

doi:10.3969/j.issn.1001-893x.2013.07.028

变换域通信系统研究现状与发展*

王杰**,毛玉泉,张衡阳,郭尧,李波

(空军工程大学 信息与导航学院,西安 710077)

摘要:回顾了变换域通信系统(TDCS)的发展历程,介绍了 TDCS 的基本原理及关键技术,分析了其独特的抗干扰方式,并揭示了 TDCS 具有极强的抗干扰能力、较高频谱利用率和低截获概率/低检测概率(LPI/LPD)特性的特点。对目前 TDCS 投入实际应用存在的难点问题进行了分析和总结,最后展望了其良好的应用前景,为 TDCS 的深入研究指明了方向。

关键词:变换域通信系统;认知无线电;谱估计;抗干扰;基函数

中图分类号:TN914.42 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-893X(2013)07-0966-07

Research Status and Development of Transform Domain Communication System

WANG Jie, MAO Yu-quan, ZHANG Heng-yang, GUO Yao, LI Bo

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

Abstract: This paper reviews the development course of Transform Domain Communication System(TDCS), introduces basic principle and key technology of TDCS, analyzes its unique anti-jamming way, and illustrates the strong anti-interference ability, high spectrum efficiency and the Low Probability of Intercept/Low Probability Detect(LPI/LPD) characteristics of TDCS. It also summarizes the research directions and open problems in TDCS area, and finally prospects the good prospect of TDCS, which points out the direction for further study of TDCS.

Key words: TDCS; cognitive radio; spectrum estimation; anti-interference; basis function

1 引言

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是基于变换域处理技术和扩频技术发展起来的一项新技术,其以独特的通信抗干扰模式而受到国内外广泛的关注和研究。它以“从源头治理”、“见缝插针”的思想为指导,分别在收发端变换域内设计基本调制波形来实现“主动式”的强抗干扰能力^[1]和较高频谱利用率;并且引入随机相位的概念使系统具有低截获概率/低检测概率(Low Probability of Intercept/Low Probability of Detect, LPI/

LPD)性能和多址接入能力,为认知无线电收发机设计提供了一种潜在的候选技术方案。

TDCS 的基本思想是 German 在 1988 年发表的一篇文章^[2]中提出的,他针对直扩和跳频存在的不足而分析了一个在接收端与发射端均采用变换域处理的系统,开启了变换域调制波形设计的先河。1991 年, Harris 公司的 Andren 申请了一项专利^[3],该项专利描述了一个与 German 提出的技术相类似的低截获概率(Low Probability of Intercept, LPI)通信系统,但并没有提供相关理论及其技术实现方案。1997 年,美国空军针对军用飞机进入敌方领空执行任务时面对极强的电子干扰问题,采用了 Andren 提

* 收稿日期:2013-01-05;修回日期:2013-04-15 Received date:2013-01-05;Revised date:2013-04-15

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)

Foundation Item: The National Natural Science Foundation of China (No. 61202490); The Natural Science Foundation of Shaanxi Province (2010JQ8010)

** 通讯作者:xdwj061216@126.com Corresponding author:xdwj061216@126.com

出的对通信电磁环境采样、波形生成的收发机框架和 German 基于环境采样值产生基本调制波形的思想构架^[4],即 TDCS 的雏形。由于这项技术具有明显的军事效益,2001 年在美国国防部关于电子战发展计划的报告中也有对 TDCS 技术发展状况的介绍^[5]。而 V. Chakravarthy 在 2005 年国际无线通信与网络会议上提出将 TDCS 作为一种认知无线电技术的收发机候选方案^[6]。之后,国内外对 TDCS 掀起了新的研究思潮,国外主要以美国空军技术学院和空军技术研究实验室为代表^[7-9],国内最早在 2003 年才有 TDCS 的相关文献^[10],随后逐渐成为研究的热点。

TDCS 是通过在收发两端的变换域内联合设计基函数(Basis Fncn, BF)来把有用信号的能量放到没有干扰或干扰很小的频段,即调制信息后的传输信号不包含干扰频段的频率分量,实现主动地抵抗干扰的影响。另外,随着随机相位的引入,TDCS 的 BF 具有类似于白噪声的性质,使 TDCS 有着很强的抗干扰性能的同时具有 LPI/LPD 特性。TDCS 诸多优良特性正好为当今无线通信急需解决的抗干扰问题、频谱利用率问题以及军事通信中射频隐身等问题提供了理论指导,为认知无线电技术提供了一种极具潜力的收发机候选方案,TDCS 的发展以及应用对无线通信领域意义重大,所以有必要对 TDCS 做一个全面的介绍。

