

变换域通信系统及抗干扰性能仿真

任清华, 李正刚

(空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077)

摘要:基于变换域通信系统(TDCS)收发两端联合干扰感知、自主躲避干扰的基本思想,首先分析了TDCS发射机和接收机的工作原理,在给出了采用对称频谱的TDCS的发射和接收基函数模型之后,通过数学推导得到了TDCS采用MPSK调制时的系统抗干扰误比特率性能公式;其次分析了TDCS的抗干扰机理,发现收发基函数不一致时系统性能将遭受两个方面的损失:一是发射功率损失;二是接收了额外的白噪声和干扰功率;最后,基于MATLAB,仿真了基函数不一致及单音、多音、窄带干扰条件下TDCS的抗干扰性能,仿真结果与理论结果一致;通过仿真比较发现:相同工作带宽下的TDCS抗单音、多音、窄带干扰的性能要好于直接序列扩频系统。

关键词:变换域通信系统;直扩;抗干扰

中图分类号: TN92 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009 - 3516(2009)02 - 0086 - 05

TDCS具有对环境感知的能力,具有良好的抗干扰、抗截获性能,受到了越来越广泛的关注。美国空军从上世纪九十年代中期开始对TDCS展开研究,目前该项目属于美军电子战计划的一部分^[1-2]。国内的西北工业大学、电子科技大学、南京理工大学等高校也相继对TDCS进行了相关研究,其中电子科技大学进一步拓展了TDCS在认知无线电领域的应用研究^[3-5]。TDCS有两个基本特点:一是收发两端在频域联合设计传输信号;二是传输信号的功率谱平坦非连续且与干扰信号正交^[6]。通过频域联合设计,TDCS具有了自主识别并躲避干扰的能力。

1 TDCS的基本原理

TDCS发射机首先进行空间电磁频谱估计,然后执行干扰门限检测,识别并标记频谱,形成以 $\mathbf{0}$ 表示干扰、 $\mathbf{1}$ 表示空闲的矢量,记为 $\mathbf{A}(m)$ 。同时,随机相位生成器合成与用户相关的复随机矢量,记为 $e^{j\phi(m)}$ 。矢量 $\mathbf{A}(m)$ 与矢量 $e^{j\phi(m)}$ 作对应元素相乘,形成新的矢量 $\mathbf{B}_k(m)$,该矢量经功率调整得到矢量 $\mathbf{B}(m)$ 。至此, $\mathbf{B}(m)$ 与干扰信号频域矢量正交。经IFFT变换后得到时域离散信号 $\mathbf{b}(n)$,然后存储起来作为CCSK、BPSK等在时域完成调制的调制方式的发射基函数。在调制单元, $\mathbf{b}(n)$ 首先被按照不同的调制方式合成待发发射符号集,然后输入比特数据流映射为符号完成调制,调制符号经数模转换、射频功率放大后由天线辐射出去。

TDCS接收机采用与发射机相同的技术估计电磁频谱,得到矢量 $\mathbf{A}(m)$,同时接收机生成与发射机同步的随机相位矢量 $e^{j\phi(m)}$,两者对应元素相乘,做IDFT和共轭运算,得到信号矢量 $\mathbf{c}(n)$,对其按照约定的调制方式进行波形合成以得到解调基函数 $\{\mathbf{c}_k(n) | k=0, 1, \dots, K-1\}$ 。接收到的采样信号 $\mathbf{r}(n)$ 分别和 $\mathbf{c}_k(n)$ 作相关运算,得到结果 $\{\mathbf{z}_k | k=0, 1, \dots, K-1\}$,找出其中最大值的下标 k ,根据 $\mathbf{c}_k(n)$ 逆映射出其所代表的数据符号 \tilde{d}_k 。

* 收稿日期:2008-07-03

基金项目:国家“863”创新基金资助项目(2007AAXX130)

