

# 基于 Walsh 变换的 GPS C/A 码快速捕获算法

李仰志,程 剑,吕 晶,李广侠,李志强

(解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室,江苏南京 210007)

**摘 要:** 根据  $m$  序列的相移组合多项式,给出 Walsh 序列与  $m$  序列行对应关系的计算方法.利用 Walsh 序列与 Gold 序列的映射关系,提出利用移位相加电路减小矩阵运算量的方法,解决 Gold 序列的快速相关运算问题.采用连续帧相关的方法,消除导航信号符号跳变对相关运算的影响,同时,针对 GPS 卫星码字的特点,提出了一种多星捕获方法,利用第一颗卫星的捕获运算结果,减小后续卫星捕获的计算量.

**关键词:** 捕获;快速 Walsh 变换;GPS C/A 码

**中图分类号:** TN967.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2011) 06-1384-05

## The Fast GPS C/A Code Acquisition Algorithm Based on Walsh Transform

LI Yang-zhi, CHENG Jian, LÜ Jing, LI Guang-xia, LI Zhi-qiang

(Key Laboratory of Satellite Communications, PLA University of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

**Abstract:** The relationship between the rows of Walsh and  $m$  sequence matrix is presented depending on the polynomial produce phase shift of  $m$  sequence. By using a mapping relation between Gold sequences and Walsh sequences, a fast algorithm is proposed to deal with the problems lying in fast correlation of Gold sequence. The algorithm utilizes the shift accumulator to reduce the computation cost. A consecutive frame correlation method is investigated to solve the influence of data bit transition on correlation. A multi-satellite code acquisition method is presented according to the characteristic of the GPS C/A codes, which reduces the calculation operation of the subsequent satellite acquisition based on the acquisition result of the first satellite code.

**Key words:** acquisition; fast walsh transform; GPS C/A code

## 1 引言

捕获是卫星导航接收机的一项关键技术.目前,常用的捕获方法可以大致分为两大类,一类是时域捕获算法,包括滑动相关法和匹配滤波法(Match Filter)<sup>[1,2]</sup>等,另一类是变换域捕获算法,包括基于快速傅立叶变换(FFT)并行捕获方法<sup>[3]</sup>和基于快速 Walsh 变换(FWT)并行捕获方法<sup>[4]</sup>等.滑动相关法捕获时间长,MF 算法资源消耗大;变换域算法利用变换域处理与时域处理的等效性,采用信号处理的快速算法减小捕获的计算量,节省资源,捕获速度快,在工程实践中获得了广泛的应用<sup>[5]</sup>.

GPS C/A 码快速捕获是研究热点<sup>[6-9]</sup>.文献[6]阐述了影响 C/A 码捕获的因素,文献[7]采用先叠加再相关的方法加快捕获速度,但是叠加将导致噪声增加,降低了检测概率.文献[4]对采用  $m$  序列的扩频信号,提出利用 Walsh 序列与  $m$  序列的转换关系,采取 FWT 的方法进行快速捕获.相比于 FFT 的捕获方法,FWT 的加法次数与 FFT 方法相同,不需要乘法运算,也不需要进

行类似 IFFT 的反变换,可以缩短捕获时间,减少捕获所需的硬件资源.但是文献[4]中 FWT 的方法不适用于采用 Gold 序列的 C/A 码的捕获,而且关于  $m$  序列与 Walsh 序列的映射关系的证明中,没明确给出  $m$  序列与 Walsh 序列行的对应关系.文献[10,11]将 FWT 的方法运用到 Gold 序列的相关运算中,具体做法是用一个子码与接收信号相乘,相乘后的结果运用 FWT 变换进行相关运算,考虑到子码与接收信号准确的对齐相位未知,子码相乘时需要每一个可能的相位进行尝试,这将导致较大的运算量,不能充分发挥 FWT 方法的优势.文献[12]给出了 Gold 序列与  $m$  序列的一种线性变换关系,根据此变换,得到 Gold 序列与 Walsh 序列的映射关系,但是直接运用此关系将消耗较多的计算资源.本文在文献[4]的基础上,给出  $m$  序列与 Walsh 序列映射关系中行对应关系的计算方法.依据文献[12]的变换关系,将 FWT 的方法应用于 GPS C/A 码捕获,研究了变换关系的简化算法,去除重复运算,提出运用等效的电路结构完成矩阵运算,节约了计算资源.采用连续帧相关的方法克服