2 TDCS 原理介绍

TDCS 发射机和接收机原理框图^[10]如图 1 和图 2 所示,它与传统通信系统最大的区别就是其基本调制波形的设计。首先通过对通信电磁环境采样进行频谱估计,确定通信环境中干扰存在的频段;其次,将估计得到的功率谱密度与一个选定的门限值相比较来确定整个工作频带中哪些部分已被干扰,哪些部分是“干净”的可以用于信息传输,然后将高于门限的频段的谱值设为 0,低于门限的频段的谱值设为 1,这样就得到一个由 0 和 1 构成的谱向量 \mathbf{A} ,它是一个理想的矩形谱;另外,为了实现 LPI/LPD 特性、采用 CSK 调制和实现多址接入技术,引入在 $[0, 2\pi]$ 均匀随机分布的伪随机相位矢量 $e^{j\phi_k}$ 与之前产生的谱向量 \mathbf{A} 对应相乘,得到与干扰频谱正交的基函数频域矢量 $\mathbf{A}_k e^{j\phi_k}$;最后,将矢量 $\mathbf{A}_k e^{j\phi_k}$ 作一定的幅度调整,然后经过逆变换就得到基函数的时域形式:

$$b(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k \mathbf{A}_k e^{j\phi_k} e^{j2\pi kn/N}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (1)$$

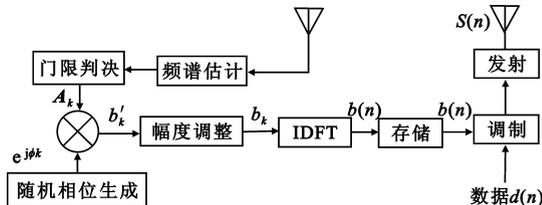


图 1 TDCS 发射机原理框图
Fig. 1 Transmitter schematics of TDCS

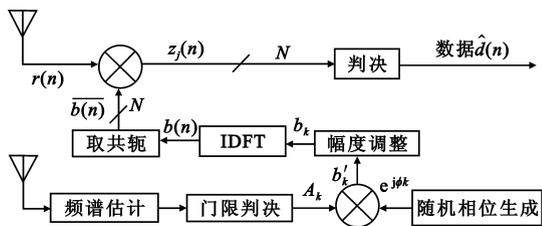


图 2 TDCS 接收机原理框图
Fig. 2 Receiver schematics of TDCS

最后将该基函数存储起来用以调制信息,调制后的波形经功放、天线发射出去,接收端通过同样的方法生成基函数用以相关接收并恢复出原始信号。

TDCS 具有如下特点:

(1)用于传输信息的调制波形是在变换域中设计生成的,它从“源头治理”的角度来主动地抵抗干扰对通信系统的影响,使传输波形的频谱与干扰信号的频谱在变换域内相互正交;

(2)TDCS 具有动态接入频谱的能力,其“见缝插针”式的通信方式能够有效利用频谱资源而不会对正在工作的其他用户造成影响或影响很小;

(3)TDCS 信号不使用传统的载波调制,而是使用一个类似于噪声的时域基函数进行数据调制,使通信系统具有 LPI 特性;

(4)TDCS 是一种宽带扩频通信系统,而且是“离散”扩频通信系统,干扰剔除后的剩余频段已不再连续,其利用这些离散的可用频段实现扩频抗干扰通信;

(5)TDCS 有较强的初始捕获能力,研究表明 TDCS 具有在较低的输入信噪比下达到较高的探测概率;

(6)TDCS 具有很好的多址性能,其使用 PN 序列来生成伪随机相位并最终生成基函数,而不同的用户使用同一个序列的不同码片产生不同的随机相位,从而生成不同的基函数,由于 TDCS 不同的基函

