

УДК: 621.391.8

И. В. БУНЯЕВА

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Украина***АЛГОРИТМ БЫСТРОГО ПОИСКА СИГНАЛОВ В ПРИЕМНИКАХ GNSS**

Выполнен синтез цифрового алгоритма быстрого поиска навигационных сигналов в приёмниках GNSS. Обсуждается архитектура соответствующего устройства быстрого поиска сигналов, а также его возможности в сравнении с традиционными подходами. Показано, что наилучшим, с точки зрения простоты реализации, способом достижения необходимой чувствительности алгоритма является каскадирование когерентного и некогерентного накопления принимаемых сигналов. При этом технически проще установить минимально возможное время когерентного накопления, а необходимую чувствительность обеспечивать некогерентным накоплением

Ключевые слова: навигационный сигнал, GNSS, ДПФ, быстрый поиск.

Введение

Навигационные спутники излучают в L диапазоне сигналы, модулированные псевдослучайными последовательностями (ПСП), которые, в свою очередь, модулированы символами цифровой информации.

Перед началом поиска навигационных сигналов (НС) положение ПСП на оси времени приёмника и сдвиг частоты несущей НС относительно частоты гетеродина приёмника неизвестны.

Задачей аппаратно или программно реализованного в приёмнике GNSS алгоритма быстрого поиска НС состоит в обнаружении НС и максимально быстром определении его параметров.

При поисковом измерении параметров НС удобно оперировать понятием области поиска на плоскости задержка/частота. Площадь этой области во многом определяет структуру алгоритма быстрого поиска, а также его характеристики. Эта площадь пропорциональна произведению длины кода ПСП на интервал неопределённости по частоте, который в свою очередь, равен сумме диапазона доплеровских сдвигов частоты и максимального ухода частоты гетеродина приёмника.

Современный этап развития GNSS характерен как развёртыванием новых систем спутниковой навигации, так и совершенствованием существующих.

Необходимость в уменьшении взаимного влияния НС различных систем, приводит к существенному (в 10 - 20 раз) увеличению длины используемых в новых НС кодов. Пропорционально возрастают и требования к быстродействию устройств поиска НС.

Существует также довольно широкий класс потребителей информации GNSS, критичных к време-

ни получения первого навигационного отсчёта после включения соответствующей аппаратуры (космические аппараты, ракеты с контейнерным стартом и т.п.) [1 – 3].

Целью данной работы является разработка эффективного алгоритма быстрого поиска НС.

Постановка задачи

Основной операцией при обнаружении сигнала является формирование комплексного корреляционного интеграла $\dot{Y}(k\Delta\tau, l\Delta f)$ для всех значений $(k\Delta\tau, l\Delta f)$ из области поиска

$$k = \overline{1, K}; l = \overline{-L, L},$$

где $k\Delta\tau$ – длина ПСП,

$2F = 2L\Delta f$ – интервал неопределённости по частоте,

$\Delta\tau$ - шаг дискретизации по задержке,

Δf - по частоте.

$$\dot{Y}(k\Delta\tau, l\Delta f) = \int_T \dot{u}(t)P(t - k\Delta\tau) \exp(j2\pi l\Delta f t) dt, \quad (1)$$

где $\dot{u}(t)$ - принимаемая смесь сигнала с шумом,

$P(t)$ – известная ПСП, длина которой определяется типом НС и периодом T .

Длина ПСП для системы GPS, например, равна 1023 для НС L1 C/A, 10230 для НС L5, 20460 для НС L2C.

Близкие характеристики имеют НС и других навигационных систем. Кроме того в (1) не учиты-

вается деформация огибающей сигнала за счёт эффекта Доплера.

Процедура поиска предполагает формирование комплексного корреляционного интеграла для всех возможных значений параметров опорного сигнала, являющегося копией принимаемого НС. Далее определяется максимальное значение модуля (или квадрата модуля) $Z(k\Delta\tau, l\Delta f) = |\dot{Y}(k\Delta\tau, l\Delta f)|$ комплексного корреляционного интеграла и сравнивается с заранее определённым порогом.

Обычно поиск в навигационных приемниках выполняется последовательным «просмотром» всех допустимых значений параметров сигнала. Каждая пара значений задержка/частота определяет координаты т.н. «ячейки» поиска.

