

# DCT 变换域滤波码捕获方法

李小捷, 许录平

(西安电子科技大学电子工程学院, 陕西西安 710071)

**摘 要:** 针对较小时频不确定度的卫星信号捕获, 提出了一种结合离散余弦变换(DCT)的码捕获算法. 首先对信号进行部分匹配滤波(PMF), 然后对各个码相位对应的 PMF 输出矢量进行 DCT 变换域滤波及信号重构, 最后对信号进行基于能量的检测. 由于 PMF 输出信号和噪声时变特性不同, 滤波重构后信号能量几乎无损, 而噪声能量得到了明显降低, 从而提高了相同虚警概率下的捕获概率. 理论分析和仿真结果表明本文检测算法可以有效提升检测概率, 并且具有较低的复杂度.

**关键词:** 码捕获; 检测; 离散余弦变换; 虚警概率; 检测概率

**中图分类号:** TN927      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0372-2112 (2012) 10-2122-05

**电子学报 URL:** <http://www.ejournal.org.cn>      **DOI:** 10.3969/j.issn.0372-2112.2012.10.037

## DCT Transform Domain Filtering Code Acquisition Method

LI Xiao-jie, XU Lu-ping

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an, Shaanxi 710071, China)

**Abstract:** Focusing on the satellite signal acquisition with low time and frequency uncertainty, we propose a novel code acquisition algorithm based on discrete cosine transform (DCT). Firstly, we obtained a set of time-domain related vectors by partial matched filter (PMF). Then we performed the transform domain filtering and signal reconstruction for every candidate code phase. Because the signals and noise produced by PMF have different time-varying property, noise is greatly reduced and the signals have almost no loss, thereby increasing the probability of detection under the same probability of false alarm. The theoretical analysis and simulation results show that the detection algorithm can effectively improve the detection probability, and has a lower complexity.

**Key words:** code acquisition; detection; discrete cosine transform; probability of false alarm; probability of detection

## 1 引言

GNSS 信号是经过直接序列扩频调制的扩频信号, 对经过直序扩频调制的卫星导航信号的捕获是系统需要解决的首要问题. 目前已有大量的文献对伪随机信号的捕获进行了研究, 文献[1]研究了基于匹配滤波的全并行相关器, 通过硬件代价提高了捕获速度. 文献[2]研究了低复杂度的基于 FFT(Fast Fourier Transforms)的快速频域捕获方法, 文献[3]研究了结合 FFT 的部分匹配滤波(PMF-FFT)算法, 通过对积分段进行分割, 结合 FFT 估计出粗频偏值, 并降低了频偏对相干积分增益的影响. 文献[4]研究了差分预检积分捕获方案, 这种方法去除了频偏的影响, 但由于噪声变为乘性, 低信噪比下的性能恶化严重. 文献[5]进一步研究了时频二维联合捕获方法, 结合差分相关方法提高了频率估计的精度及低信噪比下的捕获概率. 这些方法都是基于匹配滤波后的信号直接进行信号检测, 并没有对信号进行后处理以进

一步降低噪声影响.

由于离散余弦变换具有很强的能量集中特性, 近来有较多文献研究了 DCT(Discrete Cosine Transform)变换域滤波在无线通信中的应用<sup>[6~8]</sup>. 受此启发, 本文针对辅助 GPS 等应用, 基于较小时频不确定度下噪声和信号的不同时变特性, 提出了结合 DCT 变换域滤波的 PMF-DCT-EMDS 码捕获方法. 在残余频偏较小时, 利用同步时的子相关器输出矢量的时域慢变特性, 通过 DCT 变换域滤波有效地提高了捕获信号的信噪比, 从而在同样的虚警概率下提高了信号的捕获概率. 仿真结果表明本文检测算法相对文中比较的其它检测算法具有更好的检测性能, 并且复杂度较低.