数之间又具有良好的正交性,因而 TDCS 具有很好的多址性能,具有广阔的应用前景。

3 TDCS 关键技术

TDCS 综合了变换域处理技术和扩频通信技术的优势,同时具有频谱认知的能力,能够主动且精准地定位和剔除干扰,具有极强的抗干扰性能、很高的频谱利用率和良好的 LPI/LPD 性能,为认知无线电收发机提供了一种候选方案。其良好的通信性能必须以变换域技术、干扰剔除技术、伪随机相位生成技术、调制解调技术和同步技术为基础,下面就其关键技术作简要介绍。

3.1 变换域技术

变换域处理技术是 TDCS 的灵魂,不同的干扰形式在不同变换域表现出不同的特点,选择合适的变换域技术能够实现最优的干扰剔除,现有的研究主要表现在傅里叶变换、小波变换、小波包变换、分数阶傅里叶变换等,下面将分别作简要介绍。

3.1.1 离散傅里叶变换

离散傅里叶变换 (Discrete Fourier transform, DFT) 是目前应用非常广泛的一种时频数字信号处理工具,且 TDCS 最初也是建立在 DFT 上发展起来的,其通过 DFT 频谱幅值来判断当前环境中存在干扰的区域或被占用的区域,并对该区域频点进行定位和剔除,具有简单直观、实现复杂度低、易于工程实现等优点。但是 DFT 是一种全局性变换,得到的是信号的整体频谱,因而无法表述信号的时频局部特性,而这种特性正是非平稳信号的最根本和最关键的性质,所以 DFT 在抵抗非平稳干扰时显得苍白无力。

3.1.2 离散小波变换

离散小波变换 (Discrete Wavelet Transformation, DWT) 是一种窗口大小 (即面积) 固定而形状可变的分析方法,其时间窗和频率窗都可以改变,实现了时-频窗口的自适应变化。在低频时,小波变换的时间分辨率较差而频率分辨率较高,而在高频时正好相反。这正符合低频信号变化缓慢而高频信号变化迅速的特点,在信号的时频分析中具有很好的性能。基于 DWT 的门限剔除有基于小波系数和基于子带两种方法,由于在一个小波子带内的小波系数是时间的函数,这等价于假设系统在每一个码元周期内与干扰同步,这种假设无法剔除不存在于整个采样间隔内的干扰和扫频干扰;基于子带的方法是对整

个子带进行门限剔除,也就是说整个子带被置为 0 或 1,由于干扰时间信息并未被使用,这种方法对同步没有要求,但是潜在的问题是子带的长度不同,每个子带采样数从高子带到低子带以 2 的指数下降,由于干扰能量可能出现在任何子带内,如果干扰出现在第一个子带内,且能量足以使该子带被置为 0,则一半的频谱资源被剔除;此外,由于小波变换也存在着能量泄露效应,某个子带内的干扰能量如果很高则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本不存在干扰的子带剔除掉。

3.1.3 离散小波包变换

离散小波包变换 (Discrete Wavelet Packet Transformation, DWPT) 是在 DWT 的基础上对其高频部进一步分解,弥补了 DWT 在高频部分频率分辨率低而有可能剔除过多频率资源的不足,其具有多分辨率分析能力和良好的时频局部化特性,实时消除干扰以及当干扰变化较快时能够迅速将窄带噪声定位在一定的频域范围内,从而能够更好地消除窄带噪声,但是仍然存在分解深度不易控制和对非平稳干扰的抵抗能力差等问题。

3.1.4 分数阶傅里叶变换

分数阶傅里叶变换 (Fractional Fourier Transform, FrFT) 是一种广义的傅里叶变换,可以理解为 chirp 基分解。其变换核实质上是一组初始频率为 $-ucsc\alpha$ 、复包络为 $\sqrt{(1-j\cot\alpha)/2\pi}e^{ju^2\cot\alpha/2}$ 和调频率为 $\cot\alpha$ ($\alpha = p\pi/2$) 的 chirp 信号。分数阶傅里叶域由该完备正交基所表征,通过改变旋转角度 α 便可以得到不同调频率的基。当 $\alpha = \pi/2$ 时,分数阶傅里叶变换就成了传统的傅里叶变换,分解基也由 chirp 信号变成了正交完备的三角函数系。如同单频正弦信号经过傅里叶变换就必然会在某个单频基上成为冲激函数,一旦要剔除的 chirp 信号与某组基的调频率吻合,那么该信号也就必然在该组基中的某个基上形成一个 σ 函数,而在别的基上则为零,这一点说明了 chirp 信号在分数阶傅里叶变换域上具有很好的时频聚焦性^[11]。针对线性调频 (Linear Frequency Modulation, LFM) 干扰,其在时、频域都具有较大的展宽,采用处理平稳信号的方法对其抑制往往得不到很好的效果,可以对 LFM 干扰信号在分数阶傅里叶域上进行精确剔除。