Используемый обычно размер ячейки поиска (шаги дискретизации выходного эффекта устройства поиска по задержке и частоте) составляет 0,5 длительности символа ПСП на $1/2T$, где T – время когерентного накопления сигнала в каждой ячейке поиска. Обычно $T = 1$ мс, соответственно $1/2T = 500$ Гц.

Время, в течение которого происходит формирование каждого значения выходного эффекта $Z(k\Delta\tau, l\Delta f)$ (интервал принятия решения), определяет чувствительность алгоритма, т.е. минимальное значение мощности сигнала, при котором он может быть обнаружен.

Это очень важный параметр алгоритма поиска НС. Чем больше интервал принятия решения, тем выше чувствительность алгоритма.

Однако увеличение этого интервала быстро приводит к неприемлемым значениям времени поиска из-за чрезвычайно большого числа ячеек поиска.

В частности, при непосредственном поиске НС L5 с длиной ПСП, равной $P = 10230$ элемента, в типовой полосе частот $2F = 10$ кГц размер области поиска составляет 409200 ячеек. Даже при величине интервала принятия решения 1 мс, время сканирования всей области поиска превысит 409 сек.

Такие значения времени захвата НС и связанного с ним времени получения первого навигационного отсчёта неприемлемы для большинства приложений.

Сказанное стимулирует разработку эффективных алгоритмов и устройств быстрого поиска НС.

Алгоритм быстрого поиска сигналов

Преимуществом последовательного способа поиска НС является его простота – для его реализации не требуются дополнительные устройства. Для поиска обычно используются корреляторы, входящие в состав петель слежения за параметрами НС.

Недостаток этого способа, как уже отмечалось, большое время поиска.

Техника быстрого параллельного поиска разрабатывалась для обнаружения с высокой чувствительностью С/А кода GPS и непосредственного поиска Р кода GPS [1, 2, 4].

При этом значения корреляционного интеграла рассчитываются одновременно для всех ячеек поиска с помощью соответствующего устройства.

Стандартным решением при программной реализации алгоритма поиска в сигнальном процессоре является вычисление корреляции в частотной области с использованием кольцевой свёртки [3].

При аппаратной реализации этого алгоритма популярно использование банка корреляторов, количество которых равно размеру области поиска [5]. Однако такое решение связано с большими аппаратными затратами и увеличением энергопотребления устройства.

Для получения простого в реализации и быстродействующего алгоритма поиска НС удобно представить формулу (1) в следующем виде

$$\begin{aligned} |\dot{Y}(k\Delta\tau, l\Delta f)| &= \sum_{m=1}^M \dot{y}_m(k\Delta\tau) \exp(j2\pi l m \Delta f \Delta T) = \\ &= \sum_{m=1}^M \dot{y}_m(k\Delta\tau) \exp(j2\pi l m / M), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\dot{y}_m(k\Delta\tau)$ – результат свёртки принимаемого колебания с отрезком ПСП длиной ΔT :

$$\dot{y}_m(k\Delta\tau) = \int_{(m-1)\Delta T}^{m\Delta T} \dot{u}(t + k\Delta\tau) P(t), \quad m = \overline{1, M}. \quad (3)$$

Величина ΔT выбирается из условия $l\Delta f \Delta T = L\Delta T / 2T \leq 1/8$, позволяющего пренебречь изменением фазы опорного сигнала на интервале времени ΔT .

Из этого условия, в частности, следует, что

$$M = 4L. \quad (4)$$

Вычисления по формуле (3) выполняются в дискретном виде, когда непрерывный сигнал $\dot{u}(t)$ представлен на интервале обработки своими отсчётами $\dot{u}(n\Delta t)$, а интеграл в (3) – соответствующей суммой:

$$\begin{aligned} \dot{y}_m(k\Delta\tau) &= \sum_{n=(m-1)N}^{mN} \dot{u}(n\Delta t + k\Delta\tau) P(n\Delta t), \\ & \quad m = \overline{1, M}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $N = \Delta T / \Delta t$ – число отсчётов сигнала, умещающихся на интервале времени ΔT .

Содержанием соотношения (2) является дискретное преобразование Фурье (ДПФ) отсчётов $\dot{y}_m(k\Delta\tau)$.