作者简介:任清华(1967-),男,浙江三门人,教授,主要从事军事航空通信导航研究。

E-mail:Lizhg.02024@163.com

2 TDCS 信号数学模型

2.1 TDCS 发射基函数数学模型

TDCS 发射机通过环境感知获得频域合成信号的幅度谱,通过伪随机相位生成器获得相位谱,然后在时域完成数据调制。然而,通过离散傅立叶变换时域-频域的对偶性,可以知道数据调制同样可以在频域实现。通过引入信号空间概念,TDCS 的调制可以扩展到 MPSK、QAM 调制实现。当 TDCS 采用对称频谱时,其低通等效信号的离散形式^[7-8]可表示为:

$$s_k(n) = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} \alpha A_m \cos(2\pi \frac{mn}{N_F} + \phi_m + \theta_{k,m}), n = 0, 1, \dots, N_F - 1 \quad (1)$$

式中: N_F 为 IFFT 长度; $M = N_F/2$; A_m 为频谱标记矢量的第 m 个元素,且有 $A_0 = 0$ 和 $A_m = 0$; ϕ_m 为随机相位矢量的第 m 个元素; $\theta_{k,m}$ 为第 k 个符号的第 m 个频谱的相位。

通过 $\theta_{k,m}$ 的不同取值,可以实现 TDCS 的不同调制。比如,在 MPSK 中, $\theta_{k,m} = e^{j\frac{2\pi k}{M_{ary}}}$ | $k=0,1,\dots,M_{ary}-1$,在 QAM 中, $\theta_{k,m} = a + ib$ | $k=0,1,\dots,M_{ary}-1$,在多元 CCSK 中, $\theta_{k,m} = e^{j\frac{2\pi mk}{M_{ary}}}$ | $k=0,1,\dots,M_{ary}-1$ 。

2.2 TDCS 接收基函数数学模型

TDCS 接收机采用与发射机相同的方法采样并估计电磁环境,生成同步的随机相位谱。接收基函数的合成则对应于发射机采用的调制方式,如果发射机采用多元 CCSK,则接收基函数与发射基函数一致,而采用 MPSK、QAM 等调制时只需要 2 个正交基函数,分别为:

$$c_c(n) = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^M A_m \cos(2\pi \frac{mn}{N_F} + \phi_m) \quad ; \quad c_d(n) = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^M A_m \sin(2\pi \frac{mn}{N_F} + \phi_m) \quad (2)$$

3 TDCS 抗干扰机理分析

TDCS 识别并躲避干扰的机理在于:发射基函数和接收基函数根据通信环境的变化而自适应生成,能自动地适应复杂多变的通信环境,不会对正在工作的其他用户造成影响或影响很小。影响 TDCS 性能的关键在于收发基函数的一致性 & 干扰信号的时变性。在存在干扰的环境下,在接收端有:

$$r(n) = s_k(n) + \mathbf{n}(n) + \mathbf{j}(n) \quad (3)$$

式中 $\mathbf{n}(n)$ $\mathbf{j}(n)$ 分别代表高斯白噪声和外界干扰采样信号且相互独立。与 TDCS 信号对应,干扰信号通常建模为时域离散信号^[7-8]:

$$\mathbf{j}(n) = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m \cos(2\pi \frac{mn}{N_F} + \theta_m) \quad (4)$$

式中: J_m 为频谱幅度; θ_m 为在 $[0, 2\pi]$ 上均匀分布的随机谱相位,其频谱是对称的。

TDCS 采用 MPSK 调制($\theta_{k,m} = \theta_k, \forall m$),则解调基函数为式(2),得到复信号输出:

$$\tilde{r} = \sum_{n=0}^{N_F-1} r(n) c_c(n) + j \sum_{n=0}^{N_F-1} r(n) c_d(n) \quad (5)$$

