

载波频率偏差对变换域通信系统性能的影响分析

王舒¹, 达新宇¹, 褚振勇², 谢铁城¹, 邹维¹

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 陕西西安, 710077; 2. 空军工程大学科研部, 陕西西安, 710051)

摘要 针对载波频率偏差导致变换域通信系统的接收信号幅度下降并产生载波间干扰的问题, 通过建立系统模型, 推导出了载波频偏存在情况下系统误码率的解析式, 在此基础上, 分析了子载波个数、频谱使用率以及载波频偏与系统输出信噪比的关系, 以信噪比损失为度量, 定量地给出了载波频偏对系统性能的影响, 最后进行了仿真验证, 仿真结果与数值分析高度吻合。仿真结果表明: 频偏显著影响系统性能, 且归一化载波频偏大于 0.6 时与误码率之间会出现地板效应; 为避免系统性能恶化, 归一化频偏应控制在 0.05 的范围内。

关键词 变换域通信系统; 多载波调制; 载波频率偏移; 子载波间干扰; 信噪比损失

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2012.06.013

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2012)06-0060-06

变换域通信系统(Transform Domain Communication System, TDCS)是一种能适应电磁环境变化, 主动躲避干扰, 具有低截获(Low Probability of Intercept, LPI)传输信息的一种新型智能无线通信技术^[1-3]。TDCS 凭借其良好的自适应性和兼容性, 受到越来越广泛的关注。TDCS 信号是以基函数的形式进行调制并传输, 其基函数是由具有周围电磁频谱信息的多个子载波叠加组成。不同于一般意义上的多载波宽带系统, 这些子载波并不单独传输信号, 而是以基函数形式传递同一个信息数据。因此, TDCS 具有良好的环境适应能力, 相比于一般多载波宽带系统的抗干扰能力更强。但是, 与多载波宽带系统相同, TDCS 受载波频率偏移影响较大。载波频率偏移将使有用信号幅度下降并产生基函数的子载波间干扰, 从而破坏了基函数表示的干扰频谱分布信息, 造成系统抗干扰能力的下降与误码率的升高。为提升 TDCS 系统各项性能, 文献[4]提出了分数傅立叶变换域通信系统来抑制非平稳干扰, 增强了 TDCS 的抗干扰能力, 文献[5]采用一种符号内子载波传输信息可变速率的变换域通信系统, 使得 TDCS 传输效率提高, 但均未考虑载波频偏带来的子载波间干扰所造成的系统性能下降。文献[6]、[7]研究了 TDCS 系统的同步和频偏估计技术, 却未分析频偏造成的系统性能损失。由于多普勒效应或者发射机与接收机的晶振频率不稳, 频偏无法完全消除, 而 TDCS 对频偏较敏感, 上述研究结果难以适用于 TDCS 的实际工程应用, 需进一步对 TDCS 频偏影响做分析完善。

本文基于 TDCS 频偏模型, 分析了对载波频率偏差对 TDCS 误码性能的影响, 并导出频率偏移下 TDCS 误码率的解析式以及系统信噪比损失的表达式。通过仿真 TDCS 在载波频偏存在时相关参数的变化对其误码性能的影响, 验证了理论推导的有效性, 并结合理论与仿真结果分析, 定量地给出了载波频率偏差对系统性能的影响。

1 TDCS 系统及频偏模型

频率偏移是指由于系统本振误差或者多普勒补偿不理想而导致的载波频率随机扰动。频率偏移对数据

收稿日期: 2012-07-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60972042; 61271250)

作者简介: 王舒(1987-), 女, 陕西镇安人, 硕士生, 主要从事变换域通信和通信抗干扰研究。

E-mail: xss_wang@163.com

传输最直接的影响就是在时域内产生相位噪声。考虑实际通信情况,建模方式选择为在每个 TDCS 符号周期开始时载波频率偏移 f_d 引起的相位噪声为某初始值^{[8]136-139}。为了便于系统性能分析与验证,本文给出如下假设:①系统工作在单用户加性高斯白噪声(AWGN)信道,其双边功率谱密度为 $N_0/2$ (W/Hz),不考虑多址干扰及信道选择性衰落;②系统收发两端在时间上同步,不考虑样值偏差的影响;③收发两端频谱估计结果一致,且收发两端的伪随机相位一致,不考虑收发两端基函数不一致的情况。