## 2 基于频偏预补偿的部分匹配滤波(PMF)模型

L1 波段的 GPS 信号为采用 BPSK 调制的 DS-CDMA 信号. 在捕获阶段, 不考虑信息比特的跳变, 则第  $q$  个

数据块的 GPS 接收信号可以表示为

$$\mathbf{r}_q = \mathbf{\Gamma}(f_q) \mathbf{S} \mathbf{h}_q + \mathbf{n} \quad (1)$$

其中,  $\mathbf{\Gamma}(f_q) = \text{diag}\{1, e^{j2\pi q f_q}, e^{j4\pi q f_q}, \dots, e^{j2\pi q(N-1)f_q}\}$ ,  $N$  为数据块长度,  $f_q$  是基于采样频率的归一化频偏.  $\mathbf{h}_q$  为目标卫星信号第  $q$  个数据块的含载波初始相位的复合信道冲激响应, 长度为  $L$ ,  $\mathbf{n}$  是满足  $E[\mathbf{n}] = 0$ ,  $E[\mathbf{n}\mathbf{n}^H] = \sigma^2 \mathbf{I}_N$  的高斯白噪声矢量, 包含干扰卫星信号和噪声.  $\mathbf{S}$  为  $N \times L$  的 C/A 码循环矩阵.

令码相位搜索窗长为  $P$ , 第  $q$  个子相关器输入为以归一化频偏  $f_p$  预补偿后的信号, 则第  $q$  个子数据段部分匹配滤波(PMF)输出为

$$\mathbf{y}_q = \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}(f_p) \mathbf{r}_q = \mathbf{C}\mathbf{\Gamma}(f'_q) \mathbf{S} \mathbf{h}_q + \mathbf{v} \quad (2)$$

$$\text{其中 } \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_n & c_{n+1} & \cdots & c_{n+N-1} \\ c_{n+1} & c_{n+2} & & c_n \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n+P-1} & c_{n+P} & & c_{n+P+N-2} \end{bmatrix}_{P \times N}, c_{n+N} =$$

$c_n, \{c_n, 0 \leq n \leq N-1\}$  为 GPS C/A 码.  $f'_q = f_q + f_p$  为剩余频偏,  $\mathbf{v}$  为干扰信号和热噪声, 可近似为均值为 0, 方差为  $\sigma_1^2 = N\sigma^2$  的高斯白噪.

不失一般性, 这里仅考虑期望用户的最大一条路径  $h_q(l)$  的捕获. 则对于码相位  $p$  的  $Q$  个子相关器输出矢量  $\mathbf{y}(p) = [y(0, p), y(1, p), \dots, y(Q-1, p)]^T, p = 0, 1, \dots, P-1, \mathbf{y}(p)$  中的元素可表示为

$$y(q, p) = \begin{cases} A_q h_q(l) e^{j2\pi q N f'_q} + v(q, p), & \text{同步} \\ v(q, p), & \text{非同步} \end{cases} \quad (3)$$

其中  $A_q = N \text{sinc}(f'_q N) e^{j\pi f'_q(N-1)}$ , 噪声  $v(q, p)$  为均值为 0, 方差为  $\sigma_1^2$  的高斯白噪.

### 3 DCT 变换域滤波码捕获算法

#### 3.1 基于 PMF 的 DCT 变换域滤波码捕获算法描述

观察式(3)可以看出, 假设第  $p$  个码相位为同步点的位置, PMF 输出矢量  $\mathbf{y}(p)$  的时变性取决于复合信道冲激响应  $h_q(l)$  的时变性与残余频偏, 而通常信道相干时间在几十到上百毫秒, 即可以认为在处理数据段内  $h_q(l)$  是慢变的, 这样在残余频偏较小时,  $\mathbf{y}(p)$  是一个慢变信号. 因此对同步时的  $\mathbf{y}(p)$  做时域 DCT, 可以保证能量都集中在离散余弦变换后的低频部分, 而对于非同步码相位或噪声, 经过 DCT 变换, 能量仍然均匀分布于整个频段. 由此, 本文提出了基于变换域滤波的码捕获算法, 首先将变换域信号的高频分量置零, 然后对保留的变换域信号作离散余弦反变换(IDCT)进行信号重构, 最后再对此重构信号进行捕获. 通过变换域滤波重构, 总的噪声被显著降低, 而信号几乎没有损失, 因此信号捕获性能得到明显提升. 具体步骤描述如下:

(1) 对信号进行  $Q$  个子数据段的部分匹配滤波(PMF);

(2) 在  $P$  个码相位搜索区间内, 依次对每个码相位的  $Q$  个时域相关输出进行 DCT 变换域滤波与 IDCT 反变换重构. 以第  $p$  个码相位的 PMF 输出  $\mathbf{y}(p) = [y(0, p), y(1, p), \dots, y(Q-1, p)]^T$  为例, 步骤如下:

(a) 对  $\mathbf{y}(p)$  进行离散余弦变换(DCT), 得到

$$\mathbf{y}_{\text{DCT}}(n, p) = \omega_Q(n) \sum_{q=0}^{Q-1} y(q, p) \cdot \cos\left[\frac{\pi(2q+1)n}{2Q}\right], \quad n = 0, 1, \dots, Q-1 \quad (4)$$

其中  $\omega_Q(n) = 1/\sqrt{Q}, n=0, \omega_Q(n) = \sqrt{2/Q}, n \neq 0$ .

(b) 根据信号的慢变特性, 对于同步码相位的 PMF 输出矢量, 由式(4)给出的信号 DCT 变换将集中于 DCT 变换域的低频段部分, 而变换后的噪声则会在整个频带内均匀分布, 因此将索引在  $[N_{\max}, Q-1]$  区间的变换结果置零, 对信号总能量几乎没有损失, 噪声则大大降低. 由此 DCT 滤波后的信号可以进一步表示为

$$\mathbf{y}'_{\text{DCT}}(n, p) = \begin{cases} \mathbf{y}_{\text{DCT}}(n, p), & n \leq N_{\max} - 1 \\ 0, & N_{\max} \leq n \leq Q-1 \end{cases} \quad (5)$$

(c) 对式(5)进行长度为  $N_{\max}$  的 IDCT 反变换, 即得到降噪后的匹配滤波结果

$$\mathbf{y}_{\text{IDCT}}(k, p) = \sum_{m=0}^{N_{\max}-1} \omega_Q(m) \mathbf{y}'_{\text{DCT}}(m, p) \cos\left[\frac{\pi(2k+1)m}{2N_{\max}}\right], \quad k = 0, 1, \dots, N_{\max} - 1 \quad (6)$$

降噪后, 总的噪声能量变为原来的  $N_{\max}/Q$ .

(3) 对变换域滤波后重构的信号, 采用基于能量检测的部分相关匹配(PMF-EMDS)方法<sup>[9]</sup>, 将  $\mathbf{y}_{\text{IDCT}}(\mathbf{p}) = [y_{\text{IDCT}}(0, p), \dots, y_{\text{IDCT}}(N_{\max}-1, p)]$  送入能量检测器进行最大能量的搜索. 码相位  $p$  对应检测单元的检验统计量

$$z(p) = \sum_{k=0}^{N_{\max}-1} |y_{\text{IDCT}}(k, p)|^2 / (\sigma_1^2/2) \quad (7)$$

在搜索的码相位中, 若  $Z = \max_p z(p)$  大于判决门限  $\gamma$ , 则认为捕获成功.

#### 3.2 码捕获门限确定

码捕获的假设检验使用 Neyman-Pearson 准则, 判决门限  $\gamma$  根据系统的虚警概率要求设定. 由于搜索的  $P$  个码相位的检验统计量  $z(p)$  是独立的, 且未同步和无信号时的  $z(p)$  服从自由度为  $2N_{\max}$  的中心  $\chi^2$  分布, 总的虚警概率  $P_{FA}$  可表示如下<sup>[10]</sup>

$$P_{FA} = 1 - [\text{Pr}\{z(p) < \gamma\}]^P \approx Pe^{-\gamma/2} \sum_{k=0}^{N_{\max}-1} \frac{1}{k!} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^k \quad (8)$$

码捕获检测门限  $\gamma$  即可由式(8)根据设定的虚警概率  $P_{FA}$  确定.