其中复信号分量、复噪声分量、复干扰信号分量分别为^[9-10]:

$$\begin{cases} \tilde{s} = \frac{2}{N_F} \cos(\theta_k) \sum_{m=0}^{M-1} A_m B_m + j \frac{2}{N_F} \sin(\theta_k) \sum_{m=0}^{M-1} A_m B_m \\ \tilde{n} = \sum_{n=0}^{N_F-1} n(n) c_c(n) + j \sum_{n=0}^{N_F-1} n(n) c_d(n) \\ \tilde{j} = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m B_m \cos(\theta_m - \phi_m) + j \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m B_m \sin(\theta_m - \phi_m) \end{cases} \quad (6)$$

噪声功率、信号平均功率、干扰平均功率以及信干噪比分别为:

$$E(\tilde{n}\tilde{n}^*) = E(|\tilde{n}|^2) = \sum_{n=0}^{N_F-1} \sum_{v=0}^{N_F-1} E[n(n)n(v)] c_c(v) c_c(n) + \sum_{n=0}^{N_F-1} \sum_{v=0}^{N_F-1} E[n(n)n(v)] c_d(n) c_d(v) =$$

$$\sum_{n=0}^{N_F-1} \frac{N_0}{2} c_c(n)c_c(n) + \sum_{n=0}^{N_F-1} \frac{N_0}{2} c_c(n)c_c(n) = \frac{2}{N_F} N_0 \sum_{m=0}^{M-1} B_m B_m \tag{7}$$

$$E(|\tilde{s}|^2) = \frac{4}{N_F^2} [\cos(\theta_k)^2 + \sin(\theta_k)^2] \left(\sum_{m=0}^{M-1} B_m B_m \right)^2 = \frac{4}{N_F^2} \alpha^2 \left(\sum_{m=0}^{M-1} A_m B_m \right)^2 \tag{8}$$

$$E(|\tilde{j}|^2) = E(|j|^2) = \frac{4}{N_F^2} E \left[\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{M-1} J_m B_m J_v B_v \cos(\theta_m - \phi_m) \cos(\theta_v - \phi_v) \right] + \frac{4}{N_F^2} E \left[\sum_{m=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{M-1} J_m B_m J_v B_v \sin(\theta_m - \phi_m) \sin(\theta_v - \phi_v) \right] = \frac{4}{N_F^2} \sum_{m=0}^{M-1} J_m^2 B(m) \tag{9}$$

$$\text{SINR} = \frac{E(|\tilde{s}|^2)}{E(|\tilde{n}|^2) + E(|\tilde{j}|^2)} = \frac{\frac{2}{N_F} \alpha^2 \left(\sum_{m=0}^{M-1} A_m B_m \right)^2}{N_0 \sum_{m=0}^{M-1} B_m B_m + \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m^2 B_m} \tag{10}$$

当以高斯分布近似 \tilde{j} 时可得到采用 MPSK 调制时的 TDCS 性能公式:

$$P_b = \frac{1}{\log_2 M_{\text{ary}}} \left\{ 1 - \text{erf} \left[\sin \left(\frac{\pi}{M_{\text{ary}}} \right) \sqrt{\frac{\frac{2}{N_F} \alpha^2 \left(\sum_{m=0}^{M-1} A_m B_m \right)^2}{N_0 \sum_{m=0}^{M-1} B_m B_m + \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m^2 B_m}} \right] \right\} \tag{11}$$

4 抗干扰性能仿真验证

仿真参数:TDCS 采用对称谱, $M = 32$, IFFT 长度 $N_F = 64$, 直扩扩频因子 $L_c = 64$, $M_{\text{ary}} = 4$ 。假定 TDCS 已实现同步, 干扰检测门限简单设定为 1。仿真采用的窄带信号的频谱幅度取值见表 1^[7]。