基于上述假设,有载波存在偏移时的 TDCS 系统基带信号模型见图 1,调制解调过程如下:

1.1 发射端基函数的生成

TDCS 系统发射机通过频谱感知对环境采样、门限判决并生成一个长度为 N 的空闲频谱标记向量,记作 $\mathbf{A} = \{A_0, A_1, \dots, A_{N-1}\}$,其元素 A_k 为 1 或 0,分别表示第 k 个子载波可用或者不可用,这样可以有效地躲避已使用的频段,以达到抗干扰的目的,故 TDCS 会出现部分频谱使用(存在子载波缺失的情况)问题。同时在该系统中通过伪随机相位生成器获得相位谱 $e^{j\theta_k}$,该矢量相位服从 $[0, 2\pi]$ 均匀随机分布且与频谱标记向量长度相同。将生成器所生成的相位谱与空闲

频谱标记向量元素对应相乘得到基函数频域矢量 $\mathbf{u} = \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{e}$,对其做 IDFT 得到时域信号矢量: $\mathbf{b}(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{u}_k e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, n = 1, 2, \dots, N-1$, $\mathbf{b}(n)$ 即为调制所用的基函数,其频谱与干扰频谱正交。

1.2 数据的调制

由离散傅里叶变换时域-频域的对偶性可知,数据调制可以在频域实现^[9],在调制单元,输入二进制比特数据流 X_i 通过映射器,调制数据按不同的调制方式信号的星座分布可映射为复信号符号 $e^{j\theta_{k,x_i}}$,与基函数频域矢量相乘后,做 IDFT 得到时域信号矢量构成待发射符号集。经过进一步推导之后 TDCS 的时域发射信号模型^[10]可以表示为: $S_i(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{u}_k e^{j\theta_{k,x_i}} e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, N$ 表示子载波数, $S_i(n)$ 表示发送的第 i 个数据, $n = 1, 2, \dots, N-1$ 。

1.3 定义频偏因子

在频率偏移存在的情况下,TDCS 发射信号可以看作因频偏而发生衰减。衰减系数^[11]可以表示为: $h(n) = e^{j \frac{2\pi}{N} \epsilon n}$,其中, $\epsilon = f_d / \Delta f$ 为归一化的频率偏移, f_d 是频率偏移量, Δf 表示子载波间隔。

1.4 接收端信号的解调

基于本文假设条件,接收端基函数等于发送端基函数的共轭,即 $\mathbf{b}^*(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k} e^{-j \frac{2\pi}{N} kn}, n = 1, 2, \dots, N-1$ 。通过上述推导,接收端的接收信号可以表示为:

$$Y_i(n) = S_i(n)h(n) + \eta(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{u}_k e^{j\theta_{k,x_i}} e^{j \frac{2\pi}{N} kn} e^{j \frac{2\pi}{N} \epsilon n} + \eta(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{u}_k e^{j\theta_{k,x_i}} e^{j \frac{2\pi}{N} (k+\epsilon)n} + \eta(n) \quad (1)$$

式中, $\eta(n)$ 表示高斯白噪声, $n = 1, 2, \dots, N-1$ 。经相关解调,得到接收机判决器输入信号 Z_i 。

2 系统性能分析

2.1 系统误码率分析

在归一化频偏的作用下,在相关通道内,基函数的任意子载波相互独立且具有相同频偏因子。考虑到频偏变化缓慢,因此认为频偏 f_d 为常数,接收机判决器的输入为:

$$z_i = \sum_{n=0}^{N-1} Y_i(n) \mathbf{b}^*(n) = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \mathbf{u}_k \overline{\mathbf{u}_k} e^{j\theta_{k,x_i}} \frac{\sin(\pi\epsilon)}{\sin(\frac{\pi\epsilon}{N})} e^{-j\pi\epsilon(1-\frac{1}{N})} +$$

