

未知频偏下直扩信号的扩频序列估计

张花国^{1,2}, 魏平¹

(1. 电子科技大学电子工程学院 成都 611731; 2. 通信信息控制和安全重点实验室 浙江 嘉兴 314033)

【摘要】针对未知频偏下的直扩信号, 通过将载频吸收至扩频波形中, 提出了一种有效的基于协方差矩阵子空间分解的扩频序列估计算法。通过信号子空间分解, 提高了含有未知频偏信息的扩频波形估计的信噪比, 从而降低了载频估计难度。在随机信号模型条件下, 还推导了扩频波形估计器的克拉美劳界。在低信噪比条件下, 仿真验证了该算法的有效性。

关键词 克拉美劳界; 直扩信号; 扩频序列; 子空间分解; 未知频偏

中图分类号 TN911.7

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2013.01.011

Spreading Sequence Estimation of Direct Sequence Spread Spectrum Signals with Unknown Carrier Offset

ZHANG Hua-guo^{1,2} and WEI Ping¹

(1. School of Electronic Engineering, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 611731;

2. Science and Technology on Communication Information Security Control Laboratory Jiaying Zhejiang 314033)

Abstract In this paper, by absorbing the carrier frequency into the spreading waveform, an efficient algorithm to estimate the spreading sequence of direct sequence spread spectrum (DSSS) signals with unknown carrier offset is proposed. The proposed algorithm is based on the subspace decomposition of covariance matrix. The signal to noise ratio (SNR) of the spreading waveform estimation with unknown carrier offset is improved by signal subspace decomposition, which reduces the difficulty in carrier frequency estimation. Under the stochastic signal model assumption, we also derive the Cramer-Rao lower bound (CRB) of spreading waveform estimators. Simulation results demonstrate the effectiveness of proposed algorithm in lower SNR situations.

Key words Cramer-Rao lower bound CRB; direct sequence spread spectrum signal; spreading sequence; subspace decomposition; unknown carrier offset

由于具有低截获概率、抗干扰、码分多址等优点, 直接序列扩频技术在军事、民用通信领域中得到了广泛的应用, 如美国跟踪与数据中继卫星系统(TDRSS)、全球定位系统(GPS)及第三代移动通信CDMA系统等。直扩信号的典型特征是利用高速率的扩频序列与被传输的低速率符号码元相乘, 使得信号频谱被展宽, 从而可在低信噪比信道上传输, 合作通信接收方利用已知的扩频序列对信号解扩完成符号的估计。而对于非合作接收方, 如无线电频谱监视、通信侦察等领域, 需要事先估计出扩频序列才能完成信号的解扩。因此, 非合作低信噪比条件下, 直扩信号的扩频序列估计技术是目前的研究热点之一。

针对低信噪比条件下基带直扩信号, 扩频序列估计技术得到了广泛的研究。文献[1-2]设计了一种

基于协方差矩阵范数的信号盲同步方法, 并在此基础上提出了一种基于特征分解的扩频序列估计算法。文献[3-5]采用宽窗口在时域上分割直扩信号, 提出了一种改进算法, 避免了信号时延估计, 并考察了窄带干扰条件下的估计性能。针对文献[1-2]中协方差矩阵特征分解算法具有高计算复杂度的缺陷, 文献[6-10]设计了一些相应的快速改进算法。文献[11]在高斯噪声假设条件下, 通过理论分析得到了扩频序列估计的极大似然估计器, 并采用一种基于禁忌搜索的智能算法, 实现了该极大似然估计器的近似求解; 为了进一步降低极大似然估计器的计算复杂度, 文献[12]提出了一种快速改进算法。