表 1 干扰信号的对称频谱取值

Tab. 1 The values of jamming signal's symmetrical spectrum

| 幅度 | 幅值 |
|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|----------|---------|
| J_0 | 0.000 0 | J_1 | 0.303 4 | J_2 | 0.414 2 | J_3 | 0.636 2 | J_4 | 0.088 8 | J_5 | 2.021 5 |
| J_6 | 3.475 5 | J_7 | 3.879 9 | J_8 | 3.681 1 | J_9 | 2.968 3 | J_{10} | 1.919 4 | J_{11} | 1.227 9 |
| J_{12} | 0.869 6 | J_{13} | 0.679 4 | J_{14} | 0.566 7 | J_{15} | 0.492 8 | J_{16} | 0.440 6 | J_{17} | 0.401 7 |
| J_{18} | 0.371 6 | J_{19} | 0.347 7 | J_{20} | 0.328 4 | J_{21} | 0.312 5 | J_{22} | 0.299 4 | J_{23} | 0.288 4 |
| J_{24} | 0.279 3 | J_{25} | 0.271 8 | J_{26} | 0.265 6 | J_{27} | 0.260 5 | J_{28} | 0.256 6 | J_{29} | 0.253 5 |
| J_{30} | 0.251 4 | J_{31} | 0.250 2 | J_{32} | 0.000 0 | | | | | | |

由前面的分析可知,TDCS 的性能与收发两端基函数的一致性 & 干扰的时变性有关, 当干扰变化很小或不变时, 可以考虑 2 种典型情况以便于分析和仿真:

1) 全频谱发射、部分频谱接收。根据式(10), 此时有:

$$\text{SINR} = \frac{E_s(1 + \beta)}{N_0 + N_i} \tag{12}$$

式中: $\beta = \left(\sum_{m=0}^{M-1} B_m B_m - \sum_{m=0}^{M-1} A_m A_m \right) / \sum_{m=0}^{M-1} A_m A_m$; $E_s = \frac{2}{N_F} \alpha^2 \sum_{m=0}^{M-1} A_m A_m$; $N_i = \frac{2}{N_F} \sum_{m=0}^{M-1} J_m^2 B_m$ 。

2) 部分频谱发射, 全频谱接收。此时有:

$$\text{SINR} = \frac{E_s}{N_0(1 + \beta) + N_i} \tag{13}$$

式中 $N_i = 2 \sum_{m=0}^{M-1} J_m^2 B_m / N_F \sum_{m=0}^{M-1} A_m A_m$ 。

由式(12)和式(13)可以看出, 收发基函数不一致时, 系统性能将遭受到 2 个方面的损失: 一是发射功率损失; 二是接收了额外的白噪声和干扰功率。图 1、图 2 分别是窄带干扰下(信干比: $J/S = 3.14$ dB) 对应于 2 种情况的理论和仿真结果。由于基函数的不一致 ($|\beta| \neq 0$) 导致了系统性能的下降。

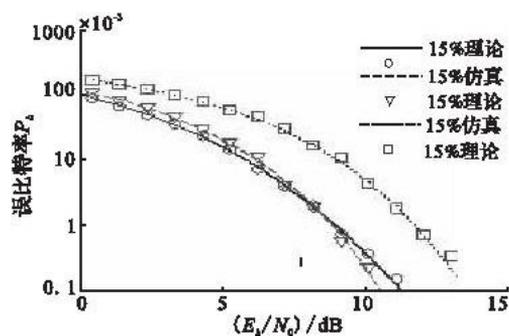


图1 全频谱发射、部分频谱接收时的系统性能
Fig.1 The performance of system using all spectrum transmitting and partial spectrum receiving

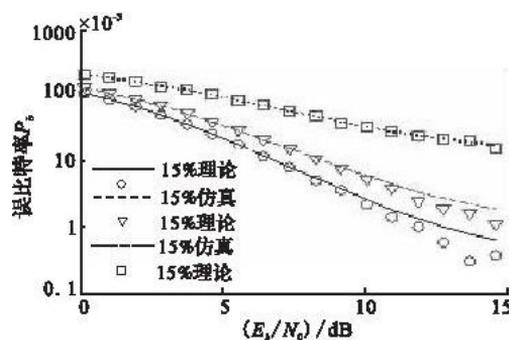


图2 部分谱发射、全频谱接收时的系统性能
Fig.2 The performance of system using partial spectrum transmitting and all spectrum receiving