3.1.5 线性正则变换

线性正则变换 (Linear Canonical Transform, LCT) 是分数阶傅里叶变换的进一步推广,它具有 3 个自

由参数,与 DFT 的 0 个和 FrFT 的 1 个自由参数相比, LCT 在信号处理时更为灵活、强大。但是多参变量在带来灵活性、增强处理能力的同时,也造成了计算量增大、参变量选取复杂等不利因素。从 FFT、FrFT 等的发展历程来看,离散算法和简便易行的参变量选取原则是推广线性正则变换应用的必备条件,由于缺乏这两个基本条件,国内尚未见到有关线性正则变换的文献发表。但是, LCT 具有强大的信息分析与处理能力,尤其是对非平稳信号具有独特的优势,将 LCT 运用到 TDCS 中将会是一个新的突破。

3.2 基本调制波形的变换域设计

TDCS 中基函数的生成是其核心内容,也是其与传统通信系统的本质区别之所在,决定着通信系统频谱认知能力、抗干扰能力、LPI/LPD 性能和多址接入能力等,现在重点对基函数生成过程中的几个关键技术进行分析介绍。

3.2.1 谱估计技术

谱估计技术是 TDCS 的眼睛,准确的谱估计技术能够使系统掌握更多的环境信息,实现更精确的干扰剔除。目前谱估计技术主要包括经典谱估计和现代谱估计两种方式,其中经典谱估计技术包括周期图和自相关法,而现代谱估计技术包括 AR、MA、ARMA、最小方差方法^[10]等。

由于 AR 模型估计出的谱比较平滑而便于干扰剔除,所以在 TDCS 中一般都采用 AR 谱估计方法进行仿真验证。但是 AR 模型阶次 p 的选取对谱估计的质量有较大的影响, p 选得过则谱太平滑,分辨不出谱峰,在门限剔除时就会剔除掉原本“干净”的频段使频谱利用率降低; p 选得过大则可能产生虚假的峰值,如对于带限噪声本应是矩形的谱,而功率谱却可能会出现数个峰值。如果选取的门限高于谱峰之间的谷值,在门限剔除时有可能漏掉有干扰的频段,由此得到的基函数在频域中没有完全避开被干扰的频段,从而造成抗干扰能力下降。在运用 AR 模型进行谱估计时,如何自适应选择阶次 p 是未来 TDCS 的研究热点问题。

3.2.2 干扰剔除技术

干扰剔除是 TDCS 抗干扰的关键,传统的方法是用前面环境谱估计结果与一个门限值作比较,将高于该门限值的频段设为 0 以剔除,而低于该门限值的频段设为 1 用以传送信息。然而判决门限值的选择问题是一个研究热点,也是难点问题。如果门限值取得过低将剔除部分干净频段,造成频谱资源的浪费;如果取得过高则不能将干扰剔除干净,达不

到抗干扰效果。所以如何设计一种算法使 TDCS 能够根据环境背景及干扰的变化而自适应地生成门限值以精确剔除干扰频段,将是 TDCS 研究者们重点关注的一个方面。目前除了传统的固定门限值方法外,文献[12-13]分别从不同侧面进行了大量的研究,取得了一定的成果,但是更具普适的门限值选择算法还有待进一步研究。

3.2.3 伪随机相位生成算法

TDCS 中引入伪随机相位的概念是为了使通信系统具有 LPI/LPD 特性和提供多址接入能力,目前随机相位主要由 m 序列映射产生,如图 3 所示。但是 m 序列存在周期而不能提供足够的码序列以产生随机相位; gold 序列的性能要优于 m 序列,但也满足不了 TDCS 的需求;混沌序列有非周期的、长度无限、相关性能优越等特点,可以为 TDCS 提供足够的伪随机序列,所以对混沌序列尤其是高阶混沌序列进行优化与优选而应用到 TDCS 中将是一个值得研究的方向。