## 4 性能分析

### 4.1 检测概率

首先对码相位  $p$  对应检测单元的统计量  $z(p)$  作假设  $H_1$ : 检测单元码相位误差在一个码片之内. 检测概率  $P_D$  定义为同步单元检测度量大于门限  $\gamma$  的概率, 表示如下

$$P_D = \Pr\{z(p) > \gamma\} = 1 - \int_0^\gamma P(z(p) | H_1) dz \quad (9)$$

### 4.2 高斯白噪声道下的信号检测性能

在假设  $H_1$  下, 同步时的检验统计量服从自由度为  $2N_{\max}$  的非中心  $\chi^2$  分布, 概率密度函数如式(10)所示<sup>[10]</sup>

$$P(z | H_1) = \frac{1}{2} \left( \frac{z}{\lambda} \right)^{(N_{\max}-1)/2} e^{-\frac{1}{2}(z+\lambda)} \cdot I_{N_{\max}-1}(\sqrt{\lambda z}), \quad z \geq 0 \quad (10)$$

将式(10)代入式(9), 便可得到最终的捕获概率.

如前所述, 经过 DCT 变换域滤波重构后, 由于信号位于低频部分, 能量基本没有损失, 因而总的信号能量仍近似为  $P_y = \sum_{q=0}^{Q-1} A_q^2 h_q^2(l)$ , 而噪声由于在频域是均匀分布的, 因此总的噪声能量减少为原来的  $N_{\max}/Q$ , 即能量累加后的信号信噪比得到了提升. 需要特别说明的是, 重构后信号的长度降为  $N_{\max}$ , 每个单元的噪声仍服从均值为 0, 方差为  $\sigma_1^2$  的高斯分布. 从检测概率角度, 根据式(8)~(10)的数值计算, 与普通的非相干检测相比, 同样的虚警概率、非

中心参量  $\lambda = \sum_{q=0}^{Q-1} 2A_q^2 h_q^2(l) / \sigma_1^2$  和单元噪声分布下, 自由度的减少会降低检测门限, 带来检测概率的增加. 后面的仿真和理论曲线证明了上述分析结论.

### 4.3 信号经历衰落时的检测性能

当信号有衰落时,  $z(p)$  的概率密度是以信道衰落为条件的条件概率密度, 其非中心参数为  $\lambda\beta$ , 这里  $\beta = |\alpha|^2$ ,  $\alpha$  是衰落因子, 信号经历瑞利衰落时,  $\beta$  具有指数分布  $P_\beta(\beta) = e^{-\beta}$ ,  $z(p)$  的条件概率密度为<sup>[11]</sup>

$$P(z | H_1, \beta) = \frac{1}{2} \left( \frac{z}{\lambda\beta} \right)^{(N_{\max}-1)/2} e^{-\frac{1}{2}(z+\lambda\beta)} \cdot I_{N_{\max}-1}(\sqrt{\lambda\beta z}), \quad z \geq 0 \quad (11)$$

对上式基于  $\beta$  进行统计平均可得到

$$P(z | H_1) = \int_0^\infty P(z | H_1, \beta) P_\beta(\beta) d\beta, \quad z \geq 0 \quad (12)$$

这样, 将式(11)和式(12)代入式(9), 便可得到最终的平均检测概率, 由于难以得到闭式解, 可通过数值积分计算检测概率.

## 5 仿真分析

### 5.1 仿真条件

本文以 GPS 信号为例进行了计算机仿真, 分别对 PMF-DCT-EMDS 算法的理论性能与蒙特卡洛仿真结果

进行对比, 并与最具代表性的 PMF-FFT<sup>[3]</sup> 和 PMF-EMDS<sup>[9]</sup> 算法进行了性能对比. 具体仿真参数如下: 无编码系统, 调制方式为 BPSK, 采用 1023 阶 C/A 码扩频, 码片速率为  $R_c = 1.023 \text{ Mc/s}$ ; 信道采用高斯白噪声和一条可分辨径的瑞利衰落信道, 移动速度为 30km/h; 用于捕获的总数据长度为 8ms, 部分相关匹配滤波器(PMF)的积分长度为 1ms, 即子数据段个数  $Q = 8$ , DCT 变换域滤波重构的长度  $N_{\max} = 3$ ; 虚警概率  $P_{FA} = 0.02$ .

