# Эффективность ускорения поиска

## Время первого определения

Основными требованиями, предъявляемыми к НАП, являются:

- точностные характеристики,

- надежность,

- оперативность получаемых параметров движения.

Под оперативностью понимается время получения первого определения местоположения и время восстановления синхронизации после потери слежения за сигналом навигационного космического аппарата (НКА).

Время первого определения НАП, складывается из длительности следующих этапов функционирования НАП:

* продолжительность анализа частотно-временной области;
* время синхронизации со строковой информацией;
* время, затраченное на прием необходимого количества строк, содержащих оперативную информацию, необходимую, для решения навигационных задач.

При холодном старте МНП используются два варианта поиска:

- прямой поиск сигналов;

- поиск сигналов по опоре.

При прямом поиске сигнала осуществляется анализ заданной широкой частотно-временной области средствами ускоренного поиска (блоками быстрого поиска (ББП)). Проверка обнаруженного кандидата осуществляется средствами одного канала корреляционной обработки (ККО) на одной частотной позиции в узком диапазоне по задержке.

При поиске по опоре используются средства одного ККО. Он анализирует узкую частотно-временную область, заданную по результатам обнаружения другого сигнала данного НКА.

## Продолжительность поиска сигналов

### Свойства ГНСС, влияющие на продолжительность поиска

При холодном старте неизвестны видимые НКА, поэтому в худшем случае нужно искать сигналы всех НКА ГНСС. Сведения о составе орбитальных группировок разных ГНСС приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры орбитальных группировок ГНСС

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ГНСС | Количество плоскостей | Количество НКА в каждой плоскости | | Количество НКА в ГНСС | Высота орбиты, км | Угол наклонения, град |
|  |  | Основные | Резервные | Основные / с учетом резервных |  |  |
| ГЛОНАСС | 3 | 8 | 2 | 24/30 | 19,1 | 64,8 |
| GPS | 6 | 4-6 | 1 | 24/32 | 20,2 | 55 |
| GALILEO | 3 | 9 | 1 | 27/30 | 23,2 | 56 |
| BEIDOU | 3 | 9 | 1 | 27/30 | 21,5 | 55 |

Основные свойства сигналов ГНСС, влияющие на длительность поиска при холодном старте, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Основные свойства сигналов ГНСС с точки зрения поиска

|  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ГНСС** | **Диапазон** | **Тип используемого сигнала** | **Несущая частота, МГц** | **Тип модуляции** | **Длина ДК (рабочая), символов** | **Период ДК, мс** | **Длительность символа ДК, мкс** |
| ГЛОНАСС | L1 | L1OF | 1602 + k\*0,5625 | BPSK  квадратура | 511 | 1 | ~ 2 |
|  |  | L1OCd | 1600,995 | BPSK(1)  временное уплотнение | 1023 | 2 | ~ 2 |
|  |  | L1OCp | 1600,995 | BOC(1,1)  временное уплотнение | 4092 | 8 | ~ 2 |
|  | L2 | L2OF | 1246 + k\*0,4375 | BPSK  квадратура | 511 | 1 | ~ 2 |
|  |  | L2OCd | 1248,06 | BPSK(1)  временное уплотнение | 1023 | 2 | 2 |
|  |  | L2OCp | 1248,06 | BOC(1;1)  временное уплотнение | 10230 | 20 | ~ 2 |
| GPS | L1 | C/A | 1575,42 | BPSK(1) | 1023 | 1 | ~ 1 |
|  | L2 | L2CMd | 1227,6 | BPSK (1)  временное уплотнение | 10230 | 20 | ~ 2 |
|  |  | L2CLp | 1227,6 | BPSK (1)  временное уплотнение | 767250 | 1500 | ~ 2 |
| Galileo | L1 | E1bd | 1575,42 | BOC (1;1)  квадратура | 4092 | 4 | ~ 1 |
|  |  | E1cp | 1575,42 | BOC (1;1)  квадратура | 4092 | 4 | ~ 1 |
|  | L3 | E5b Id | 1207,14 | BPSK(10)  квадратура | 10230 | 1 | ~ 0,1 |
|  |  | E5b Qp | 1207,14 | BPSK(10)  квадратура | 10230 | 1 | ~ 0,1 |
| BeiDou | L1 | B1I | 1561,098 | BPSK(2)  квадратура | 2046 | 1 | ~ 0,5 |
|  | L3 | B2I | 1207,140 | BPSK(2)  квадратура | 2046 | 1 | ~ 0,5 |