C/A 码的符号跳变,并依据 GPS 卫星码字的特点,提出一种多星捕获方法,计算量只有匹配滤波法的 1/4.

## 2 Walsh 序列与 m 序列映射关系

m 序列与 Walsh 序列的映射关系<sup>[4]</sup>:设  $B_i(X)$  为十进制数  $X$  的二进制表示的第  $i$  位,  $X = \sum_{i=0}^{N-1} B_i(X)2^i$ ; 设  $X_0(n)$  为某一 m 序列,  $n=0, \dots, M-1$ , 由  $N$  阶反馈移位寄存器产生, 周期  $M=2^N-1$ ;  $X$  表示 m 序列的循环移位组合成的矩阵,  $X_k(n)$  为矩阵的第  $k$  行, 表示  $X_0(n)$  循环移位  $k$  比特,  $X_k(n) = X_0((n+k) \bmod M)$ ; 定义移位寄存器的初始状态十进制数为  $S(k) = \sum_{n=0}^{N-1} X_k(n)2^n$ , 其二进制表示为  $B_i(S(k)) = X_k(i) = X_i(k)$ .  $X_k(n)$  可以表示为其前  $N$  个序列的线性组合;

$$X_k(n) = \left( \sum_{i=0}^{N-1} C_i(k) X_i(n) \right) \bmod 2 \quad (1)$$

设  $C(k) = \sum_{i=0}^{N-1} C_i(k)2^i$ , 其二进制表示为  $B_i(C(k)) = C_i(k)$ . 长度为  $M+1$  的 Walsh 序列可表示为:

$$W_{C(k)}(S(n)) = \left( \sum_{i=0}^{N-1} B_i(C(k)) B_i(S(n)) \right) \bmod 2$$

$W$  表示 Walsh 矩阵,  $C(k)$  和  $S(n)$  分别表示行数和列数. 将二进制表示代入, 得到

$$W_{C(k)}(S(n)) = \left( \sum_{i=0}^{N-1} C_i(k) X_i(n) \right) \bmod 2$$

再代入式(1)就得到映射关系:

$$W_{C(k)}(S(n)) = X_k(n) \quad (2)$$

式(2)可看成两个矩阵  $X$  与  $W$  的映射关系,  $n$  与  $S(n)$  表示列对应关系, 可通过  $X$  每一行的初相求得.

$k$  与  $C(k)$  表示行对应关系, 这一重要关系在文献[4]的证明过程中并未给出. 观察式(1),  $k$  与  $C(k)$  的关系式可进一步理解为通过 m 序列的组合产生不同相移的 m 序列, 将组合的方式称为模板. 文献[13]提出一种用模板选择序列相移的方法, 这种方法为行对应关系的求解提供了思路, 可以通过求解 m 序列相移模板的方法获得行对应关系, 如图 1 所示.