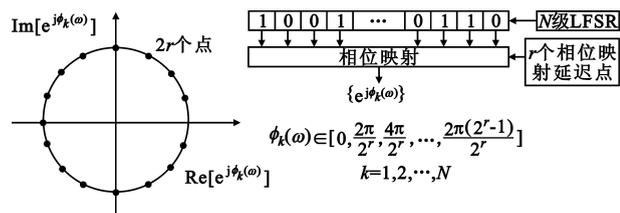


图 3 m 序列映射产生伪随机相位过程
Fig.3 The process of m -sequence mapping to generate pseudo-random phase

3.3 调制解调技术

TDCS 的调制技术主要有双极性调制 (Antipodal Modulation) 和正交调制两类,而正交调制又有二元和多元之分。后来的研究者将双极性调制和 CSK 调制相结合产生了一种新的调制方式,即循环翻转移位键控;在多元正交调制的基础上结合双极性调制,衍生出多元双正交调制,后来有研究者分析了 QAM 调制技术在 TDCS 中的性能^[14],进一步丰富了 TDCS 的调制技术。

(1) 双极性调制采用基函数和基函数的负数代表不同的二进制码元,其理论误码率为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right] \quad (2)$$

(2) 正交调制按照 CSK 方式采用同一个基函数的不同时移代表不同的码元,也可以采用不同的基函数代表不同的码元来实现,其中不同的基函数是

通过匹配不同的随机相位生成的,因此通过不同的基函数实现的正交调制的本质是调相。二元 CSK 调制的理论误码率为

$$P_b = Q \left[\sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right] \quad (3)$$

多元正交调制理论误码率满足

$$P_b(M) \leq (M-1) Q \left[\sqrt{\frac{E_s}{N_0}} \right], E_s = E_b \log M \quad (4)$$

由式(3)可以看出,正交调制误码率比双极性调制高,但是正交调制可以实现多元调制,大大提高系统吞吐率。

(3)循环翻转移位键控(Cyclic Antipodal Shift Keying, CASK)比 CSK 更接近正交调制,其调制方式为

$$S_1(t) = b(t)$$

$$S_2(t) = \begin{cases} -b(t + \frac{T}{2}), & 0 < t \leq \frac{T}{2} \\ b(t - \frac{T}{2}), & \frac{T}{2} < t \leq T \end{cases} \quad (5)$$

(4)多元双正交调制的信号集是由 $M/2$ 个正交信号及其负值信号构成的,因此多元双正交调制与解调器的复杂度比正交调制的要小,因为多元双正交调制用 $M/2$ 个互相关器实现,而正交调制则需要 M 个互相关器。可以仿照 QPSK 调制方式构造 QCSK:

$$S_1(t) = b(t) \quad S_2(t) = -S_1(t)$$

$$S_3(t) = b(t - \frac{T}{M})_T \quad S_4(t) = -S_3(t)$$

$$\vdots \quad \vdots$$

$$S_{2M-1}(t) = b(t - \frac{(M-1)T}{M})_T \quad S_{2M}(t) = -S_{2M-1}(t) \quad (6)$$

由图 2 可以看出,接收机端采用与发射机端相同的技术生成相应的基函数,只是在逆变换后多一个共轭运算,得到 BF 的共轭:

$$\overline{b(n)} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [c_k A_k e^{-j\phi_k} e^{j2\pi kn/N}] \right\} \delta(n - mT_s) \quad (7)$$

对 $\overline{b(n)}$ 做等间隔的 N 次循环移位得到 N 个信号矢量 $\overline{b(n)}_j$, 并将其分别与接收到的信号矢量 $\mathbf{r}(n)$ 做相关运算,得到结果 $z_j(n)$:

$$z_j(n) = \mathbf{r}(n) \cdot \mathbf{b}(n) \cdot \delta(n - j), j = 0, \dots, N-1 \quad (8)$$

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 $\mathbf{b}(n)$ 的循环移位估计出所传送的数据符号 $\hat{d}(n)$ 。

3.4 同步技术

同步系统是通信系统中的关键部分,特别是在数字通信系统中,精确的同步对于信息的正确传输起着极其重要的作用。对于 TDCS 系统来讲,这也包括载波同步、位同步、帧同步和网同步。只有建立了可靠的同步,才能保证在战场环境下语音和数据信息能够可靠而高效地传输。TDCS 的捕获方法目前主要有两种,一种是与扩频通信中使用的滑动相关捕获法类似的直接时间相关法(Direct Time Correlation, DTC),另一种是 German. Edgar H. 于 1995 年提出的技术^[9]。