### 5.2 仿真结果分析

#### (1) 虚警概率仿真分析

图 1 给出了三种算法的仿真虚警概率. 其中 PMF-EMDS 和 PMF-DCT-EMDS 采用式(8)的检测门限计算方法, 只是自由度不同, PMF-FFT 采用文献[3]中的检测门限计算方法. 由图可见几种情况下的仿真虚警概率与设定虚警概率非常一致, 说明后面基于此虚警门限的三种算法的检测概率比较具备可比性. 此外, 由于非同步码相位的自干扰功率与噪声相比几可忽略, 对于高斯白噪声和瑞利衰落信道虚警概率是相同的.

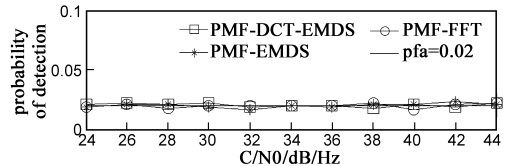


图1 虚警概率与信噪比变化曲线

#### (2) 恒虚警下的检测概率分析

本节仿真主要是对频偏影响下的三种算法的检测性能进行对比. 这里频偏对 PMF-DCT-EMDS 和 PMF-EMDS 算法的影响仅在于 PMF 输出的增益会降低, 而对 PMF-FFT 的另一个影响在于当频偏接近于 FFT 两条谱线的中心时, FFT 的输出增益会比靠近谱线时的增益降低, 而这会导致随着频偏靠近谱线中央, PMF-FFT 检测性能会恶化较多. 出于这个考虑, 本文的仿真中  $Q$  个子数据段的频偏一致, 分别设计为  $f_q' = 0$  和  $f_q' = 62 \text{ Hz}$ , 模拟频偏靠近谱线和靠近两条谱线中央两种情况, 以考察算法对频偏的鲁棒性.

图 2~5 分别给出了给定参数下, 高斯白噪声和瑞利衰落信道下的理论与仿真检测概率曲线. 由图 2 和图 3 可见, 在各检测概率下, 在频偏接近谱线时, PMF-DCT-EMDS 和 PMF-FFT 性能基本一致, 均优于 PMF-EMDS 约 1.4dB, 而当频偏趋近于两条谱线中央时, PMF-DCT-EMDS 性能优于 PMF-EMDS 约 1.4dB, 优于 PMF-FFT 约 2.5dB. 由图 4 和图 5 同样可以看到, 在衰落信道下, 在频偏接近谱线时, PMF-DCT-EMDS 和 PMF-FFT 性能基本一致, 均优于 PMF-EMDS 约 1.5dB, 而当频偏趋近于两条谱线中央时, PMF-DCT-EMDS 性能优于 PMF-EMDS 约 1.4dB, 优于 PMF-FFT 约 2.9dB. 这是由于 PMF-FFT 的峰

值元素能量随着频偏与 FFT 谱线距离的增大而降低, 最终 PMF-FFT 相对 PMF-EMDS 的检测概率增益会因峰值能量的减小而降低, 而 PMF-DCT-EMDS 对频偏是不敏感的, 因此可以一直保持增益. 此外, 由图 2 ~ 5 可见本

文推导的理论曲线与仿真曲线几乎完全重合.

(3) 捕获性能分析

捕获灵敏度定义为一定检测概率对应的信号载噪比<sup>[12,13]</sup>, 本文捕获性能仿真中, 参照文献[13]的捕获灵敏度评估方法, 设置频偏在 -100Hz ~ 100Hz 范围内均匀分布, 基于各频偏 90% 检测概率对应的平均信号载噪比作为捕获灵敏度. 表 1 总结了本文仿真参数下的捕获灵敏度.

