

引用格式:徐浩,曾芳玲.卫星导航定位P码直接捕获算法研究[J].电光与控制,2018,25(10):57-61. XU H, ZENG F L. Research on P-code direct acquisition algorithm for satellite navigation positioning[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(10):57-61.

## 卫星导航定位P码直接捕获算法研究

徐浩, 曾芳玲

(国防科技大学电子对抗学院,合肥 230037)

**摘要:**如何提高卫星导航定位P码的捕获速度和精度是军用接收技术研究的热点问题之一。在GPS P码扩展复制重叠(XFAST)捕获算法和均值捕获算法的基础上,提出一种基于时频融合的捕获算法,通过对本地序列进行XFAST处理,在不影响相关度的基础上扩大搜索范围,并对处理后的本地序列和接收序列进行均值处理,相当于减少之后相关的码元个数,也即减少了运算量,从而达到提高捕获速度的目的。对所提算法的可行性进行了分析,给出了算法的具体处理过程,仿真实验验证了该方法的有效性。

**关键词:** 卫星导航; 全球定位系统; 捕获; 扩展复制重叠; 均值法; 时频融合

**中图分类号:** V474.2      **文献标志码:** A      **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.10.012

## Research on P-code Direct Acquisition Algorithm for Satellite Navigation Positioning

XU Hao, ZENG Fang-ling

(Electronic Engineering Institute, National University of Defense Technology, Hefei 230037, China)

**Abstract:** How to improve the acquisition speed and precision of satellite navigation positioning P-code is one of the hot issues in military receiving technology research. Based on the GPS P-code extended replication overlap (XFAST) acquisition algorithm and the mean acquisition algorithm, an acquisition algorithm based on time-frequency fusion is proposed. Through XFAST processing to the local sequence, the search area is expanded without affecting the degree of correlation. Then averaging is made to the processed local sequence and the received sequence, thus to reduce the amount of computation, and to achieve the purpose of improving the capture speed. The feasibility of the algorithm is analyzed, and the specific process of the algorithm is presented. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** satellite navigation; GPS; acquisition; XFAST; averaging algorithm; time-frequency fusion

### 0 引言

全球定位系统简称GPS,提供的定位服务分为两种,分别是由C/A码调制的信号提供的标准定位服务(SPS),以及由P码调制的信号提供的高精度定位服务(PPS)<sup>[1]</sup>。无论是通过C/A码还是通过P码进行定位等服务,首先必不可少的环节便是完成对码的捕获。C/A码捕获相对简单,而P码因为周期长,捕获较为困难,捕获的时间也比较长,难以满足实时性的要求。所以GPS接收机P码捕获技术的研究成为一直以来的研究重点,目前也取得了一定的研究成果。

传统的P码捕获方法,一般是通过首先捕获C/A码,然后根据接收到的C/A码中包含的有效信息,进行P码的捕获<sup>[2]</sup>。但是由于C/A码容易受到外来干扰,一旦被干扰便无法再进行P码的捕获,因此研究P码的直接捕获技术在GPS应用特别是军事应用中是十分迫切的。目前,P码的直接捕获方法主要包括时域方法和频域方法。时域捕获方法包括不借助C/A码而进行P码直接并行多通道捕获的方法,虽然不会受C/A码干扰的影响,但捕获时间较长,捕获速度很慢,难以满足实时性的要求,并且时域相关要进行大量的相关运算,需要相当多的硬件资源。

因此,从捕获速度、资源利用等方面综合考虑,P码的直接捕获方法研究主要集中在频域。目前频域的方法主要包括基于FFT的循环相关捕获法、扩展复制重叠法(XFAST)、均值法等方法<sup>[3]</sup>。频域捕获方法基

收稿日期:2017-10-16

修回日期:2018-09-07

基金项目:安徽省自然科学基金(1408085MF129)