DTC 同步方法是在接收端产生一个同步码与收到的信号做相关运算,如果结果满足检测指标,则同步成功,反之如果结果不满足检测标准,则移动本地基函数再重复上述过程直到达到检测指标。同步码有 1 号码和 2 号码两种,分别由式(9)、式(10)给出。1 号码较为简单,使用 1 号码时除了可以实现位同步以外,当码元边界在同步码字内时可以直接实现帧同步,但是在多址应用环境下受多址干扰影响较大;2 号码由一个 Barker 序列获得。

$$\text{Codeword 1} = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (9)$$

$$\text{Codeword 2} = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0] \quad (10)$$

German 的同步技术是 1995 年以技术报告的方式提供给美国军方的,没有公开发表。具体方法受美国军方保密,目前国内没有该技术的详细资料,只有如图 4 所示的大致情况。首先对收到的信号 $r(t)$ 做傅里叶变换,然后通过奇偶综合来增强信噪比(SNR),同时实现对噪声的去相关。这样,前 N (N 为基函数长度)个采样进入奇积分器,后 N 个采样进入偶积分器,这个过程一直持续到 $r(t)$ 在整个期望的时间周期内都积分过。在寄存器内,本地基函数频域形式的共轭与寄存器中的采样信号相混合后再进行逆傅里叶变换得到时域形式,最后将奇偶两个分支的结果相混合后送入检测器。German 的技术中同步码需要连续相同的符号,否则奇偶分解运行将不能产生相同的结果,平方运算将会产生噪声,因此 German 的技术必须使用 1 号码作为同步码。

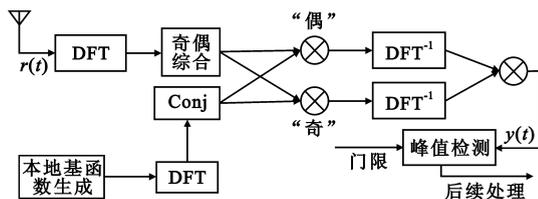


图 4 German 的预处理方案图

Fig. 4 German's pretreatment program plan

4 TDCS 的应用与展望

自 1988 年 German 提出 TDCS 的基本思想以来,随着其性能的逐步展现和无线电技术的飞速发展,人们越来越看好 TDCS 的应用前景,其应用主要致力于解决战场上飞机或舰艇编队之间的互联互通问题、解决无线电台之间的相互干扰问题、超宽带雷达(超宽带脉冲压缩系统雷达)等方面的研究。而现阶段对 TDCS 的研究还处于模型建立、理论分析和仿真验证阶段,而且都是假设收发端电磁环境一致的前提下进行的研究,TDCS 要真正投入使用还需要一段时间,对 TDCS 的研究将重点解决如下几个问题。

(1) 精确的谱估计技术

前面已经提到,谱估计技术是 TDCS 的眼睛,随着无线通信技术的发展和大量无线设备的投入使用,电磁空间将越来越复杂,这给 TDCS 的“视觉”提出新的要求,只有实现精确地谱估计才能使通信系统更好地把握环境信息,只有掌握更多的环境信息才有进一步提升系统性能的可能,所以 TDCS 迫切需要新一代的精细化谱估计技术的出现。

(2) 剔除干扰的自适应门限算法

传统的判决门限值是根据经验得出的,即环境谱最高幅值的 40%,但是这个固定的门限值并不能满足环境噪声及干扰实时变化的特点,不能充分发挥 TDCS 主动式抗干扰的特点,在极端情况下有可能使系统无法工作或无法抵抗部分干扰的影响。所以设计一种能够根据谱估计结果自适应地选择判决门限的算法,将是提高 TDCS 性能的一个必由之路。

(3) 新的变换域算法

目前变换域技术主要是基于 DFT、DWT、DWPT、FrFT 等,它们都只是针对某一类信号有很好的处理效果,缺乏普适性。即当通信环境中存在多种干扰形式时,选择任何一种变换域处理技术都不能把所有干扰剔除,它只能把该变换域技术擅长处理的干扰信号挑选出来并剔除,但是对于其他干扰信号将会对系统通信性能造成干扰。虽然可以级联不同变换域算法的方式来逐级剔除不同干扰信号,但是其运算量将大大增加,达不到数字通信的速率要求。所以新的对多种干扰信号具有普适性的变换域技术也是 TDCS 投入实际使用的一个技术需求。