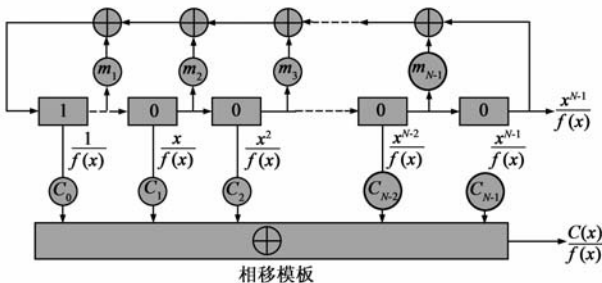


图1 相移模板的关系图

$f(x) = 1 + m_1x + m_2x^2 + \dots + m_{N-1}x^{N-1}$  表示 m 序列的生成多项式, 相移模板的多项式表示为:  $C(x) = C_0 + C_1x + C_2x^2 + \dots + C_{N-1}x^{N-1}$ , 多项式系数对应到上图的相应位置,  $\oplus$  表示模 2 加. 模板的作用是将移位寄存器中的序列产生一个相移, 移位过程中, 寄存器和模板输出之间的相对相移不变, 模板的输出序列为  $\frac{C(x)}{f(x)}$ . 合成相对于序列  $\frac{1}{f(x)}$  的相移为  $k$  的序列的方法是求出  $C(x) = x^k \bmod f(x)$ , 若需要产生相对初始状态相移为  $d$  的相移序列, 模板多项式的计算方法是:  $C(x) = x^{d+N-1} \bmod f(x)$ . 于是得到行对应关系 ( $k$  与  $C(k)$ ) 的求解方法: (1) 确定矩阵  $X$  第  $k$  行相位相对初始状态相移  $d$ ; (2) 计算模板多项式  $C(x)$ ; (3) 将  $C(x)$  各项系数转换成十进制表示得到  $C(k)$ .

## 3 GPS 卫星 C/A 码导航信号的捕获

GPS 卫星导航系统包含 24 颗卫星, C/A 码采用周期为 1023 的 Gold 序列, 码速率 1.023M chip/s, 调制 50bps 的导航电文<sup>[14]</sup>. Gold 序列, 由两个 m 序列异或得到, 不能直接套用 m 序列的 FWT 方法进行快速相关, 而且卫星导航电文引入的符号跳变, 将导致相关时能量损失. 在应用 FWT 进行 C/A 码信号捕获时, 需要解决两个问题: (1) Gold 序列的快速相关; (2) 导航信号符号跳变.

### 3.1 Gold 序列的快速相关

Gold 序列可以表示为两个 m 序列的异或,  $G_n(i) = X_n^{m1}(i) \oplus X_n^{m2}(i)$ ,  $\oplus$  表示模 2 加, 也可以转换成 m 序列之和的形式<sup>[12]</sup>:

$$G_n(i) = X_n^{m1}(i) + X_n^{m2}(i) + [-1] + 4D_n(i)$$

其中  $[-1]$  表示元素值为  $-1$  的序列, 序列  $D_n(i) = \begin{cases} 1, & X_n^{m1}(i) = X_n^{m2}(i) = -1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$ . 采用 Gold 序列的扩频信号  $r(i)$  的相关值可以写成:

$$\begin{aligned} Y(n) &= \sum_{i=0}^{M-1} r(i) G_n(i) \\ &= \sum_{i=0}^{M-1} r(i) (X_n^{m1}(i) + X_n^{m2}(i) - 1 + 4D_n(i)) \\ &= \sum_{i=0}^{M-1} r(i) X_n^{m1}(i) + \sum_{i=0}^{M-1} r(i) X_n^{m2}(i) \\ &\quad - \sum_{i=0}^{M-1} r(i) + 4 \sum_{i=0}^{M-1} r(i) D_n(i) \end{aligned} \quad (3)$$

据式(3), 可以利用 FWT 方法实现 Gold 序列的快速相关. 等式右边的前两项可以通过 FWT 算法直接求出, 第三项值等于  $\sum_{i=0}^{M-1} r(i)$ , 第四项的矩阵运算, 运算资源消耗较大, 可以利用序列的循环位移特性得到其简化