作者简介:徐浩(1993—),男,河北泊头人,硕士生,研究方向为导航与定位和卫星信号捕获。

本上均以 FFT 为基础,从根本上讲都是基于 FFT 捕获算法的优化。

本文以上述均值捕获方法和 XFAST 方法为基础,提出一种时频融合的捕获算法,其基本思想是对本地序列进行扩展复制重叠处理,在不影响相关度的基础上扩大搜索范围,并对处理后的本地序列和接收序列进行均值处理,以提高捕获速度,同时在时域上对载波多普勒频移进行并行搜索。另外,对这种方法进行了进一步的优化,并通过仿真分析证实优化后的方法在捕获时间上有了一定进步。

### 1 P 码频域捕获算法原理

P 码的码周期很长,相关捕获的时间也比较长,难以满足实时性的要求<sup>[4]</sup>。所以 P 码的快速直接捕获方法主要集中在频域,主要是采用频域相乘代替时域的相关运算,减少了运算量,提高了捕获速度。其主要的原理是基于信号的互相关、线性卷积以及循环卷积之间的关系<sup>[5]</sup>。对于两个信号  $x(n)$  和  $h(n)$ ,它们之间的信号相关和信号 FFT 之间存在如下的关系

$$r_{sh}(k) = \sum_{n=0}^{L-1} x(n)h(n+k) = x(k) \otimes h(-k) = \text{IFFT}\{\text{FFT}[x(k) * \text{FFT}[h(-k)]]\} = \text{IFFT}\{\text{FFT}[x(k) * \text{FFT}^*[h(k)]]\} \quad (1)$$

根据上述关系,现只需要进行 2 次 FFT 和一次 IFFT 运算,就能得到与信号相关同样的结果,明显地减少了运算量、缩短了运算时间。虽然采用 FFT 捕获 P 码相对于频域相关捕获来说减少了运算量,提高了捕获的速度,但是 P 码的长周期使得直接采用 FFT 捕获用时依然较长,因此在 FFT 的基础上进行一些处理,来进一步提高捕获速度。

#### 1.1 扩展复制重叠捕获算法

扩展复制重叠捕获算法以 FFT 变换为基础<sup>[6]</sup>,其主要思想是将本地伪码分成  $M$  段,每一段的长度包含  $L$  个码元,然后将这  $M$  段子码段对应位置进行算术相加,得到 1 个新的重叠的码段,这个码段的长度为  $L$ ,但包含了原来长为  $M \times L$  的码段的信息。图 1 以  $M=4$ ,  $L=4$  对主要原理进行了解释。

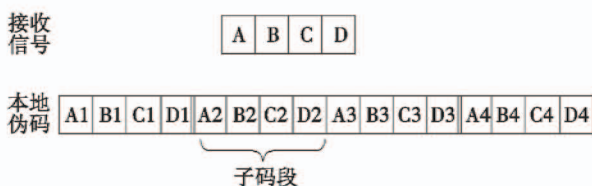


图 1 扩展复制原理

Fig. 1 Extended replication principle

根据上述原理,将本地 P 码分成  $M$  段,每段对应位置相加得到新的重叠码段,然后根据频域捕获原理

进行循环相关,找到这个新的重叠码和接收码的最大相关结果  $G_1$ 。若相关结果大于门限值,便得到了接收码在本地重叠伪码中相对于段首的相对位置  $m$ ,但此时并不确定是在哪段子码段中。再将接收信号和每段子码段在相对  $m$  的位置分别进行频域相关运算,得到  $m$  个相关结果,找出最大相关峰值  $G_2$  出现在哪个子码段中,记为  $d$ ,那么伪码偏移的位置为  $(d-1)L+m$ 。