上述这些方法均针对基带直扩信号即假定载频已知。但在非合作场景条件下, 接收到的直扩信号往往含有未知载频。这主要是由于在扩频序列未知

的情况下, 提前精确估计载频是比较困难的, 因为此时信噪比往往很低, 特别是对于圆信号, 如QPSK调制, 通常的载频估计算法往往失效^[13]; 而且如果存在多普勒效应, 载频估计和跟踪将更加困难。因此, 在低信噪比及未知频偏条件下, 实现扩频序列的有效估计是本文解决的主要问题之一。同时, 上述文献中仅仅通过计算机仿真阐明算法性能, 缺乏理论分析, 无法从理论上准确评估算法性能。在信号处理领域, CRB(克拉美劳界)为参数估计提供了一个理论下界, 是各种参数估计器性能评估的标准。

本文针对未知频偏下采用QPSK调制的直扩信号, 通过将未知的载频吸收至扩频波形中, 设计了一种基于协方差矩阵子空间分解的扩频序列估计方法。该方法的核心是在得到含有未知频偏的扩频波形估计基础上, 再估计载频参数。由于子空间分解大大提高了信噪比, 使得载频估计难度大大降低。同时, 在随机信号模型假定条件下, 本文还推导了扩频波形估计器的CRB。计算机仿真表明, 本文提出算法在低信噪比条件下逼近于CRB, 从而实现了扩频序列和载频的精确估计。

1 信号模型

接收机端中频直扩信号经过采样后, 可表示为:

$$y(n) = \sqrt{E_s} e^{j(2\pi f n + \varphi)} \sum_{m=-\infty}^{\infty} d(m)c(n-mL) + v(n) \quad (1)$$

其中:

$$c(n) = \sum_{l=0}^{L-1} c_l g(n-l) \quad (2)$$

式中, $n=0, 1, \dots, N-1$; $\sqrt{E_s}$ 、 f 和 φ 分别为信号功率、载频和初相; $v(n)$ 为均值为0、方差为 σ^2 的高斯白噪声, 且与信号不相关; $\{d(m)\}$ 为独立同分布等概率、采用QPSK调制的符号序列, 且 $E\{|d(m)|^2\} = 1$; 扩频波形 $\mathbf{c} = [c(0), c(1), \dots, c(L-1)]^T$ 为码长是 L 的扩频序列 $\{c_l\}_{l=0}^{L-1}$ 与广义信道冲击相应 $g(n)$ (包括发射、信道传输与接收环节) 的卷积, 且其周期为 L 即 $n \notin [0, L)$ 时, $c(n) = 0$, 其中扩频序列 $\{c_l\}$ 为QPSK调制的伪随机序列。令 $\|\mathbf{c}\|^2 = L$, 信噪比定义为 $\rho = E_s / \sigma^2$, $\|\cdot\|$ 为Frobenius范数。

为简化分析, 本文假定扩频波形周期 L 已知, 该参数可事先估计得到^[14]; 同时假定信号已实现盲同步^[2,7,15]。

2 未知频偏下扩频序列估计

假设信号接收样本中共含有 M 个扩频波形周期, 即 $N = LM$, 且样本中传输的符号序列记为 $[d(0), d(1), \dots, d(M-1)]$ 。根据式(1), 第 m 个扩频波形周期内的信号样本构成的列向量 $\mathbf{y}_m = [y(mL-L), y(mL-L+1), \dots, y(mL-1)]^T$ 可写为:

$$\mathbf{y}_m = \sqrt{E_s} d(m-1) e^{j2\pi f L(m-1)} \mathbf{s} + \mathbf{v}_m \quad (3)$$

式中, \mathbf{v}_m 为噪声列向量; \mathbf{s} 为吸收了未知载频的扩频波形, 即:

$$\mathbf{s} = [c(0)e^{j\varphi}, c(1)e^{j(2\pi f + \varphi)}, \dots, c(L-1)e^{j(2\pi f(L-1) + \varphi)}]^T$$

式(3)中 $e^{j2\pi f L(m-1)}$ 为残留的相差项, 当 $f = k/L$ ($k \in \mathbb{N}$) 时, 相差为0, 式(3)退化为直扩信号基带模型, 但由于非合作条件下载频未知, 相差往往存在。