算法。

Walsh 矩阵的第一行全为 1, 即 FWT 的第一行输出值即为  $\sum_{i=0}^{M-1} r(i)$ , 第三项不需要重复计算. 第四项  $D$  矩阵的取值与两个  $m$  序列的对应位置的符号相关, 因为  $X_n^{m1}(i)$  和  $X_n^{m2}(i)$  是同步移动的,  $D$  矩阵每行中 1 元素的位置是上一行中 1 元素位置的循环位移, 于是原本复杂的矩阵的相关运算, 可以通过如图 2 的移位相加电路实现, 乘 4 的操作可以通过对矩阵运算的结果左移两位完成:

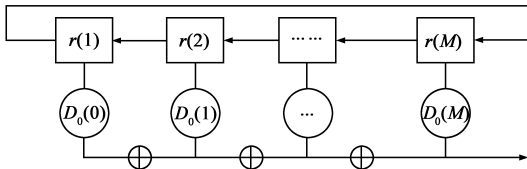


图2 采用移位求和电路等效完成矩阵运算图

采用图 2 的方法, 对于某一确定的卫星 C/A 码, 只需要存储  $D$  矩阵中某一行, 通过对输入序列进行循环移位完成全部计算, 不需要存储运算整个矩阵, 而且  $D$  矩阵每一行中 1 元素的个数较少, 即求和运算的次数较少, 节省了存储器和加法器资源。

### 3.2 连续帧相关捕获策略

由于导航电文的存在, 相关运算时, 如果输入序列包含符号跳变, 相关运算的输出将受到损失, 导致捕获失败, 因此必须消除符号跳变的影响。

通常采用对本地序列补 0 的方法消除符号跳变的影响, 但是这种方法无法运用 FWT 快速算法, 原因是 FWT 快速算法, 利用了 Walsh 矩阵的递归对称性<sup>[15]</sup>, 通过类似 FFT 的蝶形运算快速计算输入序列与本地序列的相关值. 本地序列补 0 后, 一方面, 产生的补 0 矩阵与原对应矩阵的  $W$  的对应关系不再成立, 不能用原  $W$  矩阵进行 FWT 变换; 另一方面, 利用原有的对应关系, 生成一个新对应的矩阵, 不具有  $W$  矩阵的对称关系, 快速算法也无法运用。

GPS 的卫星 C/A 码信号, 符号持续时间是 20ms, 跳变只发生数据比特的边缘位置, 可以通过利用连续帧相关的策略消除符号跳变对相关运算的影响, 如图 3 所示。

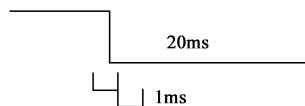


图3 连续帧相关策略示意图

将 1ms 采样数据看成一帧, 连续的 20ms 中, 只有某个 1ms 内包含跳变, 连续 2 次的 1ms 采样数据中, 至少有 1 次不包括符号跳变, 因此对连续两帧 1ms 采样数据进行相关运算, 选择最大值进行捕获判决; 当信号较弱时, 可以通过对多个 1ms 数据的相关结果进行能量累加, 提高捕获的灵敏度。

### 3.3 多星捕获方法

依据第一部分矩阵的映射关系, 可得到如下结论: 当循环移动  $X$  矩阵的行排列顺序时,

(1) 对  $S(n)$  的排列进行相对的循环移位,  $C(k)$  不变, 矩阵映射仍成立;

(2) 对  $C(k)$  的排列进行相对的循环移位,  $S(n)$  不变, 矩阵映射仍成立;

通过关系式(2)  $X_k(i) = X_i(k)$  看出, 结论 1、2 是等效的。

GPS C/A 码通过两个  $m$  序列异或得到, 不同的卫星, 异或时  $X_n^{m1}(i)$  保持不变, 选择不同相移的  $X_n^{m2}(i)$  序列. 观察式(3), 利用结论 2, 计算不同卫星的 C/A 码相关值时, 不需要重新计算所有项, 只需要计算  $D$  矩阵相关值, 而第二项采用前一次相关值的循环位移, 第一、三项不变. 因此可以得到一种多星捕获方法, 在完成第一颗卫星的捕获运算后, 只需要改变移位求和电路中系数  $D_n(i)$  的值, 并且将  $X_n^{m2}(i)$  的相关值输出进行相应的循环移位, 就能实现对后续卫星信号的捕获. 根据 3.1~3.3 的描述, 可以得到基于 FWT 的 GPS C/A 码捕获实现步骤(以 1ms 相关为例):