扩展复制重叠减少了 FFT 的点数和运算量,相对于直接 FFT 方法,捕获时间增加了很多。但是由于子码段之间的叠加,增加了背景噪声,而且可能产生峰值的多值性,因此,重叠子段数不能无限制增加。表 1 给出了该算法的仿真测试结果,其中,接收信号的参数:信噪比为  $-12$  dB,中频频率为  $20.46$  MHz,  $l(l=2L)$  为每次 FFT 的点数,  $M$  为扩展段数。  $G_1$  和  $G_2$  分别表示上述过程的两个相关峰值,不同之处在于采用的是最高峰值和平均峰值比例,以便于直观地表示峰值的分辨能力;  $T_1$  和  $T_2$  分别表示 1 次搜索到和无峰值条件下搜索 1 000 000 码片所用时间。

表 1 XFAST 捕获算法处理结果

Table 1 Processing results of XFAST capture algorithm

$l$	$M$	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$
4096	2	9.825 8	12.59	20.125	1 521.91
	4	6.499 95	12.59	10.016	1 090.38
20 000	2	18.818 9	27.035	38.985	1 773.59
	4	13.195 8	27.035	36.25	914.484

统计分析表明,  $M$  值越大,峰值不存在的情况下搜索时间相对越短,但峰值也越模糊,码片误差越大,捕获越不准确,因此 XFAST 在提高捕获速度上能力也是有限的。

#### 1.2 均值捕获算法

均值捕获算法以循环相关理论为基础,它不仅使用循环相关的方法使搜索时间的覆盖域扩大,而且通过分段补零的方法很好地实现了频域的码多普勒频移的补偿<sup>[7]</sup>。其原理如图 2 所示。

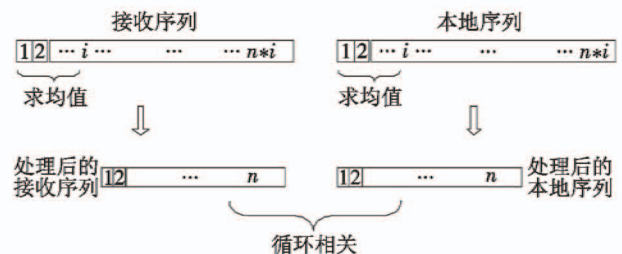


图 2 均值算法原理

Fig. 2 Principle of the mean algorithm

根据上述均值算法原理,取  $L$  长的接收码序列,进行补  $L$  个零处理,得到长度为  $2L$  的新序列,然后对该序列每  $i$  个码元取均值后得到长为  $2k$  的序列  $G(2L =$

$i \times 2k$ ); 取长为  $2L$  的本地样本, 每  $i$  个码元取均值得到长为  $2k$  的序列  $F(2L = i \times 2k)$ ; 对两个新序列  $G$  和  $F$ , 按频域捕获原理求得  $2k$  个相关结果, 取最大的相关峰值  $G_1$  进行门限判断, 若超过门限则得到最大相关峰值的相对位置  $m$ 。然后取出相应位置为  $m$  处的相应码长的本地伪码和相应位置相应长度的接收码, 按频域捕获原理求相关值, 并得到最大峰值  $G_2$  的位置  $m_1$ , 那么得到最终的伪码偏移为  $(m - 1)i + m_1$ 。

均值算法减少了 FFT 运算的点数, 提高了处理的速度, 但是平均的码段越长, 其码相位偏移越大, 峰值捕获的性能越差, 因此平均的码段长度不能过长, 这就在时间域上限制了检索范围。表 2 给出了相同仿真参数下的分析结果, 其中,  $i$  为均值的点数,  $G_1, G_2, T_1$  和  $T_2$  表示的意义与表 1 相同。

表 2 均值捕获算法处理结果

Table 2 Processing results of the mean capture algorithm

$l$	$i$	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$
4096	10	8.835 1	10.472 5	14.687	530.25
	20	9.237 9	10.049 6	13.687	314.141
10 000	10	13.834 3	15.918 1	24.547	467.765
	20	13.756	15.918 1	29.625	327.687

经统计分析,  $i$  值越大, 单次运行时间越长, 峰值不存在的情况下搜索时间相对越短, 但峰值也越模糊, 码片误差越大, 捕获越不准确。因此均值点数受到限制, 捕获速度提高的水平也受到限制。