### Диапазон поиска сигналов по частоте и по задержке

Для поиска по частоте максимальный диапазон поиска определяется:

- параметрами движения КА относительно НКА ГНСС (скорость изменения расстояния между КА и НКА) (зависит от высоты и наклонения орбиты КА и НКА; от величины ускорения КА при маневрах) (см таблицу 1);

- частотой несущих используемых сигналов ГНСС (см таблицу 2);

- отклонением частоты опорного генератора от номинального значения (качество генератора; условия эксплуатации).

Таблица 3. Максимальные параметры динамики по сигналу

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Параметр** | **Значение** | | | |
|  |  | **Тип орбиты** | | |
|  |  | **НКО 1** | **НКО 2** | **НКО 3** |
| ГНСС | ГЛОНАСС |  |  |  |
| Скорость, м/с |  | 8750 | 8409 | 8106 |
| Ускорение, м/с2 |  | 15,7 | 14,6 | 12,9 |
| Рывок, м/с3 |  | 0,0209 | 0,0189 | 0,0155 |
|  |  |  |  |  |
| ГНСС | GPS |  |  |  |
| Скорость, м/с |  | 8673 | 8281 | 8132 |
| Ускорение, м/с2 |  | 15,2 | 14,0 | 12,9 |
| Рывок, м/с3 |  | 0,0200 | 0,0177 | 0,0153 |
|  |  |  |  |  |
| ГНСС | GALILEO |  |  |  |
| Скорость, м/с |  | 8282 | 7958 | 7741 |
| Ускорение, м/с2 |  | 13,4 | 12,5 | 11,4 |
| Рывок, м/с3 |  | 0,0166 | 0,0150 | 0,0127 |
|  |  |  |  |  |
| ГНСС | BEIDOU |  |  |  |
| Скорость, м/с |  | 8514 | 8129 | 7982 |
| Ускорение, м/с2 |  | 14,5 | 13,4 | 12,3 |
| Рывок, м/с3 |  | 0,0184 | 0,0162 | 0,0140 |

Примечания:

1. НКО1 – МНП расположен на КА с низкой круговой орбитой с высотой 200 км, углом наклонения 98 град;
2. НКО2 – МНП расположен на КА с низкой круговой орбитой с высотой 200 км, углом наклонения 64 град;
3. НКО3 – МНП расположен на КА с низкой круговой орбитой с высотой 600 км, углом наклонения 64 град.

Таблица 4. Максимальный доплеровский сдвиг за счет динамики по сигналу

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **Сигнал** | **Несущая частота, МГц** | **Максимальный доплеровский сдвиг, кГц** | | |
|  |  | **Тип орбиты** | | |
|  |  | **НКО 1** | **НКО 2** | **НКО 3** |
| **ГЛОНАСС** |  |  |  |  |
| L1OF | 1602 + 6 \* 0,5625 | 46,82 | 44,99 | 43,37 |
| L2OF | 1246+ 6\*0,4375 | 36,41 | 34,99 | 33,73 |
| L1OC | 1600,995 | 46,69 | 44,87 | 43,25 |
| L2OC | 1248,06 | 36,40 | 34,98 | 33,72 |
|  |  |  |  |  |
| **GPS** |  |  |  |  |
| L1\_CA | 1575,42 | 45,54 | 43,48 | 42,70 |
| L2C | 1227,6 | 35,48 | 33,88 | 33,27 |
|  |  |  |  |  |
| **GALILEO** |  |  |  |  |
| L1\_E1BC | 1575,42 | 43,49 | 41,79 | 40,65 |
| L3\_E5B | 1207,14 | 33,32 | 32,02 | 31,14 |
|  |  |  |  |  |
| **BEIDOU** |  |  |  |  |
| L1\_B1I | 1561,098 | 44,30 | 42,30 | 41,53 |
| L3\_B2I | 1207,14 | 34,26 | 32,71 | 32,12 |