根据式(3), 协方差矩阵为:

$$\mathbf{R} = E\{\mathbf{y}_m \mathbf{y}_m^H\} =$$

$$E_s s E\{|d(m-1)|^2\} \mathbf{s}^H + \sigma^2 \mathbf{I} = E_s \mathbf{s} \mathbf{s}^H + \sigma^2 \mathbf{I} \quad (4)$$

由式(4)可知, 协方差矩阵 \mathbf{R} 的信号子空间由 \mathbf{s} 张成, 其特征值按照由大到小分布如下:

$$\begin{cases} \lambda_1 = LE_s + \sigma^2 \\ \lambda_i = \sigma^2 \quad i \geq 2 \end{cases} \quad (5)$$

最大特征值 λ_1 对应的特征向量为 $\mathbf{s} / \|\mathbf{s}\|$ 。因此可通过对 $\hat{\mathbf{R}}$ 进行特征分解, 得到 \mathbf{s} 的估计 $\hat{\mathbf{s}}$, 其中 $\hat{\mathbf{R}}$ 为样本协方差矩阵:

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \mathbf{y}_m \mathbf{y}_m^H \quad (6)$$

由于 \mathbf{s} 中含有载频信息, 扩频序列为QPSK调制, 因此采用归一化数字频率, 可通过 $\hat{\mathbf{s}}$ 的四次方谱实现载频 f 的估计^[13], 即:

$$\hat{f} = (\hat{k} - 1) / (4L)$$

$$\hat{k} = \arg \max_{k \in [1, L]} \left| \sum_{l=1}^L \hat{\mathbf{s}}(l)^4 e^{-j\frac{2\pi}{L}(k-1)(l-1)} \right|^2 \quad (7)$$

利用式(7)进行载频估计的优点在于通过信号子空间分解, 使得扩频波形估计 $\hat{\mathbf{s}}$ 的信噪比大大提高, 降低了载频估计难度。在得到载频估计后, 对 $\hat{\mathbf{s}}$ 解调即可得到扩频序列的估计。

3 扩频波形估计器的CRB

为了衡量本文扩频序列估计算法的性能, 本节在高斯噪声假设条件下, 推导了扩频波形估计器在MSE(均方误差)意义下的CRB。

由前一节可知, 本文算法采用了随机信号模型,

即符号序列 $\{d(m)\}$ 假定为随机变量, 仅利用其二阶统计量估计扩频序列。为了简化CRB推导, 假定符号序列 $\{d(m)\}$ 服从高斯分布, 这在低信噪比条件下是一个合理的假设^[16]。基于上述假设, 信号观测样本 \mathbf{y}_m 服从高斯分布即 $\mathbf{y}_m \sim \mathcal{N}(\mathbf{0}, \mathbf{R})$ 。

在随机信号模型条件下, 考虑到 \mathbf{s} 为复值向量, $(2L+2)$ 维的未知参数向量可写为:

$$\boldsymbol{\theta} = \left[\text{Re}^T(\mathbf{s}) \quad \text{Im}^T(\mathbf{s}) \quad \sqrt{E_s} \quad \sigma^2 \right] \quad (8)$$

式中, $\text{Re}(\mathbf{s})$ 和 $\text{Im}(\mathbf{s})$ 分别表示 \mathbf{s} 的实部和虚部。

根据Slepian-Bangs公式^[17], 采用 M 个扩频波形周期的信号样本, 其 $(2L+2) \times (2L+2)$ 维的Fisher矩阵 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 可写为:

$$[\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})]_{i,j} = M \text{Tr} \left(\mathbf{R}^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_i} \mathbf{R}^{-1} \frac{\partial \mathbf{R}}{\partial \theta_j} \right) \quad (9)$$

式中, $\text{Tr}(\cdot)$ 为求矩阵的迹; θ_i 为向量 $\boldsymbol{\theta}$ 中的第 i 个元素; $[\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})]_{i,j}$ 为矩阵 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 的第 i 行第 j 列的元素。式(9)表明, $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 可通过对其所有元素逐个计算得到。