## 2 时频融合优化算法

### 2.1 时频融合算法

扩展复制重叠捕获算法可以扩大搜索的范围, 理论上重叠的段数越多, 捕获速度越快, 但是由于背景噪声对峰值的影响, 段数过多又会影响捕获成功率<sup>[8]</sup>。而均值捕获方法可以提高相关处理速度, 理论上均值的点数越多捕获速度越快, 但点数过多同样会使峰值模

$$B' = \left\{ \frac{(b_1 + b_2 + \dots + b_i) + (b_{2L+1} + b_{2L+2} + \dots + b_{2L+i}) + \dots + (b_{(M-1)2L+1} + b_{(M-1)2L+2} + \dots + b_{(M-1)2L+i})}{i}, \dots, \frac{(b_{2L-i+1} + b_{2L-i+2} + \dots + b_{2L}) + (b_{4L-i+1} + b_{4L-i+2} + \dots + b_{4L}) + \dots + (b_{M2L-i+1} + b_{M2L-i+2} + \dots + b_{M2L})}{i} \right\} \quad (3)$$

假定伪码的偏移量为 0, 即假设接收的序列  $A$  和序列  $B$  在起始位置就达到同步, 根据 P 码良好的自相关特性, 只有码元对齐的情况下两个码元  $\{a_1 b_1, a_2 b_2, \dots, a_L b_L\}$  的相关值不为 0, 其余相关值均为无穷小量。那么将序列  $A'$  和  $B'$  进行相关运算, 也只有在偏移量为 0 的情况下存在  $\{a_1 b_1, a_2 b_2, \dots, a_L b_L\}$  项, 才存在最大峰值, 这和原序列的运算一致, 是寻找码片偏移的原理。然后根据展开后每段本地样本和接收信号的相关值, 找到具体的码元频偏段数, 从而最终确定码片偏移

模糊, 捕获成功率下降。为此, 本文提出一种时频融合捕获法, 结合以上两种方法的优势, 以达到更优更快的捕获效果。其基本思想是对本地序列进行扩展复制重叠处理, 目的是在不影响相关度的基础上扩大搜索范围, 然后对处理之后的本地信号以及接收信号进行均值处理, 以提高捕获速度, 同时在时域上进行载波的多普勒频移的并行搜索。其捕获主要过程如图 3 所示。

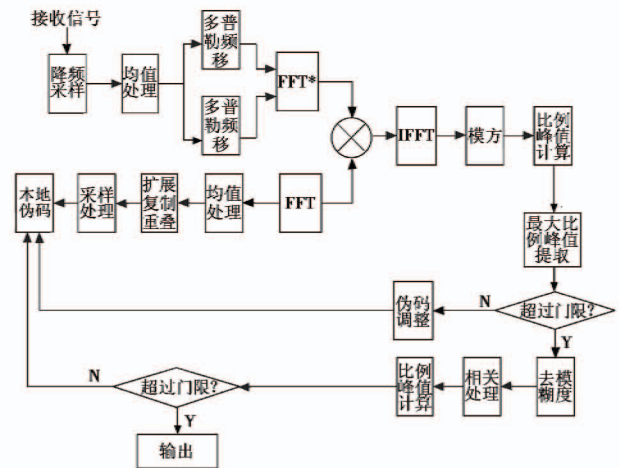


图 3 时频融合捕获流程

Fig. 3 Time-frequency fusion capture process

该算法的原理可行性分析如下。

将一个长为  $L$  的接收 P 码序列表示为  $A = \{a_1, a_2, \dots, a_L\}$ , 对该序列补  $L$  个零, 并且每  $i$  个码元取均值, 得到序列

$$A' = \left\{ \frac{a_1 + a_2 + \dots + a_i}{i}, \frac{a_{i+1} + a_{i+2} + \dots + a_{2i}}{i}, \dots, \frac{a_{(2k-1)i+1} + a_{(2k-1)i+2} + \dots + a_{2L}}{i} \right\} \quad 2L = 2k \times i \quad (2)$$