图3是收发基函数一致且信噪比固定($E_b/N_0 = 8$ dB)时TDCS在单音、多音、窄带干扰下的性能仿真结果。作为参考,给出了直扩在窄带干扰下的性能仿真结果。可以看到TDCS完全躲开了单音、多音干扰,而窄带干扰下,受到干扰门限的影响系统性能随干扰功率的增大而逐步变差,但其性能比直扩要好。

5 结束语

式(11)完整表征了TDCS的抗干扰机制。在检测判决处的信号能量与链路两端基函数的交集有关,而噪声和干扰主要与接收基函数有关。最后通过仿真验证了该式,同时也证明TDCS通过链路两端联合设计传输信号,获得了较直扩要好的抗单音、多音和窄带干扰的能力。

参考文献:

- [1] Radcliffe, Rodney A. Design and Simulation of A Transform Domain Communication System [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1996.
- [2] Radcliffe Rodney A, Gerace Gerald C. Design and Simulation of A Transform Domain Communication System [C]//IEEE MILCOM 1997 Proceedings. Dallas: IEEE, 1997: 586-589.
- [3] 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. Transform Domain Communication System: Design, Model, Simulation and Research [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [4] Han Chuan, Wang Jun, Gong Shuping, et al. Detection and Performance of the OFDM-Based Transform Domain Communication System [C]//ICCCAS 2006. Guilin: [s. n.], 2006: 1332-1336.
- [5] 许俊峰. 变换域通信与扩频通信抗干扰性能比较 [D]. 南京: 南京理工大学, 2007.
XU Junfeng. The Performance Comparison of Anti-jamming between Transform Domain Communication and Spreads Spectrum Communication [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2007. (in Chinese)
- [6] 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): 11-16.
- [7] Nunez, Abel S. Interference Suppression in Multiple Access Communications Using M-ary Phase Shift Keying Generated Using Spectral Encoding [D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 2004.
- [8] Roberts M L, Temple M A, Mills R F, et al. Interference Suppression Characterization for Spectrally Modulated, Spectrally Encoded Signals [J]. IEEE Electronic Letters, 2006, 42(19): 1103-1104.
- [9] 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, 2008.
LI Zhenggang. The Research of A Long-Distance Aviation Transform Domain Communication System under Complex Electro-

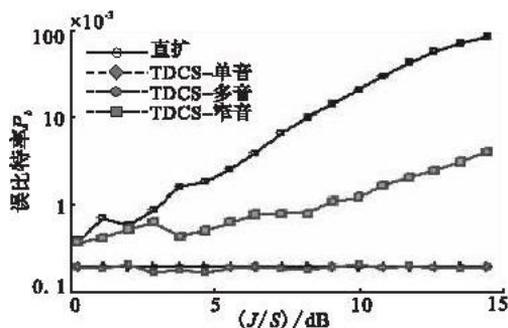


图3 单音、多音、窄带干扰下的系统性能
Fig.3 The performance of system under single-tone, multi-tone, narrow-band interference

magnetic Environment [D]. Xi'an: Air Force Engineering University, 2008. (in Chinese)

- [10] Vasu D Chakravarthy. Evaluation of Overlay/Underlay Waveform via SD – SMSE Framework for Enhancing Spectrum Efficiency [D]. Ohio: Wright State University, 2008.