- (1) 连续采样 2ms 数据;
- (2) 选择需要捕获的卫星 1, 按照两个  $m$  序列的列对应关系, 对 2ms 输入序列进行位置置换, 得到两个置换序列;
- (3) 两个置换序列首位增添 0 项;
- (4) 分别计算两个置换序列的 FWT 变换值;
- (5) 采用移位求和电路完成  $D$  矩阵计算;
- (6) 根据行对应关系, 调整 FWT 变换值的输出顺序;
- (7) 根据式(3)对相关值求和, 对卫星 1 信号进行捕获判断;
- (8) 选择需要捕获的卫星 2, 重新计算(5)~(7); 直到完成所有的卫星信号的搜索。

采用这种方法, 可以去除多星捕获时的重复运算, 即式(3)中的第一、二、三项运算, 只进行  $D$  矩阵的相关运算, 进一步减小多星捕获时的运算量. 对于 GPS 卫星 C/A 码信号,  $D$  矩阵中每行 1 元素的个数为 255<sup>[14]</sup>, 约是 1/4 码长, 此方法可实现多星捕获时的计算量降为 MF 算法的 1/4。

## 4 算法性能分析

检测性能: 对 MF、FFT 和 FWT 三种算法的捕获性能进行仿真比较. 仿真中采用 GPS 1 号卫星的 C/A 码信号, 利用连续帧相关方法进行 10ms 相干累加. 结果如图 4、5 所示:

图 4 给出了 FWT 方法的捕获效果图, 仿真中  $C/n_0$

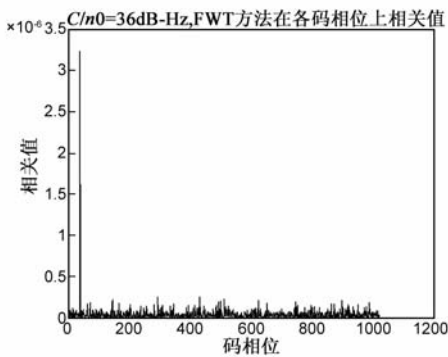


图4 FWT方法捕获效果图

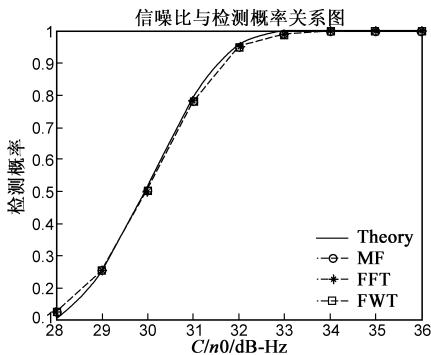


图5 检测概率与信噪比关系图

= 36dB-Hz. 如图所示,FWT 方法可以实现对 CA 码的捕获.图 5 给出了虚警概率为  $10^{-6}$  时,不同信噪比条件下三种捕获算法检测性能的仿真比较.由图可知:三种方法的检测概率基本相同.因为三种方法本质上都属于相关运算,区别是选择不同的实现途径,所以在同样积分时间条件下,三种方法对信号和噪声的累加一致,检测概率相同.