В качестве опорного генератора используются высокостабильные генераторы с относительным отклонением частоты в процессе длительной эксплуатации на КА не более (2…5)\*10-6. В худшем случае, для максимальной несущей сигналов L1xF, это приводит к дополнительному расширению диапазона поиска по частоте пропорционально несущей частоте на 8 кГц.

При фиксированном шаге анализа по частоте количество шагов в зоне анализа примерно одинаково для всех сигналов одного частотного диапазона (L1, L2 или L3) ГНСС. Для шага анализа по частоте 500 Гц количество шагов анализа по частоте с учетом всех факторов (динамика по сигналу и смещение частоты опорного генератора) приведено в таблица 5.

Таблица 5. Количество шагов анализа по частоте

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | **Количество шагов анализа по частоте** | | |
|  | **Тип орбиты** | | |
| **Сигнал** | **НКО 1** | **НКО 2** | **НКО 3** |
| **ГЛОНАСС** |  |  |  |
| L1OF | 220 | 212 | 206 |
| L2OF | 178 | 172 | 167 |
| L1OC | 219 | 212 | 206 |
| L2OC | 178 | 172 | 167 |
|  |  |  |  |
| **GPS** |  |  |  |
| L1\_CA | 215 | 206 | 203 |
| L2C | 174 | 168 | 166 |
|  |  |  |  |
| **GALILEO** |  |  |  |
| L1\_E1BC | 206 | 200 | 195 |
| L3\_E5B | 166 | 161 | 157 |
|  |  |  |  |
| **BEIDOU** |  |  |  |
| L1\_B1I | 209 | 201 | 198 |
| L3\_B2I | 162 | 155 | 153 |

Для поиска по задержке максимальный диапазон поиска определяется в общем случае неопределенностью по времени и по задержке сигнала. Максимальная неопределенность по времени для периодического ДК определяется периодом его повторения. Период ДК для используемых периодических сигналов приведен в таблице 6.

Шаг анализа по задержке определяется длительностью элемента ДК в принимаемом радиосигнале сигнале ― с учетом вида используемой модуляции. Шаг по времени составляет 0,5 элемента ДК. Используемая для формирования полного сигнала модуляция изменяет длину элементов ДК по сравнению с длиной символа в генераторе ДК (этот параметр обычно задается в ИКД на ГНСС). Коэффициент изменения Км составляет:

- для модуляции BPSK Км\_bpsk=1;

- для модуляции BOC (1,1) Км\_boc=2;

- для временного мультиплексирования двух компонент Км\_time=2.

Таблица 6. Количество точек анализа по задержке на одной частотной позиции

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ГНСС** | **Сигнал** | **Длина кода, символы** | **Км** | **Км общ** | **Длина кода, элементы** | **Общее количество точек анализа** |
| ГЛОНАСС | L1OF | 511 | Км\_bpsk | 1 | 511 | 1022 |
|  | L1OCd | 1023 | Км\_bpsk\* Км\_time | 2 | 2046 | 4092 |
|  | L1OCp | 4092 | Км\_boc\* Км\_time | 4 | 16368 | 32736 |
|  | L2OF | 511 | Км\_bpsk | 1 | 511 | 1022 |
|  | L2OCd | 1023 | Км\_bpsk\* Км\_time | 2 | 2046 | 4092 |
|  | L2OCp | 4092 | Км\_boc\* Км\_time | 4 | 16368 | 32736 |
| GPS | L1\_CA | 1023 | Км\_bpsk | 1 | 1023 | 2046 |
|  | L2CMd | 10230 | Км\_bpsk\* Км\_time | 2 | 20460 | 40920 |
|  | L2CLp | 767250 | Км\_bpsk\* Км\_time | 2 | 1534500 | 3069000 |
| GALILEO | L1\_E1Bd | 4092 | Км\_boc | 2 | 8184 | 16368 |
|  | L1\_E1Cp | 4092 | Км\_boc | 2 | 8184 | 16368 |
|  | L3\_E5Bd | 10230 | Км\_bpsk | 1 | 10230 | 20460 |
|  | L3\_E5Bp | 10230 | Км\_bpsk | 1 | 10230 | 20460 |
| BEIDOU | L1\_B1I | 2046 | Км\_bpsk | 1 | 2046 | 4092 |
|  | L3\_B2I | 2046 | Км\_bpsk | 1 | 2046 | 4092 |