(4) TDCS 通信远距离扩展

现在对 TDCS 的研究都是假定收发端电磁环境一致的基础上展开的,但是实际通信环境并不是这么理想,甚至相隔很近的收发机之间也存在感知结

果不一致的情况。而无线通信的优势在于远距离通信,TDCS 要有在将来无线通信领域占有一席之地就必须朝着远距离通信方面扩展,文献[15-16]已经对 TDCS 远距离扩展做了初期探索。所以对 TDCS 的研究必须打破现阶段收发端频谱感知一致的假设,研究在远距离即收发端频谱感知不一致时 TDCS 的可行性与优越性。

(5) 多领域融合技术

当今无线设备琳琅满目,功能也各具特色。从节约资源和降低成本的角度,需要 TDCS 与其他无线通信设备实现兼容;从 TDCS 自身发展需要的角度来看,也需要其具有广泛的兼容性。在保持 TDCS 自身固有特点外,与其他多领域无线设备的融合技术也是 TDCS 投入使用的一项关键技术。

5 结束语

TDCS 是一项崭新的且具有巨大潜力的无线通信技术,作为认知无线电收发机候选方案之一的新兴技术,其极强的抗干扰能力和极高的频谱利用率是现阶段无线通信技术瓶颈的一大突破;另外它还具有 LPI/LPD 能力,使 TDCS 具有明显的军事效益,已引起了国内外的广泛关注和研究,其在军事领域和民用行业将得到长足的发展。

参考文献:

- [1] 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 Yong-gang, ZHANG Nai-tong. Principle, technology and tendency of transform domain communication system[J]. Journal of Nanjing University of Posts and Telecommunications(Natural Science),2009,29(2):87-94. (in Chinese)
- [2] German E H. Transform Domain signal processing study final report[R]. Reister-stown, MD: Air Force Research Laboratory, 1988.
- [3] Andren A F. Low probability of intercept communication system: U. S., Patent 5029184[P]. 1991.
- [4] Kumpumaki T J, Isohookana M A, Juntti J K. Narrow-band interference rejection using transform domain signal processing in a hybrid DS/FH spread-spectrum system [C]//Proceedings of 1997 IEEE Military Communication Conference. Monterey, CA: IEEE, 1997: 89-93.
- [5] Klein R W, Temple M A, Claypoole R L, et al. Wavelet domain communication system (WDCS) interference avoidance capability analytic, modeling and simulation results [C]//Proceedings of 2001 Military Communications Conference. Mxlean, Virginia: IEEE, 2001: 1034-1038.