对于任一复值系数 α , 假定:

$$\boldsymbol{\theta}' = \left[\text{Re}^T(\alpha \mathbf{s}) \quad \text{Im}^T(\alpha \mathbf{s}) \quad \sqrt{E_s} / \alpha \quad \sigma^2 \right] \quad (10)$$

根据式(3), $\boldsymbol{\theta}$ 与 $\boldsymbol{\theta}'$ 都将产生相同的观测样本 \mathbf{y}_m , 因此只能得到 \mathbf{s} 的尺度模糊估计, 即 $\hat{\mathbf{s}} = \alpha \mathbf{s}$, 导致Fisher矩阵 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 存在奇异性。与盲信道估计问题类似^[18-19], 本文采用约束NMSE(归一化均方误差)衡量存在尺度模糊估计条件下的估计误差:

$$\text{NMSE} = E_s \{ \|\hat{\mathbf{s}} - \mathbf{s}\|^2 / \|\mathbf{s}\|^2 \} \quad (11)$$

其中约束条件为:

$$\begin{aligned} \|\hat{\mathbf{s}}\|^2 &= L \\ \hat{\mathbf{s}}^H \mathbf{s} &> 0 \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)可使得 $\mathbf{J}(\boldsymbol{\theta})$ 奇异性问题正则化, 且可获得最小的约束CRB^[18], 其对应的 $2 \times (2L+2)$ 维梯度矩阵为:

$$\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) = \begin{bmatrix} \text{Re}^T(\mathbf{s}) & \text{Im}^T(\mathbf{s}) & 0 & 0 \\ \text{Im}^T(\mathbf{s}) & -\text{Re}^T(\mathbf{s}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

根据文献[20]中的结论, 约束CRB为:

$$\text{CRB}_c(\boldsymbol{\theta}) = \mathbf{H}(\mathbf{H}^T \mathbf{J}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^T \quad (14)$$

式中, $(2L+2) \times 2L$ 维的 \mathbf{H} 矩阵为 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta})$ 的零空间, 即 $\mathbf{F}(\boldsymbol{\theta}) \mathbf{H} = \mathbf{0}$ 。

因此, 估计值 $\hat{\mathbf{s}}$ 的NMSE下界为:

$$\text{CRB} = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^{2L} [\text{CRB}_c(\boldsymbol{\theta})]_{i,i} \quad (15)$$

4 计算机仿真

为了验证本文提出算法在低信噪比条件下的性

能, 进行两个仿真实验, 并且与本文推导的CRB进行比较。图中统计性能通过1 000次蒙特卡罗仿真得到, 在每次仿真实验中, 符号序列及扩频序列按独立同分布QPSK调制随机序列产生, 扩频序列码长为 $L=63$ 。采用归一化采样频率, 信号样本长度采用 M 表示。为了评估 \mathbf{s} 估计性能, 采用式(11)和式(12)中的NMSE, CRB采用式(15)。同时为了评估载频 f 的估计性能, 采用RMSE(均方根误差), 即:

$$\text{RMSE} = \sqrt{E_f \{ \|\hat{f} - f\|^2 \}} \quad (16)$$

实验 1 未知频偏下扩频波形 \mathbf{s} 的估计性能。

设载频为 $f=0.1$, 固定样本长度 $M=100$, 本文的算法在不同信噪比条件下的性能及CRB如图1所示; 固定信噪比 $\text{SNR}=-12$ dB, 在不同样本长度条件下的性能及CRB如图2所示。

由图中仿真结果可以看出, 本文的算法随着信噪比及样本长度的增加, NMSE逐渐减小, 估计性能逐渐提高, 并且逐渐逼近于CRB。这说明本文的估计算法是一种有效的估计, 在低信噪比条件下具有良好的估计性能。