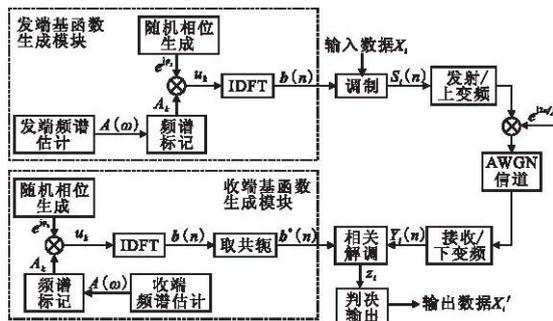


图 1 存在频率偏移下 TDCS 基带信号模型
Fig. 1 The baseband model of TDCS under the situation of CFO existing

$$\frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq k}}^{N-1} \mathbf{u}_k \overline{\mathbf{u}_q} e^{j\theta_{k,x_i}} \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{\sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]} e^{-j\pi(k+\epsilon-q)(1-\frac{1}{N})} + \eta(n) =$$

$$D + \text{ICI} + \text{AWGN} \quad (2)$$

式中: $\eta(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \gamma(n) \overline{\mathbf{u}_k} e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}$; D 表示期望信号的相关值; AWGN 为加性高斯白噪声对期望信号的影响值。由于存在频率偏移 ϵ , 导致其他子载波信号对期望信号存在干扰 ICI 项(频率偏移为 0 时, 该项不存在), 并使期望信号幅度减弱。

AWGN 和 ICI 可近似为零均值高斯随机变量, 方差分别为: $\text{var}[\text{AWGN}] = \frac{N_0}{2N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_k}$, $\text{var}[\text{ICI}] = \frac{1}{N^2} \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq k}}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_q} \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{\sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]}|^2$, 假设发送比特为 +1, 即 $d_k = +1$, 则 $d = \sum_{k=0}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_k}$ 是确定值, 因此 $E[D] = \sum_{k=0}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_k} \frac{\sin(\pi\epsilon)}{\sin(\pi\epsilon/N)}$, $\text{var}[D] = 0$ 。设发送信号等能量, 且 $E_s = \sum_{k=0}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_k}$, 由上述统计量可得判决错误概率为: $P(\text{error}, m_{z_i}) = \frac{1}{2} \text{erfc}(\sqrt{m_{z_i}^2/2\hat{\sigma}_{z_i}^2})$, 其中 $m_{z_i} = E[z_i] = E[\text{AWGN}] + E[\text{ICI}] + E[D]$, $\hat{\sigma}_{z_i}^2 = \text{var}[z_i] = \text{var}[\text{AWGN}] + \text{var}[\text{ICI}] + \text{var}[D]$ 。采用 BPSK 调制, 系统的误码率为:

$$P_e = P(z_i < 0) = \frac{1}{2} \text{erfc} \left(\frac{E_s^2/N^2 \left| \frac{\sin(\pi\epsilon)}{\sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2}{\left(\frac{1}{N^2}\right) \left| \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq k}}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_q} \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{\sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]} \right|^2 + N_0 E_s} \right) \quad (3)$$

由上式可见, 载波频偏下 TDCS 系统误码率与归一化频偏 ϵ , 子载波个数 N , 以及基函数频域矢量 $\mathbf{u}_k = \mathbf{A}_k \cdot \mathbf{e}^{j\theta_k}$ 有关, 式中的 $\mathbf{e}^{j\theta_k}$ 只是引起相位旋转并没有改变信号的幅度, 不影响平均功率, 故系统误码率仅与空闲频谱标记矢量 \mathbf{A} 有关。当 $\epsilon = 0$ 时, 不存在 ICI 项, 在这种情况下误码率为 $P_e = 1/2 \text{erfc}(\sqrt{E_s/N_0})$ 。

2.2 系统信噪比损失分析

由于信噪比损失是评价系统误码性能的重要准则, 为能定量考察载波频偏对 TDCS 系统误码性能的影响, 有必要研究载波频偏引起的信噪比损失^[12]:

$$D_{nf} = 10 \log \frac{\text{SNR}_{\text{real}}}{\text{SNR}_{\text{ideal}}} \quad (4)$$