- [6] Chakravarthy V, Shak A K, Templem A. Cognitive radio an adaptive waveform with spectrum sharing capability[C]//Proceedings of 2005 Wireless Communications and Networking Conference. New Orleans, LA: IEEE, 2005: 724 - 729.
- [7] Tamayo A A. Applying frequency domain equalization to code-division multiple access and transform domain communications systems[D]. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2008.
- [8] Roberts M L. A general framework for analyzing, characterizing, and implementing spectrally modulated, spectrally encoded signals[D]. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2006.
- [9] Nunez A S. Interference suppression in multiple access communications using m-ary phase shift keying generated via spectral encoding [D]. Wright-Patterson AFB, OH: Air Force Institute of Technology, 2004.
- [10] 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. The Transform Domain Communication System Design, Modeling and Simulation[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2003. (in Chinese)
- [11] 焦传海, 王可人, 王懋, 等. 认知 FrFT 域通信系统及其抗干扰性能分析[J]. 电讯技术, 2011, 51(1): 7 - 12.
JIAO Chuan-hai, WANG Ke-ren, WANG Mao, et al. Cognitive FrFT Domain Communication System and its Anti-jamming Performance Analysis [J]. Telecommunication Engineering, 2011, 51(1): 7 - 12. (in Chinese)
- [12] 任清华, 熊金石, 刘岗, 等. 基于自适应多门限的基函数生成算法[J]. 科技导报, 2009, 27(21): 82 - 85.
REN Qing-hua, XIONG Jin-shi, LIU Gang, et al. Algorithm for Base Function Generation Based on Adaptive Multi-threshold[J]. Technology Review, 2009, 27(21): 82 - 85. (in Chinese)
- [13] 谢铁成, 达新宇, 褚振勇, 等. 采用时频分析的变换域通信系统基函数设计[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(6): 42 - 47.
XIE Tie-cheng, DA Xin-yu, CHU Zhen-yong, et al. Design of Basis Functions for Transform Domain Communication Systems Using Time-Frequency Analysis[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(6): 42 - 47. (in Chinese)
- [14] 李正刚, 任清华, 赵长雷. 变换域通信系统 QAM 调制及抗干扰性能仿真[J]. 电讯技术, 2008, 48(11): 15 - 18.
LI Zheng-gang, REN Qing-hua, ZHAO Chang-lei. QAM Modulation of Transform Domain Communication System and its Performance Simulation for Interference Suppression[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(11): 15 - 18. (in Chinese)
- [15] 何世彪, 季焯, 葛利嘉. 频谱失配情况下 TDCS 性能分析及感知结果交换机制[J]. 电讯技术, 2008, 48(12): 1 - 5.
HE Shi-biao, JI Ye, GE Li-jia. TDCS Performance Analysis and Sensing Result Exchange Mechanism under Spectrum Mismatching[J]. Telecommunication Engineering, 2008, 48(12): 1 - 5. (in Chinese)
- [16] 熊金石, 任清华, 李正刚. 一种远距离航空型变换域通

信系统设计与仿真[J]. 电讯技术, 2009, 49(2): 14 - 18.
XIONG Jin-shi, REN Qing-hua, LI Zheng-gang. Design and Simulation of a Long-Distance Aviation Transform Domain Communication System [J]. Telecommunication Engineering, 2009, 49(2): 14 - 18. (in Chinese)

作者简介:



王杰(1987—),男,云南昭通人,2011年于西安电子科技大学获学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为航空通信抗干扰技术;

WANG Jie was born in Zhaotong, Yunnan Province, in 1987. He received the B.S. degree from Xidian University in 2011. He is now a graduate student. His research concerns aviation communication anti-jamming technology.

Email: xdwj061216@126.com

毛玉泉(1957—),男,河南郑州人,分别于1982年和1990年获西安电子科技大学学士学位和国防科技大学硕士学位,现为空军工程大学教授、中国通信学会高级会员,主要研究方向为航空数据链抗干扰技术;

MAO Yu-quan was born in Zhengzhou, Henan Province, in 1957. He received the B.S. degree from Xidian University and the M.S. degree from National Defense Science and Technology University in 1982 and 1990, respectively. He is now a professor and also a senior member of China Institute of Communications. His research concerns aviation data link anti-jamming technology.

张衡阳(1978—),男,湖南祁东人,分别于2001年和2004年获空军工程大学学士学位和硕士学位,2009年获国防科学技术大学博士学位,现为空军工程大学讲师,主要研究方向为航空通信抗干扰技术、Ad hoc 网络技术;

ZHANG Heng-yang was born in Qidong, Hunan Province, in 1978. He received the B.S. degree and the M.S. degree from Air Force Engineering University, the Ph.D. degree from National Defense Science and Technology University in 2001, 2004 and 2009, respectively. He is now a lecturer. His research concerns aviation communication anti-jamming technology and Ad hoc network technology.

郭尧(1990—),男,陕西宝鸡人,2012年于北京理工大学获学士学位,现为空军工程大学硕士研究生,主要研究方向为变换域通信技术;

GUO Yao was born in Baoji, Shaanxi Province, in 1990. He received the B.S. degree from Beijing Institute of Technology in 2012. He is now a graduate student. His research concerns transform domain communication technology.

李波(1974—),男,山东青岛人,分别于1998年和2001年获空军工程大学学士学位和硕士学位,2005年于国防科学技术大学获博士学位,现为空军工程大学讲师,主要研究方向为地空通信和数据链。

LI Bo was born in Qindao, Shandong Province, in 1974. He received the B.S. degree and the M.S. degree from Air Force Engineering University, the Ph.D. degree from National Defense Science and Technology University in 1998, 2001 and 2005, respectively. He is now a lecturer. His research concerns air-ground communications and data link.