### Аппаратные ресурсы средств поиска сигналов в МНП КН

Продолжительность поиска сигналов зависит от времени анализа в каждой точке области поиска, количества используемых средств поиска, алгоритма поиска.

В рассматриваемых МНП КН разработки фирмы АО КБ НАВИС для поиска могут использоваться средства каналов корреляционной обработки (ККО) и блоки быстрого поиска (ББП).

Каждый ККО может обрабатывать все заданные сигналы и имеет в своем составе 3 коррелятора. Максимальное количество используемых ККО составляет 96.

Каждый ББП является специализированным блоком для ускорения поиска сигналов ГНСС. Он имеет в своем составе 1024 коррелятора, разнесенных по задержке на половину элемента ДК. ББП автоматически проходит шагами диапазон по задержке на одной частотной позиции. По результатам обработки сигнала с заданным временем додетекторного и некогерентного накопления на одном шаге по задержке ББП фиксирует положение одного максимума (частота и задержка) и накопление в этой точке. Если на другой позиции по частоте и/или задержке максимум превышает ранее зафиксированное значение, то ББП заменяет ранее запомненные параметры. При обнаружении сигнала в результате анализа всей частотно-временной области определяется один максимум, превышающий порог обнаружения, который и передается для дальнейшей работы в ККО. Общее количество ББП в МНП КН составляет 4.

Вследствие большого преимущества в количестве анализаторов у ББП для прямого поиска сигналов при холодном старте используется именно он.

### Поиск сигналов при использовании критерия максимума правдоподобия

При таком подходе выполняется анализ всей области поиска, а затем принимается решение об обнаружении сигнала и его положении по частоте и задержке. Сигнал считается обнаруженным, если накопления результатов корреляции в какой-либо точке превысили установленный порог обнаружения. При нескольких точках превышения выбирается точка с максимальным накоплением. Обнаруженный сигнал передается в ККО для дальнейшей работы по нему.

Для обнаружения сигналов с энергопотенциалом более 32 дБГц *(мнение Тихменева)* принято время некогерентного накопления 10 мс при времени додетекторного накопления 1 мс. Оценка продолжительности анализа заданной частотно-временной области для рабочих сигналов приведена в таблице 7. Оценка не учитывает накладные расходы времени на программную поддержку перехода по частотным позициям. Сигналы выставлены в порядке возрастания времени анализа внутри системы.

Время = N\_f \* N\_t \* Тнк / N\_corr / N\_bbp,

где

- N\_f — количество шагов по частоте,

- N\_t — количество шагов по задержке,

- N\_corr — количество корреляторов в составе одного ББП,

- N\_bbp — количество ББП (4).

Таблица 7. Продолжительность анализа заданной частотно-временной области различных сигналов ГНСС