式中 SNR_{real} 和 $\text{SNR}_{\text{ideal}}$ 分别表示为了达到相同的误码率, 即实际情况(存在频率偏移)和理想情况下(不存在频率偏移)的输出信噪比。

当实际系统中存在上述偏差, 且输出信噪比 $\text{SNR}_{\text{real}} = E_s/N_0$ 时, 系统的误码率与理想情况下信噪比为 $\text{SNR}_{\text{ideal}} = \text{SNR}$ 时系统的误码率近似相同, 所以信噪比损失为:

$$D_{nf} = 10 \log \frac{\text{SNR}_{\text{real}}}{\text{SNR}_{\text{ideal}}} = 10 \log \left(\frac{E_s}{N_0} / \frac{\frac{E_s^2}{N^2} \left| \frac{\sin(\pi\epsilon)}{\sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2}{\frac{1}{N^2} \left| \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq k}}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_q} \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{\sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]} \right|^2 + N_0 E_s} \right) \quad (5)$$

式中 $\sum_{k=0}^{N-1} \sum_{\substack{q=0 \\ q \neq k}}^{N-1} \overline{\mathbf{u}_k \mathbf{u}_q} \approx E_s$, 令加权系数 $I_{k,q} = \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{N \sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]} e^{-j\pi(k+\epsilon-q)(1-\frac{1}{N})}$, 则有:

$$\sum_{k=0}^{N-1} |I_{k,q}|^2 = \sum_{k=0}^{N-1} \left| \frac{\sin[\pi(k+\epsilon-q)]}{N \sin[\pi(k+\epsilon-q)/N]} e^{-j\pi(k+\epsilon-q)(1-\frac{1}{N})} \right|^2 \approx \sum_{k=0}^{N-1} \left| \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi}{N}(k-q)n} \right|^2 \approx 1, \epsilon \ll 1 \quad (6)$$

由式(5), 则信噪比损失为:

$$D_{nf} = 10 \log \left[1 + \frac{E_s}{N_0} \left(1 - \left| \frac{\sin(\pi\epsilon)}{N \sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2 \right) \right] - 10 \log \left[\left| \frac{\sin(\pi\epsilon)}{N \sin(\pi\epsilon/N)} \right|^2 \right] \quad (7)$$

式中: 第 1 项 $10 \log[1 + E_s/N_0 (1 - |\sin(\pi\epsilon)/N \sin(\pi\epsilon/N)|^2)]$ 为正交性被破坏引起的载波间干扰引起的信噪比损失, 第 2 项 $10 \log[|\sin(\pi\epsilon)/N \sin(\pi\epsilon/N)|^2]$ 为有用信号幅度抽样值不在峰值时所导致的信噪比损失。

3 仿真与结果

在满足奈奎斯特采样定律条件下取基函数子载波个数 N 为 64,并假设信道为 AWGN,发送数据 1 和 -1 的概率相等。系统调制方式为 BPSK,收发两端基函数采用全部频谱使用,即基函数频谱向量元素全为 1,且接收端采用基函数相关解调和阈值为零的硬判决。另外只考虑载波频率偏差的影响,其余同步假设已处于理想状态。

图 2 给出了不同信噪比条件下系统误码率的理论曲线和仿真结果,其中归一化载波频偏 ϵ 分别取 0.05、0.2、0.4、0.6、0.8。通过比较可以发现理论值与仿真值高度吻合,由此可以验证理论推导的正确性。当 $\epsilon=0$ 时不存在 ICI,没有性能损失,此时的输出信噪比为 E_s/N_0 ,系统处于理想状态,同时可以看出 TDCS 系统误码率受到频率偏移的影响很大,随着频率偏移量的增加,TDCS 系统误码率急剧恶化,尤其是当 $\epsilon>0.6$ 时,信噪比的改善几乎无助于误码率的降低,出现了地板效应。