表 1 捕获灵敏度

算法	PMF-DCT-EMDS	PMF-FFT	PMF-EMDS
捕获灵敏度 (dB/Hz)	32.8	33.8	34.2

由表 1 可以看出, 对于 90% 的检测概率, PMF-DCT-EMDS 比 PMF-EMDS 捕获算法灵敏度提高约 1.4dB, 比 PMF-FFT 捕获灵敏度提高约 1dB.

5.3 复杂度分析

本文仿真对比的三种算法均是基于 PMF 输出矢量  $y(p)$  进行, 因此仅对基于  $y(p)$  的运算部分进行计算复杂度的比较. 表 2 给出了本文参数下三种算法的复杂度对比, 其中  $P$  为码相位搜索长度.

表 2 复杂度对比

算法	实数乘法	实数加法	门限比较操作
PMF-EMDS	16P	15P	P
PMF-FFT	24P	60P	8P
PMF-DCT-EMDS	40P	68P	P

由表 2 可见, 相比于 PMF 模块采用匹配滤波实现时数十万的乘加单元, 这部分的计算量增加几可忽略.

6 结论

本文提出了一种结合 DCT 变换域滤波的能量检测码捕获算法, 利用同步和非同步时码相位的不同时变特性, 通过 DCT 变换域的滤波和 IDCT 重构, 有效提高了检测信号的信噪比, 从而提高了信号的捕获概率. 仿真结果表明, 本文所提算法在同样虚警概率的情况下, 比其它常用算法有更佳检测概率, 而且有较低的计算复杂度.

参考文献

[1] A Polydoros, C Weber. A unified approach to serial search spread-spectrum code acquisition-part II: A matched-filter receiver[J]. IEEE Transactions on Communications, 1984, 32(5): 550 - 560.

[2] P K Sagiraju, G Raju, D Akopian. Fast acquisition implementation for high sensitivity global positioning systems receivers based on joint and reduced space search[J]. IET Radar Sonar and Navigation, 2008, 2(5): 376 - 387.