相应地, 取长为  $2L \times M$  的本地伪码样本记为  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_{2L \times M}\}$ , 将其分成  $M$  段, 每段长为  $2L$ , 然后将这  $M$  段对应位置相加后, 每  $i$  个码元取均值, 可得到序列

位置。

具体的处理过程如下。

1) 将接收信号中频处理后, 以适当的速率、载波频率进行 A/D 采样和缓存, 生成一个长为  $L$  的样本  $G' = \{g_1, g_2, \dots, g_L\} (L = i \times k)$ 。

2) 取  $L$  长的接收信号, 并对其进行补  $L$  个零操作, 这样得到一个长为  $2L$  的样本, 将其记为  $G'' = \{g_1, g_2, \dots, g_{2L}\} (g_{L+1}, g_{L+2}, \dots, g_{2L} = 0)$ , 对该样本每  $i$  个码元求均值, 得到一个新的  $2K$  长的样本, 记为

$$G = g_q[p] \{ g_q = (g_{(p-1)i+1} + g_{(p-1)i+2} + \dots + g_{pi}) \div i, \quad p = 1, \dots, 2k \} \quad 2L = i \times 2k. \quad (4)$$

3) 取一定偏移量的长为  $2L \times M$  的本地扩频伪码样本, 将其分成  $M$  段, 并且将这  $M$  段码元对应位置相加, 得到一个长为  $2L$  的样本。然后再对这个样本进行类似第2)步中的均值运算处理, 得到长为  $2k$  的样本

$$F = \cup_j^M f_q[p] \{ f_q = (f_{j(p-1)i+1} + f_{j(p-1)i+2} + \dots + f_{jpi}) \div i, \quad p = 1, \dots, 2k \} \quad 2L = i \times 2k. \quad (5)$$

4) 对  $G$  进行 FFT 运算, 并取共轭; 对  $F$  进行 FFT 运算; 将两者处理后的结果相乘, 然后进行 FFT 反变换, 对结果取绝对值, 即得到相关结果。对相关结果进行采样, 并对  $2k$  长度内的各峰值进行比较, 若超过门限则继续执行, 否则, 返回重新产生后的本地伪码序列。

5) 去除模糊度, 主要包括去除重叠模糊度和均值模糊度。

### 2.2 时频融合捕获算法的进一步优化

时频融合捕获算法结合了均值法和扩展复制重叠两种方法的优点, 进一步提高了捕获速度和捕获精度。但在对多普勒频移的搜索过程中, 采用在不同的本地载波偏移下分别进行捕获的验证方法, 获得最小相关峰值衰减时的频移, 完成多普勒补偿。但是这种方法增加了捕获的搜索量, 尤其在高动态的情况下使捕获的速度变得很慢, 因此需要做进一步的优化。

为了进一步提高捕获速度, 根据时域复指数相乘等于频域偏移的原理, 通过移动频域数据序列对多普勒的搜索进行补偿。这种方法不需要在各个本地载波频率偏移下分别进行 FFT 变换, 简化了计算过程, 减小了频域变换的计算量, 提高了捕获速度, 具体的捕获过程如图4所示。

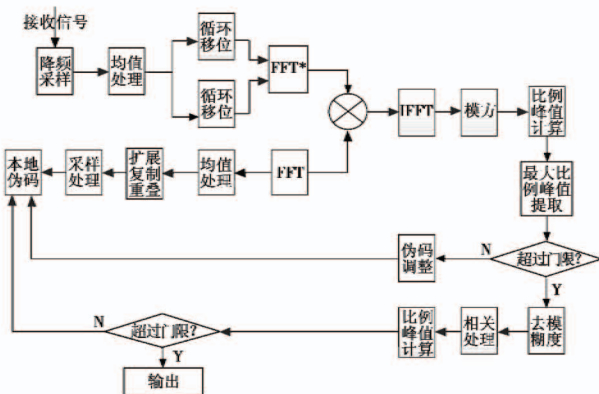


图4 优化算法的捕获过程

Fig.4 Capture process of the optimization algorithm

其主要处理方法是将2.1节中的接收序列  $G$  进行 FFT 变换, 然后根据多普勒搜索的范围, 按照频率搜索精度, 将接收信号的 FFT 变换序列进行  $N$  次移位, 这样就可以产生  $N$  个不同的多普勒补偿后的接收信号的