图 3 进一步给出了归一化的载波频偏 ϵ 与系统误码率的关系曲线,其中信噪比分别取 0 dB、5 dB、10 dB。由图 3 可知,在 SNR=10 dB 的条件下,当 $|\epsilon|<0.05$ 时,频偏对误码率几乎无影响, $|\epsilon|>0.1$ 时,误码率随 $|\epsilon|$ 的增加而急剧上升,当 SNR 减小时,误码率曲线的变化越来越趋于平坦。图中可以看出,信噪比一定的情况下,载波频率的偏移会引起误码率的上升,且信噪比越大,误码率随频率偏移的变化越明显。当归一化载波频偏 ϵ 介于 ± 0.05 之间时,频偏对误码率的影响可以忽略。

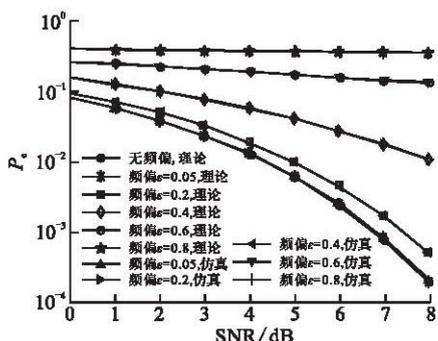


图 2 TDCS 存在载波频偏时的误码率

Fig. 2 The BER of TDCS under the situation of CFO existing

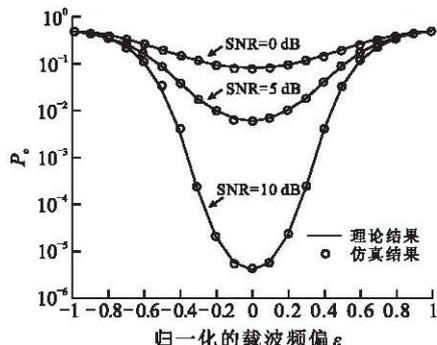


图 3 归一化的载波频偏 ϵ 与误码率的关系

Fig. 3 The relationship between the normalized frequency offset ϵ and the BER

由于 TDCS 是一种多载波系统,通过上节分析可知,载波频率偏差对系统性能的影响程度还与基函数子载波个数 N 及其频谱使用率有关。为此,本文还仿真分析了不同子载波个数和频谱使用率条件下的系统误码性能。

图 4 为子载波个数 N 与 TDCS 系统的误码率之间的关系曲线,其中基函数采用全部频谱使用,SNR=5 dB,归一化载波频偏分别取 0.2、0.4、0.6。从图 4 中可以看出,当子载波数目较小时 ($N<20$),误码率随子载波个数的增加而升高;当子载波数目较大时,TDCS 系统中的误码率趋于稳定值,这是因为在计算误码率的式(3)中 $(1/N^2) \sin(\pi\epsilon) / \sin(\pi\epsilon/N)$ 的值在 N 比较小的情况下递增,当 N 取值较大时趋于恒定,当 $N=1$ 时,相当于单载波传输,故没有子载波干扰,误码率很低。

图 5 是频谱使用率与 TDCS 误码率的关系曲线,其中子载波个数 N 取 64,归一化载波频偏分别取 0.2、0.4、0.6。从图 3 可以看出,部分频谱使用(即子载波缺失)几乎不会影响系统的误码率。这是因为此时系统发射信号的总功率是恒定的,即所有已用子载波共同传递的一个符号能量相同。

最后,图 6 中给出了输入信噪比分别为 0 dB、20 dB、40 dB 时,载波频率偏移与系统信噪比损失关系的仿真结果。图 6 中清楚表示随着载波频率偏移,TDCS 系统信噪比损失呈数量级下降,一般的,为维持系统误码性能稳定,信噪比损失需小于 0.5 dB,由图中显示,归一化载波频率偏移 ϵ (即频率同步精度)要低于 0.05。而当 ϵ 高于 0.5 时,信噪比损失高达 10 dB 以上,此时系统的误码性能将严重恶化。