Для соответствующих вычислений обычно используют алгоритмы быстрого преобразования Фурье (БПФ). Практическая реализация вычислений по формуле (5) упрощается, если шаги дискретизации Δt выходного эффекта и обрабатываемой реализации $\Delta\tau$ выбрать одинаковыми.

При этом формула (5) примет вид, удобный для реализации:

$$\dot{y}_m(k\Delta\tau) = \sum_{n=(m-1)N}^{mN} \dot{y}((n+k)\Delta\tau)P(n\Delta\tau), \quad m=\overline{1, M}, \quad (6)$$

Далее выполняется ДПФ отсчётов $\dot{y}_m(k\Delta\tau)$, формирование модуля комплексного корреляционного интеграла:

$$Z(k\Delta\tau, l\Delta f) = |\dot{Y}(k\Delta\tau, l\Delta f)| \quad (7)$$

и сравнение его с заранее выбранным порогом.

Отметим, что часто для достижения необходимой чувствительности алгоритма сигнал необходимо накапливать в течение интервала времени, существенно превосходящего период ПСП (1 мс).

При этом расширение интервала когерентного накопления наталкивается на определённые трудности, связанные с наличием дополнительной модуляции ПСП символами цифровой информации.

Кроме того, увеличение этого интервала приводит к пропорциональному увеличению размера (2L) зоны поиска в частотной области и, значит, усложнению реализующему алгоритму быстрого поиска устройства.

Альтернативой является некогерентное накопление значений $Z(k\Delta\tau, l\Delta f)$. В этом случае размер зоны поиска в частотной области остаётся неизменным, однако отношение сигнал/шум, а, значит, и чувствительность по мере увеличения интервала некогерентного накопления нарастает медленнее.

В частности, для увеличения отношения сигнал/шум на 3 дБ необходимо либо удвоить интервал когерентного накопления, либо же в три раза увеличить интервал некогерентного накопления.

В условиях действия только тепловых шумов, технически проще установить минимально возможное время когерентного накопления, а необходимую чувствительность обеспечивать некогерентным накоплением.

Интервал когерентного накопления не может быть меньше периода ПСП (1 мс). Как правило, его

устанавливают именно таким. При этом размер зоны поиска оказывается минимально возможным, а устройство поиска навигационных сигналов – максимально простым.

Функциональная схема такого устройства, ориентированная на его реализацию в программируемой матрице (FPGA) представлена на рис. 1.

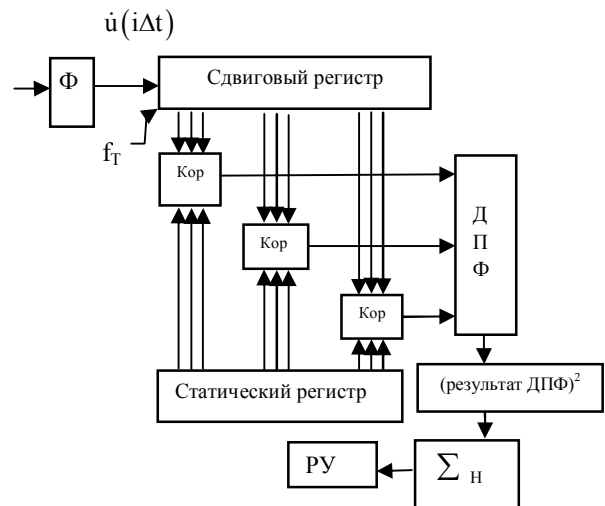


Рис. 1. Функциональная схема устройства быстрого поиска сигналов GNSS

Устройство быстрого поиска работает следующим образом. Отсчёты принимаемого колебания $\dot{u}(i\Delta t)$ поступают с выхода фильтра Φ , согласованного с длительностью символа принимаемой ПСП с шагом $\Delta\tau$, соответствующим интервалу дискретизации выходного эффекта $Z(k\Delta\tau, l\Delta f)$ по задержке, и поступают в сдвиговый регистр с отводами.

Количество отводов равно $T/\Delta\tau$ (минимум 1023 для сигналов GPS и 511 для сигналов ГЛОНАСС).