(编辑:徐楠楠)

Transform Domain Communication System and Its Performance Simulation of Interference Suppression

REN Qing – hua, LI Zheng – gang

(Telecommunication Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China)

Abstract: First, the operating principles of TDCS transmitter and receiver are analyzed based on the basic idea that the system can avoid interference by cooperative sense of transceiver. The Average Bit Error Probability of system in Interference Suppression with MPSK modulation is derived mathematically after the transmitting and receiving mathematical model with symmetrical spectrum was given out. Then, the mechanism of Interference Suppression in TDCS is analyzed and it is found that the system performance will suffer from loss in two aspects: transmitting power loss and receiving additional white noise and interference power. Finally, based on MATLAB, the performance of interference suppression is simulated under conditions of fundamental functions mismatch, single tone, multi – tone and partial spectrum band interfering. The results of simulation and the theoretical results are identical, and the performance of TDCS are better than Direct Sequence Spread Spectrum system in single tone, multi – tone and partial spectrum band interfering.

Key words: transform domain communication systems; direct sequence spread spectrum; interference suppression

本刊优秀论文评比结果

根据科技部信息所公布的 2007 年度科技期刊他引结果,本刊评选出优秀论文 25 篇,现对作者予以表彰,并欢迎继续向本刊投稿。

| 等级 | 论文题目 | 论文作者 |
|----|------------------------------|---------------|
| 1 | 网络流量监测技术及性能分析 | 杨策,张永智,庞正社 |
| 1 | 基于蚁群算法的无人机航路规划 | 柳长安,李为吉,王和平 |
| 1 | 并行测试技术综述 | 肖明清,朱小平,夏锐 |
| 2 | 多机协同空战目标分配算法 | 程红斌,张凤鸣,张晓丰 |
| 2 | 基于模糊 AHP 的道路优选评价方法研究 | 高虹霓,杨建军,曹泽阳 |
| 2 | 两类含非线性传染率的传染病模型的定性分析 | 李建全,王拉娣,杨友社 |
| 2 | 攻击机对地攻击的 WSEIAC 模型研究 | 郑海,黄树采,刘晖 |
| 2 | 多卫星 – 地面站系统的 Petri 网模型研究 | 王远振,赵坚,聂成 |
| 3 | 基于 PC/104 的实时嵌入式 Linux 系统开发 | 冯敏,樊晓光,褚文奎 |
| 3 | 飞机攻防对抗作战效能仿真分析方法 | 高晓光,赵晓睿,罗继勋 |
| 3 | 一种组合参数的语音信号清/浊音判决方法 | 郭英,李雪娇,李宏伟 |
| 3 | 超短脉冲激光及其应用 | 侯洵 |
| 3 | Visual Prolog 的回溯机制分析 | 雷英杰,王涛,赵晔,王建勋 |
| 3 | Hopfield 网络在武器装备评估及分类中的应用 | 李飞,谷奇平 |
| 3 | 多平台多传感器多源信息融合中的时空对准研究 | 李教,敬忠良,王安 |
| 3 | Kohonen 神经网络在雷达多目标分选中的应用 | 林志远,刘刚,戴国宪 |
| 3 | 经纬度坐标变换及其在防空 C3I 系统中的应用 | 刘进忙,张晓刚 |
| 3 | 支持向量机理论及其应用 | 卢虎,李彦,肖颖 |
| 3 | 灰色关联分析中分辨系数的选取 | 申卯兴,薛西锋,张小水 |
| 3 | 动网格生成技术 | 史忠军,徐敏,陈士槽 |
| 3 | 预拉伸铝合金板 7075T7351 内部残余应力分布测试 | 王树宏,马康民,马俊 |
| 3 | 一种改进动态克隆选择免疫算法在入侵检测中的应用 | 许春,李涛,刘孙俊,杨频等 |
| 3 | 基于突变理论的维修保障系统效能评估研究 | 杨懿,武昌,齐胜利 |
| 3 | 基于 RUP 过程的并行测试建模分析与设计 | 朱小平,肖明清,夏锐 |
| 3 | 变论域自适应模糊 PID 方法的研究和仿真 | 朱岩,郭军平 |