[3] S M Spangenberg, I Scott, S Mclaughlin. An FFT-based ap-

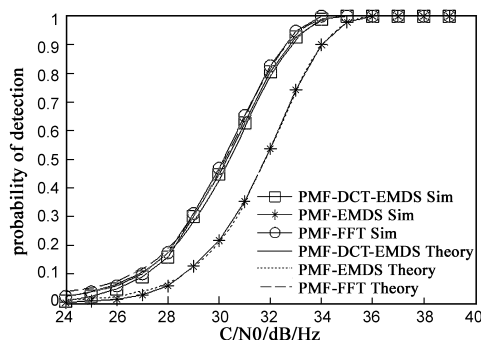


图 2 AWGN信道下无频偏时的理论与仿真检测概率曲线

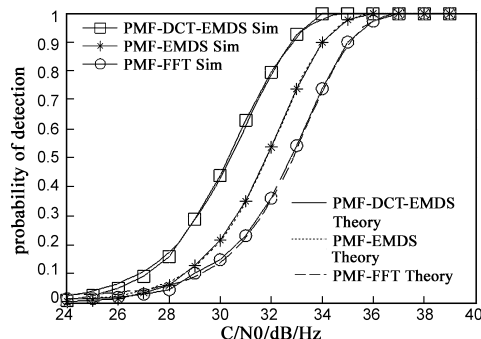


图 3 AWGN信道下频偏62Hz时的理论与仿真检测概率曲线

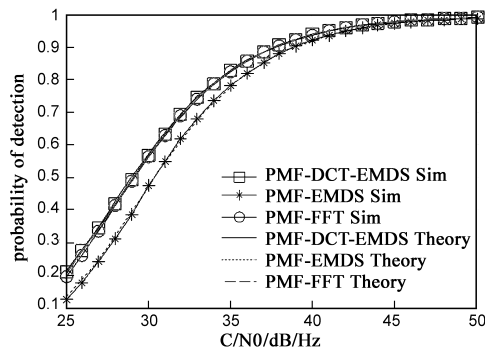


图 4 Rayleigh信道下无频偏时的理论与仿真检测概率曲线

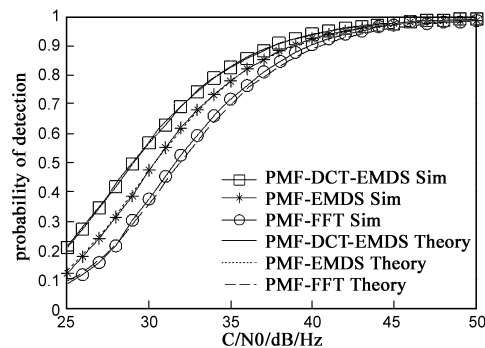


图 5 Rayleigh信道下频偏62Hz时的理论与仿真检测概率曲线

- proach for fast acquisition in spread spectrum communication systems[J]. *Wireless Personal Communications*, 2000, 13(1-2): 27-56.
- [4] S K Shanmugam, R Watson, J Nielsen, G Lachpelle. Differential signal processing schemes for enhanced GPS acquisition [A]. *Proc of 2005 International Symposium on ION GNSS [C]*. Long Beach, CA: ION, 2005. 212-222.
- [5] Linglong Dai, Zhaochen Wang, Jun Wang. Joint code acquisition and doppler frequency shift estimation for GPS signals[A]. *Proc of IEEE Vehicular Technology Conference on Fall [C]*. Ottawa, Canada: IEEE, 2010. 1-5.
- [6] A Kumar, A Makur. Improved coding-theoretic and subspace-based decoding algorithms for a wider class of DCT and DST Codes[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2010, 58(2): 695-708.
- [7] Xiqi Gao, Bin Jiang, Xiaohu You. Efficient channel estimation for MIMO single-carrier block transmission with dual cyclic timeslot structure[J]. *IEEE Transactions on Communications*, 2007, 55(11): 2210-2223.
- [8] S Kim, H k Yu, J Lee, D Hong. Low bias frequency domain SNR estimator using DCT in mobile fading channels[J]. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 2009, 8(1): 45-50.
- [9] M Abou-Khousa, A Ghayeb, M El-Tarhuni. A multipath detection scheme for CDMA systems with space time spreading [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2008, 57(1): 146-156.
- [10] J G Proakis. *Digital Communications [M]*. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [11] 张颖光, 保铮, 廖桂生, 张林让. DS-CDMA 通信系统中使用阵列天线的码捕获和波束形成权值捕获[J]. *电子学报*, 2004, 32(12): 1954-1957.
- Zhang Ying-guang, Bao Zheng. Code acquisition and beam-forming weight acquisition in DS-CDMA systems with antenna array[J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, 32(12): 1954-1957. (in Chinese)
- [12] 何文涛, 徐建华, 叶甜春. 互相关干扰下的 GNSS 弱信号检测算法[J]. *电子学报*, 2011, 39(2): 471-475.
- He Wen-tao, Xu Jian-hua, Ye Tian-chun. Detection of GNSS weak signal in cross correlation interference [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2011, 39(2): 471-475. (in Chinese)
- [13] 丁继成. 弱信号条件下 GPS 接收机关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009. 11.
- Ding Jicheng. Research on key technologies of GPS receiver on weak signal environments[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2009. 11. (in Chinese)

### 作者简介



李小捷 女, 1974 年 1 月出生于陕西汉中, 高级工程师, 2001 年获得西安电子科技大学电路与系统硕士学位, 现为西安电子科技大学电路与系统专业博士研究生, 主要研究方向为导航接收机、通信信号处理。

E-mail: xjli\_xa@126.com



许录平 男, 1961 年生于陕西扶风, 博士, 西安电子科技大学电子工程学院教授, 博士生导师, 中国通信学会通信理论与信号处理专业委员会委员, 中国电子学会高级会员. 主要研究方向信息对抗、信号与信息处理。