Статический регистр хранит опорную ПСП и имеет такое же количество отводов, как и сдвиговый регистр. Отводы каждого регистра разбиваются на M групп и в комплексных корреляторах (Кор) вычисляются интегралы свёртки (3). Далее с шагом по времени $\Delta\tau$ выполняется ДПФ (2).

Таким образом, за время, равное интервалу T когерентного накопления, формируются отсчёты выходного эффекта для всей зоны поиска по частоте и задержке.

При этом все ячейки зоны поиска просматриваются одновременно, что эквивалентно использованию нескольких сот тысяч корреляторов, работающих параллельно. Отметим, что в предлагаемом устройстве аппаратные затраты оказываются на три – четыре порядка меньшими при том же быстродействии.

Кроме когерентного, в устройстве быстрого поиска, предусмотрено также и некогерентное накопление принимаемого сигнала.

Некогерентное накопление реализуется блоком \sum_N накопительного сумматора.

В решающем устройстве (РУ) выполняется поиск максимального значения выходного эффекта и сравнение его с некоторым порогом.

В случае превышения порога координаты максимума (грубые значения запаздывания и частоты навигационного сигнала) передаются для настройки соответствующего канала слежения за параметрами этого сигнала.

Пороговое отношение сигнал/шум при параллельном поиске сигнала определяется соотношением [6]:

$$\mu_{\text{пор}} = 13,5 \lg R, \quad (8)$$

где $R = 2P(4FT)$ - размер области поиска.

В качестве примера рассмотрим устройство быстрого поиска навигационных сигналов приёмника сигналов GNSS, предназначенного для установки на низкоорбитальном космическом аппарате (КА).

Учитывая, что скорость движения КА равна примерно 7,5 км/с, диапазон неопределённости по частоте не превысит $2F = 80\text{кГц}$.

Легко найти, что размер зоны поиска НС по частоте и запаздыванию для сигнала C/A системы GPS $R=P(4FT)= 327360$. Соответственно пороговое отношение сигнал/шум $\mu_{\text{пор}} = 19\text{дБ}$.

Для надёжного захвата навигационного сигнала отношение сигнал/шум на входе решающего устройства должно превышать найденную величину.

При энергетическом потенциале 40 дБГц отношение сигнал/шум на выходе когерентного накопителя составит 10 дБ и для надёжного обнаружения сигналов GPS потребуется не менее 27 циклов некогерентного накопления. Т.е. время поиска сигнала GPS предложенным алгоритмом составит 27 мс.

Отметим, время поиска навигационного сигнала типовым одноканальным устройством поиска превышает, в этом случае, 300 сек.

Заключение

В данной статье синтезирован простой в реализации алгоритм быстрого, параллельного поиска навигационных сигналов GNSS и рассмотрены пути его практической реализации.

По сравнению с типовыми устройствами быстрого поиска навигационных сигналов, полученный алгоритм существенно проще в реализации при том же быстродействии.

Показано, что наилучшим, с точки зрения простоты реализации, способом достижения необходимой чувствительности алгоритма является каскадирование когерентного и некогерентного накопления принимаемых сигналов.

Причём интервал когерентного накопления целесообразно выбирать равным длительности ПСП, а необходимая чувствительность обеспечивать за счёт последующего некогерентного накопления выходного эффекта.

Область применения полученного в статье алгоритма – приёмники GNSS для потребителей, критичных к времени получения первого навигационного отсчёта после включения соответствующей аппаратуры (космические аппараты, ракеты с контейнерным стартом и т.п.).

Литература

1. Kaplan, D. *Understanding GPS: Principles and applications [Text]* / D. Kaplan, C. J. Hegarty // *GNSS Technology and Applications Series*. – 2nd edition. – Artech House, 2005. – 703 p.
2. Eerola, V. *Rapid Parallel GPS Signal Acquisition [Text]* / V. Eerola // *Proceedings of ION GPS 2000/19-22 September 2000*. – Salt Lake City, UT, 2000. – P. 810-816.
3. Leclère, J. *Acquisition of modern GNSS signals using a modified parallel code-phase search architecture [Text]* / J. Leclère, C. Botteron, P.-A. Farine // *Signal Processing*. – February 2014. – No. 95(0). – P. 177–191.
4. Chang, C. L. *Application of Genetic Control with Adaptive Scaling Scheme to Signal Acquisition in Global Navigation Satellite System Receiver [Text]* / C. L. Chang, H. N. Shou // *Algorithms*. – 2012. – T. 5, № 1. – С. 56-75.
5. *Fast signal acquisition technology for new GPS/Galileo receivers [Text]* / W. De Wilde, J. M. Slewaegeen, A. Simsky, J. Van Hees, C. Vandewiele, E. Peeters, J. Grauwen, F. Boon // *Proc. of IEEE/ION PLANS'06*. – San Diego, CA, USA, Apr. 2006. – С. 1074–1079.
6. Фалькович, С. Е. *Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст]* / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.

