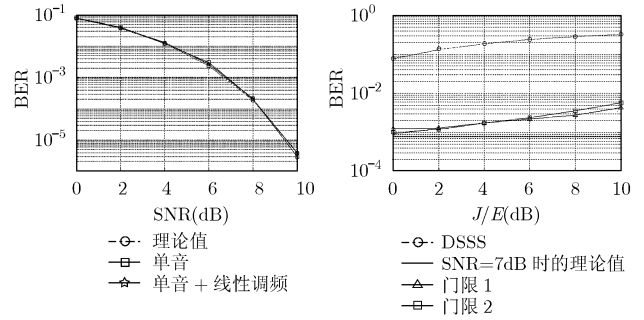


图 2 噪声强度不同、干扰强度不变时的性能

图 3 双 chirp+跳频干扰下的性能仿真

系统(DSSS)相比, 在相同干扰情况下, TDCS 系统的 BER 降低约 2 个数量级, 在复杂环境干扰下的性能明显提高。

4 结束语

理论分析表明, TDCS 系统的抗干扰能力等性能决定于所生成的基函数, 基函数中环境干扰谱剔除得越干净、所生成的基函数带宽越宽, TDCS 系统性能越好; 采用 RAT+FRFT+IFRFT 的变换方法, 可实现环境干扰的准确估计, 为基函数环境干扰谱的剔除提供了必要的前提条件; 采用逐次干扰估计与消除的方法, 可准确得到环境干扰参数; 根据环境谱估计得到的干扰参数可生成与各干扰相对应的子基函数, 各子基函数级联后, 可得到与各干扰相正交、无干扰谱的系统基函数。采用所提方法, TDCS 系统具有良好的抗干扰性能, 误码率较 DSSS 系统明显降低, 适合于非平稳多干扰复杂环境下的应用, 扩大了 TDCS 系统在复杂干扰环境中的应用范围。

参考文献

- [1] Chakravarthy V, Nunez A S, and Stephens J P. TDCS, OFDM, and MC-CDMA:A brief tutorial[J]. *IEEE Radio Communications*, 2005, 43(9): 511-516.
- [2] Roberts M L, Temple M A, and Raines R A. Initial acquisition performance of a transform domain communication system: Modeling and simulation results[C]. MILCOM 2000, Los Angeles, Oct. 2000 Vol. 2: 1119-1123.
- [3] John P G 著, 张力军等译. 数字通信[M]. (第 4 版), 北京: 电子工业出版社, 2003: 254-257 .
- [4] 赵兴浩, 陶然, 周思永, 王越. 基于Radon+Ambiguity变换和分数阶傅里叶变换的chirp信号检测及多参数估计[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(3): 271-274.

王传丹: 男, 1964年生, 副教授, 主要从事移动通信、抗干扰技术等方面的研究。
 张忠培: 男, 1967年生, 副教授, 博士生导师, 主要从事移动通信、抗干扰、编码技术等方面的研究。
 李少谦: 男, 1958年生, 教授, 博士生导师, 主要从事移动通信、抗干扰技术等方面的研究。