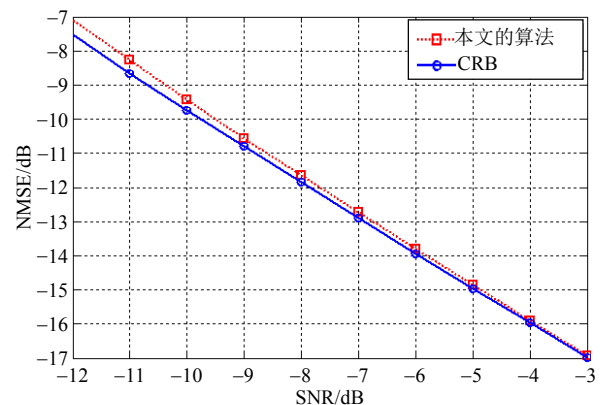


图1 不同信噪比条件下的估计性能

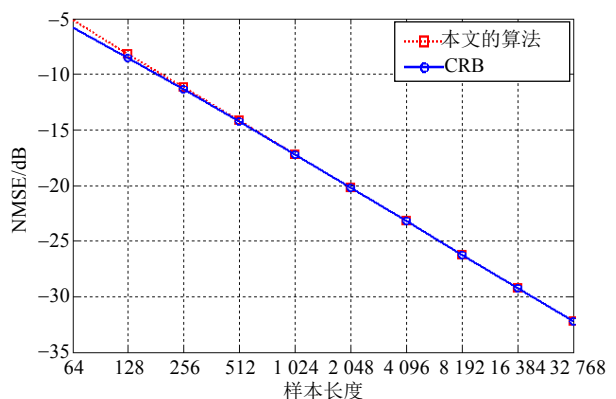
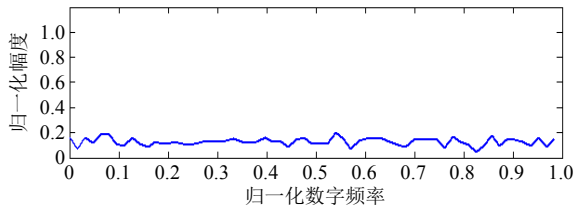


图2 不同样本长度条件下的估计性能

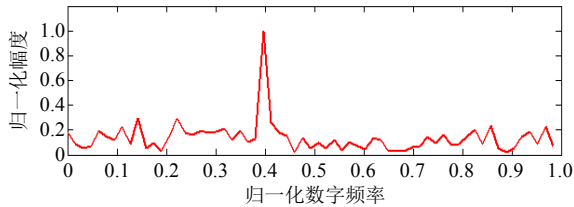
实验 2 载频 f 估计性能。

在得到扩频波形估计 $\hat{\mathbf{s}}$ 的基础上, 利用式(7)估

计载频的性能。设载频为 $f = 0.1$ ，样本长度为 $M = 150$ ，信噪比为 $\text{SNR} = -10 \text{ dB}$ 条件下，直接对接收信号样本进行四次方谱运算如图3a所示， \hat{s} 的四次方谱如图3b所示。由图中可以看出，直接利用接收信号样本进行四次方谱运算，由于输入信噪比较低，无法得到载频的精确估计；而利用本文提出算法，在4倍载频 ($4f = 0.4$) 处存在明显的谱峰，说明 \hat{s} 的信噪比得到了大大的提高。



a. 直接对接收信号样本进行四次方谱运算仿真图



b. 对扩频波形估计 \hat{s} 进行四次方谱运算仿真图

图3 载频估计对比图

固定信噪比 $\text{SNR} = -12 \text{ dB}$ ，在载频分别为 $f = 0.1$ 、 $f = 0.17$ 两种条件下，载频估计的RMSE随着不同信号样本长度的变化曲线如图4所示。由图中可以看出，随着信号样本长度的增加，RMSE逐渐减小，载频估计的性能逐渐提高；同时还可以看出，两种不同载频条件下的性能变化曲线相近，说明本文算法性能对载频真实值不敏感。