References

1. Kaplan, D., Hegarty, C. J. *Understanding GPS: Principles and applications. GNSS Technology and Applications Series*. Artech House, 2nd edition, 2005. 703 p.

2. Eerola, V. Rapid Parallel GPS Signal Acquisition. *Proceedings of ION GPS 2000*, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, 2000, pp. 810-816.

3. Leclère, J., Botteron, C., Farine, P.-A. Acquisition of modern GNSS signals using a modified parallel code-phase search architecture. *Signal Processing*, February 2014, no. 95(0), pp. 177–191.

4. Chang, C. L., Shou, H. N. Application of Genetic Control with Adaptive Scaling Scheme to Signal Acquisition in Global Navigation Satellite System Re-

ceiver. *Algorithms*, 2012, t. 5, no. 1, pp. 56-75.

5. De Wilde, W., Sleewaegen, J. M., Simsky, A., Van Hees, J., Vandewiele, C., Peeters, E., Grauwen, J., Boon, F. Fast signal acquisition technology for new GPS/Galileo receivers. *Proc. of IEEE/ION PLANS'06*, San Diego, CA, USA, 2006, pp. 1074–1079.

6. Fal'kovich, S. E., Khomyakov, E. N. *Statisticheskaya teoriya izmeritel'nykh radiosistem* [Statistical theory of measuring radio]. Moscow, Radio and Communications Publ., 1981. 288 p.

Поступила в редакцію 1.09.2015, рассмотрена на редколлегии 18.02.2016

АЛГОРИТМ ШВИДКОГО ПОШУКУ СИГНАЛІВ В ПРИЙМАЧАХ GNSS

I. V. Буняєва

Виконано синтез цифрового алгоритму швидкого пошуку навігаційних сигналів в приймачах GNSS. Обговорюється архітектура відповідного пристрою швидкого пошуку сигналів, а також його можливості в порівнянні з традиційними підходами. Показано, що найкращим, з точки зору простоти реалізації, способом досягнення необхідної чутливості алгоритму є каскадування когерентного і некогерентного накопичення прийнятих сигналів. При цьому технічно простіше встановити мінімально можливий час когерентного накопичення, а необхідну чутливість забезпечувати некогерентним накопиченням.

Ключеві слова: устрйоство быстрого поиска, навигационный сигнал, GNSS, ДПФ.

SIGNALS FAST ACQUISITION ALGORITHM FOR GNSS RECEIVERS

I. V. Bunyayeva

The synthesis of digital algorithm for fast search of navigation signals in GNSS is accomplished. The architecture of the corresponding device for quick search of signals is discussed, as well as its capabilities in comparison with traditional approaches. It is proved, that the best method of achieving the required sensitivity of the algorithm (in view of the simplicity of implementation) is a cascade of coherent and non-coherent accumulation of the received signals. At the same time, it is technically easier to set the minimal possible time of the coherent accumulation, and the necessary sensitivity is to be achieved with the help of the non-coherent accumulation.

Key words: fast acquisition engine, navigation signal, GNSS, DFT.

Буняєва Ирина Владимировна – канд. техн. наук, доцент кафедри теоретической механики, машиноведения и роботомеханических систем, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Харьков, Украина, e-mail: irinabunayeva@mail.ru.

Bunayeva Irina Vladimirovna – Candidate of Technical Science, Assistant Professor of Dept. of Theoretical Mechanics, Engineering and Robotic Systems, National Aerospace University named after N. Ye. Zhukovsky “KhAI”, Kharkov, Ukraine, e-mail: irinabunayeva@mail.ru.