FFT 变换序列。之后将补偿后的序列取共轭后同本地处理后的序列相乘, 并对其乘积进行 IFFT 变换, 最后进行相关峰值的比较, 判定捕获的结果, 直到完成捕获。

### 3 P 码直捕算法的仿真分析与比较

对算法的捕获结果以及效能的分析是利用 Matlab 平台, 对优化后 P 码的直接捕获算法的捕获结果进行仿真, 并根据不同捕获方法多次捕获过程的统计分析。仿真参数设定: 信噪比为  $-12$  dB, 中频频率为  $20.46$  MHz, 截短码长为  $2048$ 。其优化算法的捕获结果如图5所示。

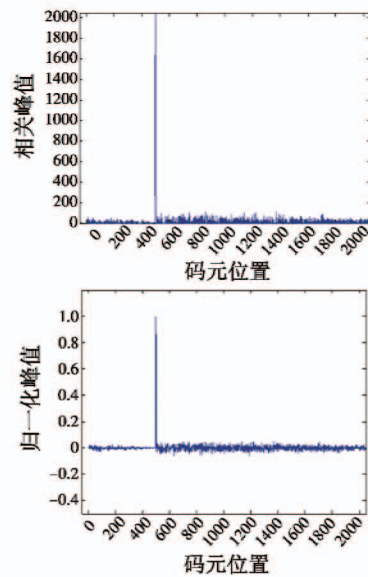


图5 捕获的相关峰值和归一化峰值

Fig.5 Captured correlation peaks and normalized peaks

表3、表4分别是时频融合算法及其优化算法捕获结果的统计分析。

表3 时频融合算法捕获结果

Table 3 Capture results of the time-frequency fusion algorithm

$l$	$M$	$i$	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$
4096	2	10	6.951 7	10.049 6	12.422	272.579
		20	6.916 23	10.049 6	14.844	174.641
20 000	2	10	12.789 2	25.358 4	55.718	247.719

表4 优化算法捕获结果

Table 4 Capture results of the optimization algorithm

$M$	$i$	$l$	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$
2	2	51 200	24.842 9	18.867 8	30.546	179.40
	8	12 800	8.610 4	8.899 8	10.781	39.656
8	2	51 200	11.641 4	18.867 8	80.008	156.5
	4	25 600	6.056 4	17.112 9	48.578	100.828

表5是扩展复制重叠捕获算法、均值捕获算法、时频融合算法以及时频融合优化后的捕获算法在同等参数设置情况下的捕获结果。

表 5 不同捕获方法在同等参数下的性能比较  
Table 5 Comparison of performance of different capture methods under equivalent parameters

算法	参数	$G_1$	$G_2$	$T_1/s$	$T_2/s$	多普勒误差/Hz
扩展复制重叠捕获算法	$l=10\ 000$ $M=2$	12.3275	17.927	19.39	1878.75	214
均值捕获算法	$l=10\ 000$ $i=2$	13.756	15.9181	29.625	327.687	14
时频融合算法	$l=10\ 000$ $M=2$ $i=20$	9.63525	15.9181	31.047	154.313	14
时频融合优化算法	$l=10\ 000$ $M=2$ $i=2$	8.1064	15.9181	30.506	134.365	14