计算量分析:假设扩频码采用周期为  $M$  的 Gold 序列,三种方法的计算量分析如表 1 所示:

表 1 GPS 卫星 C/A 码三种捕获方法的计算量分析

计算量		MF 算法	FWT 算法	FFT 算法
单星	加法	$M^2$	$2M\log_2 M + \frac{M^2}{4} + 3M$	$3M\log_2 M$
	乘法	0	0	$\frac{3}{2}M\log_2 M + M$
24 星	加法	$24M^2$	$2M\log_2 M + 24(\frac{M^2}{4} + 3M)$	$72M\log_2 M$
	乘法	0	0	$36M\log_2 M + 24M$

采用基于 FFT 码域并行捕获方法时,需要进行两次 FFT 变换,一次 IFFT 变换和一次频域相乘( $M$  次乘法<sup>[16]</sup>);采用基于 FWT 并行捕获方法时,需要进行两次 FWT 变换(一次 FWT 变换需要  $M\log_2 M$  次加法),一次  $D$  矩阵的相关运算( $\frac{M^2}{4}$  次加法),以及各项求和( $3M$  次加法).搜索 24 颗卫星的信号时,MF 法和 FFT 方法都需要重复 24 次,而 FWT 的方法只需要重新计算  $D$  矩阵相

关值.

从表 1 可以看出,相比于 FFT 算法,基于 FWT 的捕获方法需要更多的加法运算,但不需要乘法运算,节省了乘法器资源;相比于 MF 算法,基于 FWT 的捕获方法加法运算量大大减少,在多星捕获时,基于 FWT 的捕获方法可以利用 GPS 卫星扩频码的特点,只进行  $D$  矩阵的相关运算,实现多星捕获时的计算量约为 MF 算法的 1/4.

## 5 小结

本文采用基于 FWT 的捕获方法对 GPS 卫星 C/A 码信号进行捕获.利用  $m$  序列的相移模板多项式,得到 Walsh 序列与  $m$  序列矩阵行对应关系的求解方法.根据 Walsh 序列与 Gold 序列的映射关系,提出利用移位相加电路减小矩阵运算量的方法,去除重复运算,得到基于 FWT 方法的 Gold 序列的快速相关算法.采用连续帧相关的方法,消除导航信号符号跳变对相关运算的影响,实现 GPS 卫星 C/A 码信号的捕获.同时依据 GPS 卫星码字是由两个相同的  $m$  序列的不同相移组合构成的特点,提出了一种多星捕获方法,利用第一颗卫星的捕获运算结果,减小后续卫星捕获计算量,实现多星捕获的计算量减小为匹配滤波法的 1/4.

## 参考文献

- [1] Andreas Polydoros, et al. A unified approach to serial search spread spectrum code acquisition part 1: General theory [J]. IEEE Tran Commun, 1984, 32(5): 542 - 549.
- [2] Andreas Polydoros, et al. A unified approach to serial search spread spectrum code acquisition part II: A matched-filter receiver [J]. IEEE Tran Commun, 1984, 32(5): 550 - 560.
- [3] D J R Van Nee, et al. New fast GPS code acquisition technique using FFT [J]. Electronics Letters, 1991, 27(2): 158 - 160.
- [4] Srdjan Z Budisin. Fast PN sequence correlation by using FWT [A]. Proceedings of Mediterranean Electro Technical Conference, MELECON'89[C]. Lisboa: IEEE, 1989. 513 - 515.
- [5] 焦瑞祥,茅旭初.基于 DBZP 方法的微弱 GPS 信号快速捕获[J].电子学报,2008,36(2):2285 - 2289.  
JIAO Rui-xiang, MAO Xu-chu. Double block zero padding-based fast acquisition of weak GPS signal[J]. Acta Electronic Sinica, 2008, 36(2): 2285 - 2289. (in Chinese)
- [6] 孙进芳,李晓白,金天.影响 GPS 信号 C/A 码捕获的因素分析及改善方法[J].航空科学技术,2007,(4):36 - 39.  
SUN Jin-fang, LI Xiao-bai, JIN Tian. Factors affecting GPS CA code acquisition and improving methods[J]. Aeronautical Science and Technology, 2007, (4): 36 - 39. (in Chinese)
- [7] 覃新贤,韩承德,谢应科. GPS 软件接收机中的一种实用高灵敏度快速捕获算法[J].电子学报,2010,38(1): 100 - 104.