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ГНСС** | **Сигнал** | **Количество шагов ББП при**  **анализе** | | **Время поиска сигнала одного НКА, с** | **Время поиска сигналов всех НКА для одного ББП, с** | **Время поиска сигналов всех НКА для 4-х ББП, с** |
|  |  | **По частоте** | **По задержке** |  |  |  |
| ГЛОНАСС | L2OF | 178 | 0,998 | 1,78 | 24,87 | 6,22 |
|  | L1OF | 220 | 0,998 | 2,20 | 30,74 | 7,68 |
|  | L2OCd | 178 | 3,996 | 7,11 | 170,71 | 42,67 |
|  | L1OCd | 219 | 3,996 | 8,75 | 210,03 | 52,50 |
|  | L2OCp | 178 | 31,968 | 56,90 | 1365,71 | 341,42 |
|  | L1OCp | 219 | 31,968 | 70,01 | 1680,28 | 420,07 |
|  |  |  |  |  |  |  |
| GPS | L1\_CA | 215 | 1,998 | 4,30 | 137,47 | 34,36 |
|  | L2CMd | 174 | 39,960 | 69,53 | 2225,03 | 556,25 |
|  | L2CLp | 174 | 2997,07 | 5214,90 | 166876,88 | 41719,22 |
|  |  |  |  |  |  |  |
| GALILEO | L3\_E5Bd | 158 | 19,980 | 31,57 | 852,37 | 213,09 |
|  | L3\_E5Bp | 158 | 19,980 | 31,57 | 852,37 | 213,09 |
|  | L1\_E1Bd | 206 | 15,984 | 32,93 | 889,05 | 222,26 |
|  | L1\_E1Cp | 206 | 15,984 | 32,93 | 889,05 | 222,26 |
|  |  |  |  |  |  |  |
| BEIDOU | L3\_B2I | 162 | 3,996 | 6,47 | 174,79 | 43,69 |
|  | L1\_B1I | 209 | 3,996 | 8,35 | 225,50 | 56,37 |

Из приведенных данных следует, что прямой поиск по пилот- сигналам не имеет преимуществ перед сигналами с данными. Поэтому они будут исключены из дальнейшего рассмотрения поиска сигналов через ББП при холодном старте.

### Время первого определения параметров движения

Время синхронизации со строковой информацией и время, затраченное на прием необходимого количества строк, содержащих оперативную информацию для решения навигационных задач для рабочих сигналов ГНСС приведено в таблице 8. Для оценки максимального времени первого определения параметров движения будем считать, что необходимая четверка НКА будет найдена только при завершении анализа всей области поиска.

Таблица 8. Продолжительность этапов первого определения параметров движения

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ГНСС** | **Сигнал** | **Продолжительность анализа частотно-временной области для 4 ББП, с** | **Время синхронизации со строковой информацией (период метки времени), с** | **Время на приеме оперативной ЦИ, с** | **Время первого определения, с** |
|  |  |  |  |  |  |
| ГЛОНАСС | L2OF | 6,3 | 2 | 30 | 38,3 |
|  | L1OF | 7,7 | 2 | 30 | 39,7 |
|  | L2OCd | 42,7 | ― | ― | ― |
|  | L1OCd | 52,5 | 2 | 12 | 66,5 |
|  |  |  |  |  |  |
| GPS | L1\_CA | 34,4 | 6 | 30 | 70,4 |
|  | L2CMd | 556,3 | 12 | 60 | 628,3 |
|  |  |  |  |  |  |
| GALILEO | L3\_E5Bd | 213,1 | 2 | 30 | 245,0 |
|  | L1\_E1Bd | 222,3 | 2 | 30 | 254,2 |
|  |  |  |  |  |  |
| BEIDOU | L3\_B2I | 43,7 | 6 | 30 | 79,7 |
|  | L1\_B1I | 56,4 | 6 | 30 | 92,4 |

Примечания:

* + - 1. Для сигнала L2OCd информация в ИКД отсутствует.

2. Старт с низкочастотного диапазона при заданных параметрах накоплений дает выигрыш от 1 до 13 с, кроме GPS.

## Результаты и рекомендации

**Оценка** максимального времени первого определения МНП КН при холодном старте при разных вариантах работы по сигналам ГНСС приведена в таблице 9.