根据捕获性能的统计分析,时频融合算法虽然单次运行时间  $T_1$  相对扩展复制重叠算法和均值算法较长,但是这种相差很小,只是几秒的差别。然而就总体的捕获时间  $T_2$  来看,时频融合算法较扩展复制重叠算法捕获时间缩短了一个数量级,较均值算法也缩短了 50% 左右,捕获速度有了很大的提高。从多普勒误差来看,时频融合算法较扩展复制重叠算法误差要小一个数量级,精度有了很大提高。并且通过对优化算法和时频融合算法的对比可以发现,优化算法的单次运行时间  $T_1$  和总体捕获时间  $T_2$  较时频融合算法有一定进步,取得了优化效果,达到快捕的目的。

#### 4 结束语

本文主要对 P 码的直接捕获算法进行研究和分析,提出了一种结合均值法和扩展复制重叠法两种方

法的时频融合捕获算法,对其进行了 Matlab 模拟仿真试验,并且对算法进行了进一步的优化,通过对模拟实验结果的统计分析,证实了优化后的算法在捕获速度和精度上都有很大的提高,满足现在 P 码直接捕获的快速性要求。

#### 参考文献

- [1] 许益乔,曾芳玲,胡燕燕. 通过模拟多普勒频移实现对 GPS 时间系统的干扰[J]. 火箭与制导学报,2013(4): 63-66.
- [2] 唐小妹,雍少为,王飞雪. 存在伪码多普勒条件下的 XFAST 性能分析[J]. 通信学报,2010,31(8):54-59.
- [3] 许斌,崔永,王传鑫,等. 基于 FFT 的高动态直扩信号快捕改进方法研究[J]. 理论与方法,2009,28(8):17-20.
- [4] 周帆. 一种 GPS 软件接收机的同步算法研究与仿真[J]. 火箭与制导学报,2012,32(3):178-181.
- [5] RAO M, RATNAM D V. Faster GPS/IRNSS acquisition via sub sampled fast Fourier transform (ssFFT) and thresholding[C]//India Conference (INDICON), IEEE, 2013:1-4.
- [6] 曹娜. 卫星定位 P 码直接捕获技术研究[D]. 西安:西北工业大学,2007.
- [7] 赵琳,高帅和,丁继成. 基于 FFT 的高动态 GPS 信号捕获方法优化[J]. 系统工程与电子技术,2011,33(1): 151-156.
- [8] 邱致和,王万义. GPS 原理与应用[M]. 北京:电子工业出版社,2002.

(上接第 27 页)

- [3] SOMOV Y, SUKHANOV V, HACIZADE C. Guidance and precise motion control of free-flying robots and land-survey mini-satellites[C]//International Conference on Control Automation Robotics & Vision, IEEE, 2014:1092-1097.
- [4] 李大明,饶炜,胡成威,等. 空间站机械臂关键技术研究[J]. 载人航天,2014,20(3):238-242.
- [5] 梁斌,杜晓东,李成,等. 空间机器人非合作航天器在轨服务研究进展[J]. 机器人,2012,34(2):242-256.
- [6] UMETANI Y, YOSHIDA K. Resolved motion rate control of space manipulators with generalized Jacobian matrix [J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1989, 5(3):303-314.
- [7] 徐拴锋,杨保华,张笃周,等. 空间机械臂自适应扩展雅克比零反作用控制[J]. 宇航学报,2014,35(7):786-

793.

- [8] LASKIN R A. Multiaxis vibration isolation, suppression, and steering system for space observational applications[C]//SPIE, 1998:73-81.
- [9] 陈力,刘延柱. 漂浮基空间机器人协调运动的自适应控制与鲁棒控制[J]. 机械工程学报,2001,37(8):18-22.
- [10] WANG C, FENG B, MA G, et al. Robust tracking control of space robots using fuzzy neural network [C]//IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, IEEE, 2005:181-185.
- [11] BECHLIOLIS C P, ROVITHAKIS G A. A low-complexity global approximation-free control scheme with prescribed performance for unknown pure feedback systems [J]. Automatica, 2014, 50(4):1217-1226.