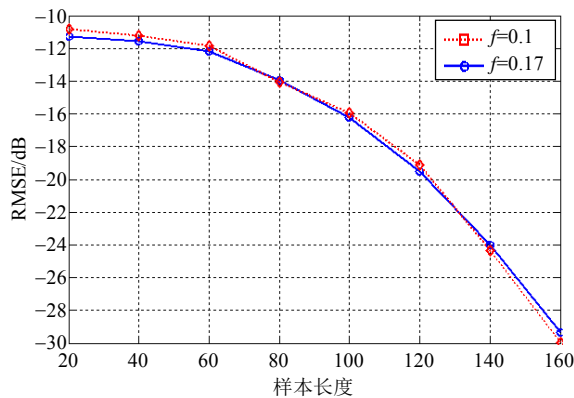


图4 不同样本长度条件下载频估计性能

5 结论

针对未知频偏下的直扩信号，通过将载频吸收至扩频波形中，本文提出了一种基于协方差矩阵子空间分解的扩频序列估计算法，降低了载频估计难

度，同时本文还推导了扩频波形估计器的CRB，仿真验证了低信噪比条件下本文的算法的有效性。

参 考 文 献

- [1] BOUDER C, AZOU S, BUREL G. Performance analysis of a spreading sequence estimator for spread spectrum transmissions[J]. Journal of the Franklin Institute, 2004, 341(7): 595-614.
- [2] BOUDER C, AZOU S, BUREL G. A robust synchronization procedure for blind estimation of the symbol period and the timing offset in spread spectrum transmissions[C]//IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications. Prague, Czech Republic: IEEE, 2002: 238-241.
- [3] ZHANG Tian-qi, MU Ai-ping. A modified eigen-structure analyzer to lower SNR DS-SS signals under narrow band interference[J]. Digital Signal Processing, 2008, 18(4): 526-533.
- [4] ZHANG Tian-qi, LIN Xiao-kang, ZHOU Zheng-zhong. Blind estimation of the PN sequence in lower SNR DS/SS signals[J]. IEICE Trans Commun, 2005, E88-B(7): 3087-3089.
- [5] ZHANG Tian-qi, ZHANG Chao. An unsupervised adaptive method for eigenstructure analysis of lower SNR DS signals[J]. IEICE Trans Commun, 2006, E89-B(6): 1943-1946.
- [6] 詹亚锋, 曹志刚, 马正新. DSSS信号的扩频序列估计[J]. 电子与信息学报, 2005, 27(2): 169-172.
ZHAN Ya-feng, CAO Zhi-gang, MA Zheng-xin. Spread spectrum sequence estimation for DSSS signals[J]. Journal of Electronics and Information Technology, 2005, 27(2): 169-172.
- [7] ZHAN Ya-feng, CAO Zhi-gang. Spread-spectrum sequence estimation for DSSS signal in non-cooperative communication systems[J]. IEE Proc Commun, 2005, 152(4): 476-480.
- [8] CHANG Liang, WANG Fu-ping, WANG Zan-ji. Low complexity method for spreading sequence estimation of DSSS signal in noncooperative communication systems[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20(1): 41-49.
- [9] JO Y, WU Da-peng. On cracking direct-sequence spread-spectrum systems[J]. Wirel Commun Mob Comput, 2009, DOI: 10.1002/wcm.815
- [10] 罗军辉, 姬红兵, 江莉. 直接序列扩频信号PN序列盲估计方法[J]. 电子科技大学学报, 2008, 37(4): 489-492.
LUO Jun-hui, JI Hong-bing, JIANG Li. Blind estimation of PN sequence of a direct sequence spread spectrum signal[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2008, 37(4): 489-492.
- [11] CHEN Yong-qian, XIAO Xian-ci. PN code sequence estimation using tabu search[C]//Proceedings of ISCIT, IDEA-group. Beijing: [s.n.], 2006.