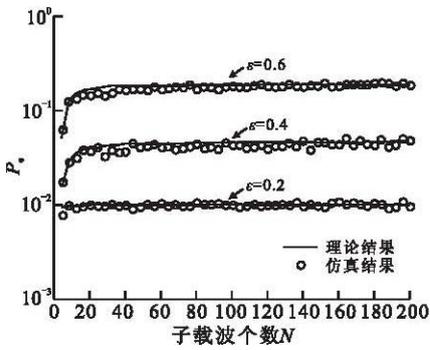
图4 子载波个数 N 与误码率的关系

Fig. 4 The relationship between the number of the subcarriers and the BER

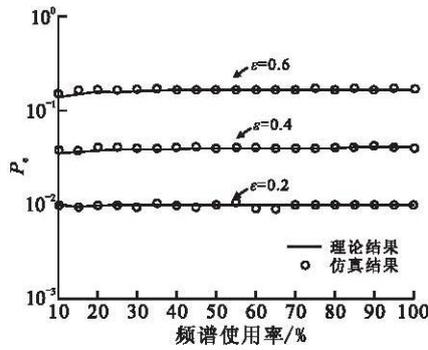


图5 频谱使用率与误码率的关系

Fig. 5 The relationship between the spectrum utilization and the BER

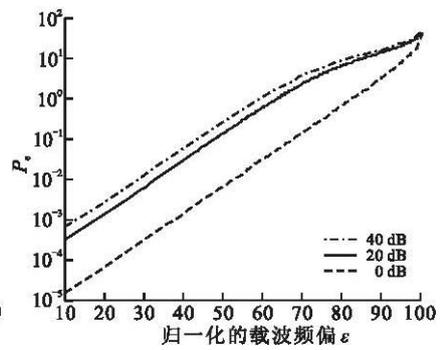
图6 归一化的载波频偏与信噪比损失 $D(\text{dB})$ 的关系

Fig. 6 The relationship between the normalized frequency offset and the SNR loss $D(\text{dB})$

综合以上结果,可以得出如下结论:①随着载波频偏量的增大,误码率不断升高,当 $|\epsilon| > 0.6$ 时,信噪比损失高达 20 dB 以上,载波频偏与误码率之间出现地板效应(即无论如何增加信号的发射功率也不能显著改善系统的性能),频率偏移越大,地板效应越明显;②尽管频谱使用率和子载波个数与频偏影响下的系统误码率有关,但频谱使用率的改变没有对其造成影响,子载波个数小于 20 时误码率随其个数增加而升高,随后误码率不随子载波个数的变化而改变,趋于一个稳定值;③归一化的载波频偏小于 0.05 时,系统信噪比损失小于 0.05,可认为频偏对误码率的影响可以忽略。

4 结语

本文针对频率偏移对 TDCS 系统性能产生较大影响的问题,在建立基于频率偏移的 TDCS 基带信号模型的基础上,对 TDCS 的误码性能进行了理论分析,并导出了频率偏移下 TDCS 系统误码率的解析式。通过仿真验证了理论推导的有效性,同时,结合数值与仿真结果,分析了子载波个数、频谱使用率以及归一化频偏对 TDCS 误码率的影响,最后,计算出载波偏移下的信噪比损失,定量给出了载波频率误差对系统性能影响。研究表明:载波频率偏移严重影响系统性能,频率偏差引入的子载波干扰会对系统性能带来严重的地板效应。为了进一步提高 TDCS 通信系统的性能,需要尽可能地减小载波频率偏差,采取频偏校正措施,提高同步精度,将归一化载波频偏限制在 ± 0.05 的范围内。

参考文献(References):

- [1] Wang S B, Zhou Z, Dou H F, et al. A novel pulse for CR-UWB using compressed chirp waveforms and modified TDCS[C]//IEEE international conference on future computer and communication. Wuhan: IEEE press, 2010: 541-545.
- [2] H X Sun, G A Bi, Y L GUAN, et al. Novel pseudorandom phase generation in transform domain communication systems[C]//Proc of international conference on innovations in information technology. Piscataway, NJ: [s. n.], 2011: 18-22.
- [3] 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.
- [4] 史军, 迟永钢, 沙学军, 等. 加权分数傅里叶变换在采样重构中的应用[J]. 通信学报, 2010, 31(4): 88-93.
SHI Jun, CHI Yonggang, SHA Xuejun, et al. Application of weighted-type fractional Fourier transform in sampling and reconstruction[J]. Journal on communications, 2010, 31(4): 88-93. (in Chinese)
- [5] 刘经泽. 基于认知无线电系统的多载波共享传输体制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
LIU Jingze. Research on multi-carrier transmission scheme in cognitive radio system[D]. Hangzhou: Zhejiang university, 2011. (in Chinese)
- [6] Roberts M L, Temple M A, Raines R A, et al. Initial acquisition performance of a transform domain communication system: modeling and simulation results[C]//Proc of IEEE military communications conference. Los Angeles: IEEE press, 2000: 1119-1123.
- [7] Huang B, Wang J, Tang W B, et al. An effective synchronization scheme for NC-OFDM systems in cognitive radio context[C]//IEEE international conf on wireless info tech and systems. Hawaii, USA: IEEE press, 2010: 1-5.
- [8] 尹长川, 罗涛, 乐光新. 多载波宽带无线通信技术[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2004.
YIN Changchuan, LUO Tao, LE Guangxin. Multi-carriers wireless broadband communications technology [M]. Bei-