При построении таблицы предполагается:

- аппаратура является двух частотной многосистемной;

- поиск сигналов НКА начинается с более низкочастотного диапазона (кроме GPS) с использованием блоков быстрого поиска (количество используемых блоков быстрого поиска 4 (соответствует текущей аппаратной части));

- сигналы другого частотного диапазона того же НКА ищутся средствами канала корреляционной обработки «по опоре» (в узком диапазоне по пересчитанным параметрам уже найденного сигнала);

- поиск реализован по правилу «максимума правдоподобия» во всей области поиска;

- время когерентного накопления 1 мс;

- время некогерентного накопления 10 мс (соответствует текущим настройкам базового (прототипного) СПО);

- накладные расходы процессорного времени не учтены;

- при работе в комбайне первое навигационное решение выдается по самой быстрой из доступных ГНСС.

Таблица 9. Время первого определения параметров движения

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **ГНСС** | **Время первого определения, с** | | | | |
|  | **Вариант использования ГНСС** | | | | |
| **ГЛОНАСС LxOF / LxOC** | **+** |  |  |  | **+ / +** |
| **GPS** |  | **+** |  |  | **+** |
| **GALILEO** |  |  | **+** |  | **+** |
| **BEIDOU** |  |  |  | **+** | **+** |
|  |  |  |  |  |  |
| **Время первого определения, с** | 39 / 67 | 70 | 245 | 80 | 39 / 67 |

Примечание – для GPS использован старт с высокочастотного диапазона.

### Рекомендации (Сошин М.П.)

* + - 1. Необходимо для текущего СПО экспериментально оценить время поиска сигналов при холодном старте МНП КН на низкой круговой орбите раздельно по ГНСС (предполагаю, что оно неожиданно велико).
      2. Необходимо для текущего СПО экспериментально оценить вероятность пропуска сигналов при холодном старте МНП КН на низкой круговой орбите раздельно по ГНСС (предполагаю, что она чрезмерно велика).
      3. Необходимо рассчитать параметры обнаружителя с приемлемыми значениями и экспериментально их проверить.
      4. Необходимо откорректировать процедуру поиска сигналов с переходом на двухэтапный поиск – для уменьшения среднего времени обнаружения.
      5. Необходимом откорректировать менеджер каналов в части управления поиском при холодном старте (приоритеты использования ГНСС, сигналов, частотных диапазонов; порядок анализа по частоте).

Предварительная качественная оценка нескольких способов уменьшения времени первого определения приведена в таблице 10

Таблица 10. Способы уменьшения времени первого определения

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Способ** | **Достоинства** | **Недостатки** |
| Последовательный поиск по Вальду | Уменьшает время отвержения каждой шумовой позиции | При большом количестве связанных корреляторов не эффективен *(Ипатов В.П.)* |
| Порядок поиска по ГНСС в соответствии со скоростью анализа их сигналов | Последовательный поиск по ГНСС эффективен при работе на открытом небе | Последовательный поиск по ГНСС не эффективен при работе в условиях сильных затенений |
| Порядок работы по частотным диапазонам | Поиск по сигналам низкочастотного диапазона дает уменьшение области по частоте примерно на 20% | Поиск по сигналам низкочастотного диапазона не эффективен для GPS из-за параметров дальномерного кода |
| Двух этапный поиск | Завершение анализа заданной области при обнаружении сигнала сокращает среднее время два раза.  При заданной вероятности пропуска позволяет увеличить вероятность ложной тревоги на первом этапе с уменьшением времени некогерентного накопления. | Усложняет алгоритм поиска |
| Оптимизация перебора по частоте | Уменьшает время анализа на величину до 10% **только** для сигнальной позиции (одна на область поиска). Эффективен для работы только по видимым НКА (теплый и горячий старт) с предельной областью анализа по частоте. | Не уменьшает время анализа для GPS.  Малоэффективен при холодном старте. |
| Выбор оптимального шага по частоте | При заданной вероятности про-пуска уменьшение шага по частоте позволяет увеличить минимальную энергетику сигнала в точке обработке и уменьшить вероятность пропуска | Уменьшение шага по частоте приводит к увеличению количества шагов по частоте |
| … |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

Необходимо выполнить расчеты обнаружителей с улучшениями и выбрать оптимальный вариант реализации поиска для МНП КН.