(下转第80页)

- inducts machine with constant switching frequency and reduced torque ripple[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 758-767.
- [5] JEF B, JAN V, JOHAN D. Predictive direct torque control for flux and torque ripple reduction[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 404-412.
- [6] FATIHA Z, RACHD N S. Direct torque control of induction motor with fuzzy minimization torque ripple[J]. Journal of Electrical Engineering, 2005, 56(7-8): 183-188.
- [7] HEINS G, THIELE M, BROWN T. Accurate torque ripple measurement for PMSM[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2011, 60(12): 3868-3874.
- [8] MARIN P K. Improved direct torque and flux vector control of PWM inverter-fed induction motor drives[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1995, 42(4): 344-350.
- [9] DIMITER D, HANS H, MICHAEL R. An introduction to fuzzy control[M]. 2nd ed. Berlin: Springer-Verlag, 1996.
- [10] ZHANG Yong-chang, ZHU Jian-guo, HU Jie-feng. Model predictive direct torque control for grid synchronization of doubly fed induction generator[C]//Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Sydney, Australia: IEEE, 2011: 765-770.
- [11] 李夙. 异步电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
LI Su. Direct torque control of asynchronous motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1998.
- [12] 周扬忠, 胡育文. 交流电动机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- ZHOU Yang-zhong, HU Yu-wen. Direct torque control for AC motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [13] 高圣伟, 汪友华, 蔡燕, 等. 基于模糊逻辑的DTC减小转矩脉动方法研究[J]. 河北工业大学学报, 2011, 40(3): 62-65.
GAO Sheng-wei, WANG You-hua, CAI Yan, et al. Research on reducing torque ripple of DTC fuzzy logic-based[J]. Journal of Hebei University of Technology, 2011, 40(3): 62-65.
- [14] 徐艳平, 钟彦儒. 扇区细分和占空比控制相结合的永磁同步电机直接转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(3): 102-108.
XU Yan-ping, ZHONG Yan-ru. Sectors subdivision and duty ratio control combined direct torque Ccontrol for permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(3): 102-108.
- [15] JEYASHANTHI J, HEMAMAHESWARI V, THILAGAM G L, et al. A novel approach for a multirate 3 level carrier SVM of DTC based IM drive[C]//Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering (ICONRAEeCE). Kariapatti, India: [s.n.], 2011: 78-81.
- [16] MINO A G, MUNOZ H G A, ROMERAL J L, et al. Implementation of the direct torque control (DTC) in current model with current starting limiter[C]//Electrical Communications and Computers (CONIELECOMP). Puebla, Mexico: [s.n.], 2012: 278-282.

编辑 漆蓉

(上接第47页)

- [12] PENG Yan-hua, TANG Bin, LÜ Ming. Fast method for spreading sequence estimation of DSSS signal based on maximum likelihood function[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2010, 21(6): 948-953
- [13] DOUGLAS A, BODIE H J B. Carrier detection of PSK signals[J]. IEEE Trans on Communications, 2001, 49(3): 487-496.
- [14] BUREL G. Detection of spread spectrum transmissions using fluctuations of correlation estimators[C]//IEEE Int Symp on Intelligent Signal Processing and Communication Systems. Honolulu, Hawaii: IEEE, 2000.
- [15] 张花国, 李立萍, 陈天麒. 一种DS/SS信号盲同步算法[J]. 电子科技大学学报, 2007, 36(2): 207-209.
ZHANG Hua-guo, LI Li-ping, CHEN Tian-qi. An approach to blind synchronization of DS/SS signals[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2007, 36(2): 207-209.
- [16] VILLARES J, VAZQUEZ G. The Gaussian assumption in second-order estimation problems in digital communications[J]. IEEE Trans Signal Process, 2007, 55(10): 4994-5002.
- [17] STOICA P, MOSES R L. Introduction to spectral analysis[M]. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 1997.
- [18] CARVALHO E D, CIOFFI J, SLOCK D. Cramer-Rao bounds for blind multichannel estimation[C]//Proc Global Telecommun Conf. San Francisco, CA: 2000: 1036-1040.
- [19] CARVALHO E D, SLOCK D. Blind and semi-blind FIR multichannel Estimation: (Global) identifiability conditions [J]. IEEE Trans Signal Process, 2004, 52(4): 1053-1064.
- [20] STOICA P, NG B C. On the Cramer-Rao bound under parametric constrains[J]. IEEE Trans Signal Process Lett, 1998, 5(7): 177-179.

编辑 税红