jing: Beijing university of posts and telecommunications press, 2004. (in Chinese)

- [9] Nunez A S, Temple M A, Mills R F, et al. Interference avoidance in spectrally encoded multiple access communications using MPSK modulation[C]//IEEE wireless communications and networking conference. New Orleans; IEEE press, 2005; 730-734.
- [10] Han C, Wang J, Gong S P, et al. Performance of the OFDM-based transform domain communication system in cognitive radio contexts[C]//IEEE international conf on cognitive radio oriented wireless networks and communications. Mykonos Island, Greece; IEEE press, 2006; 1-5.
- [11] Zhao Y, Hggman S G. Sensitivity to Doppler shift and carrier frequency errors in OFDM systems: the consequences and solutions[C]//IEEE 46th vehicular technology conference. Atlanta, GA; IEEE press, 1996; 1564-1568.
- [12] Huang W C, Chang C C, Li C P, et al. Investigation of the noise variance and the SNR estimators for OFDM systems with imperfect frequency synchronization[C]//IEEE international wireless communications and networking conference. Sydney, NSW; IEEE press, 2010; 1-5.

(编辑:徐楠楠)

Analysis of the Effect of Carrier Frequency Offset on the Performance of Transform Domain Communication System

WANG Shu¹, DA Xin-yu¹, CHU Zhen-yong², XIE Tie-cheng¹, ZOU Wei¹

(1. Information and Navigation College, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;

2. Department of Scientific Research, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: Considering the situation that the received signals magnitude is decreased and inter-carrier interference (ICI) is induced by the carrier frequency offsets (CFO), through establishing mathematical model, the analytical expression for the Bit Error Rate (BER), which is derived from Transform Domain communication system (TDCS), is obtained. Furthermore, the relationships between the BER and the correlated parameters are studied, as well as, the Signal Noise Ratio (SNR) loss. Finally, the analysis conclusions are verified by the simulation, the simulation result agrees well with the analysis conclusion. The quantitative analysis of the system performance caused by the frequency error of carrier is given. These researches illustrate that the frequency offset affect the BER performance seriously and there is error floor on the BER when the normalized frequency offset is more than 0.6. To keep the system work around, the normalized frequency offset has to be less than 0.05.

Key words: transform domain communication system; multicarrier modulation; carrier frequency offsets; inter-carrier interference; signal noise ratio loss

(上接第 59 页)

A Fast and Robust Global Motion Estimation Algorithm

QIN Rong, MA Zhi-qiang, ZHANG Xiao-yan, CHEN Guang-ju

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

Abstract: Local movement and inaccurate motion vectors affect the accuracy of global motion estimation seriously. In order to solve this problem, a fast and robust global motion estimation algorithm is proposed in this paper. Firstly, block matching algorithm (BMA) is used to estimate motion vectors. Then the inaccurate motion vectors are excluded by gradient mean residual error method to improve the accuracy of estimated global motion field. Secondly, the initial global motion parameters are estimated using a 6-parameter affine model and they are iteratively refined by matching weighting method. Thus the most accurate global motion parameters can be obtained. Experimental results show that the proposed method is efficient and robust in terms of both computational complexity and accuracy.

Key words: global motion estimation; block matching algorithm; gradient mean residual error; affine model