- QIN Xin-xian, HAN Cheng-de, XIE Ying-ke. A high sensitive fast acquisition algorithm suitable to implement in software GPS receiver[J]. Acta Electronic Sinica, 2010, 38(1): 100 - 104. (in Chinese)
- [8] 张伯川, 张其善, 常青. 高动态接收机的温启动快捕问题研究[J]. 电子学报, 2005, 33(3): 530 - 533.  
ZHANG Bo-chuan, ZHANG Qi-shan, CHANG Qing. A satellite signals quick acquisition algorithm for the high dynamic GPS receivers in warm start[J]. Acta Electronic Sinica, 2005, 33(3): 530 - 533. (in Chinese)
- [9] 丁继成, 赵琳, 余小辉. 应用频率误差修正的高灵敏度 GPS 信号捕获技术[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2009, 30(8): 887 - 892.  
DING Ji-cheng, ZHAO Lin, YU Xiao-hui. A highly sensitive GPS signal acquisition technique using frequency error correction[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2009, 30(8): 887 - 892. (in Chinese)
- [10] B M Popovic. Efficient despanders for multi-code CDMA system[A]. Proceedings of International Conference of Universal Personal Communication, ICUPC'97[C]. San Diego: IEEE, 1997. 516 - 520.
- [11] 刘震昆, 黄顺吉. m 序列复合码的一种快速相关算法[J]. 信号处理, 2006, 22(2): 215 - 218.  
LIU Zhen-kun, HUANG Shun-ji. A fast correlation algorithm for multiple PN code of m sequence[J]. Signal Processing, 2006, 22(2): 215 - 218. (in Chinese)
- [12] 程云鹏, 葛利嘉. 快速哈达马变换在扩频序列并行捕获中的应用[J]. 解放军理工大学学报, 2000, 1(2): 1 - 6.  
CHENG Yun-peng, GE Li-jia. Application of fast hadamard transform in parallel signature code acquisition[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(2): 1 - 6. (in Chinese)
- [13] JHONG S Lee, LEONARD E Miller. CDMA System Engineering Handbook[M]. USA: Artech House INC, 1998. 370 - 380.
- [14] Ellilott D Kaplan, Christopher J Hegarty. Understanding GPS Principles and Applications[M]. Second Edition. USA: Artech House INC, 2006. 91 - 103.
- [15] 郭卫斌, 王能超, 施保昌. M 序 Walsh 变换的快速算法设计[J]. 小型微型计算机系统, 2003, 24(2): 295 - 298.  
GUO Wei-bin, WANG Neng-chao, SHI Bao-chang. Fast algorithms for then walsh transform in M-ordering[J]. MINI-MICRO Systems, 2003, 24(2): 295 - 298. (in Chinese)
- [16] 张小虹. 数字信号处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 114 - 126.

### 作者简介



**李仰志** 男, 1982 年出生于福建龙岩. 现为解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室博士研究生, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航和卫星测控.

E-mail: liyangzhi121@163.com

**程 剑** 男, 1976 年出生于湖南醴陵. 现为解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室副教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航和卫星测控. E-mail: chjajice@yahoo.com.cn

**吕 晶** 男, 1965 年出生于重庆. 现为解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航和卫星测控.

**李广侠** 男, 1964 年出生于浙江永康. 现为解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室教授, 博士生导师, 总参优秀中青年专家, 军队育才金奖获得者. 主持完成的多个项目分别获国家科技进步二等奖、军队科技进步一等奖、电子部科技进步一等奖等奖项. 主要研究方向为卫星通信、卫星导航和卫星测控.

**李志强** 男, 1974 年出生于安徽歙县. 现为解放军理工大学通信工程学院卫星通信重点实验室副教授, 主要研究方向为卫星通信、卫星导航和卫星测控.