

БЫСТРЫЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА И СЛЕЖЕНИЯ ЗА СПУТНИКОВЫМИ НАВИГАЦИОННЫМИ РАДИОСИГНАЛАМИ В ПРОГРАММНО РЕАЛИЗОВАННОМ ПРИЕМНИКЕ

Кириллов С.Н., Бахурин С.А., Слесарев А.С.

Рязанская государственная радиотехническая академия, e-mail:snk@rinfotels.ru.

Большинство существующих приемников сетевых радионавигационных спутниковых систем (СРНСС) решают задачу первичной обработки с помощью аппаратно реализованных корреляторов [1]. Такой подход позволяет вести корреляционную обработку в режиме реального времени, но обладает рядом недостатков: необходимость использования специализированных микросхем, значительный рост аппаратных затрат при увеличении числа каналов, невозможность программной модернизации при изменении параметров спутниковых радиосигналов и введении в эксплуатацию новых спутниковых радионавигационных систем. Поэтому наблюдается растущий интерес к приемникам, осуществляющим обработку навигационных сигналов полностью программными средствами [2]. Современные приемники СРНСС имеют 12 каналов и более, и при использовании аппаратных корреляторов все каналы обрабатываются одновременно за счет распараллеливания. В программно реализованном приемнике сигналы различных спутников анализируются последовательно одним процессором, поэтому основной проблемой при разработке таких устройств является недостаточное быстродействие существующих микропроцессоров, что не позволяет вести обработку сигналов в режиме реального времени с использованием алгоритмов, применяемых в аппаратно реализованных приемниках.

Существуют два основных подхода к разработке программно реализованных приемников. Первый состоит в использовании процедур первичной обработки, являющихся глубокой модернизацией алгоритмов, применяемых в аппаратных приемных устройствах. Недостатком данного подхода является то, что необходимая скорость корреляционной обработки достигается только за счет использования особенностей архитектуры и команд конкретного процессора и операционной системы. Это затрудняет разработку алгоритма, пригодного для работы с широким классом процессоров, что существенно ограничивает выбор платформы для программной реализации приемника. Второй подход, подробно рассматриваемый в данной работе, заключается в использовании взаимной корреляционной функции, вычисляемой с помощью быстрых алгоритмов циклической свертки [3].

Алгоритм первичной обработки навигационного радиосигнала состоит из трех этапов: поиск, захват и слежение. При осуществлении «холодного старта» приемного устройства, то есть при отсутствии априорной информации о положении навигационных спутников в данный момент времени (альманаха системы), должен быть найден сигнал любого спутника в частотно-временной области, после чего за время суперкадра (2,5 мин в СРНСС ГЛОНАСС и 12,5 мин в GPS) может быть получена информация об эфемерисах всех спутников данной СРНСС. Таким образом, время «холодного старта» полностью определяется периодом суперкадра.

Проводились экспериментальные исследования алгоритма обнаружения спутникового навигационного радиосигнала ГЛОНАСС на основе взаимной корреляционной функции, функционирующего следующим образом. Реализация входного сигнала на промежуточной частоте, продискретизированная одноразрядным аналого-цифровым преобразователем, записывается в регистр памяти. Далее с помощью быстрого преобразования Фурье вычислялись взаимные корреляционные функции этой последовательности с 11 различными последовательностями, представляющими собой хранимые в памяти приемника копии навигационного радиосигнала на промежуточной частоте с различными доплеровскими сдвигами. Доплеровские добавки частоты копий сигнала отличались на 2 кГц, охватывая требуемый диапазон $-10...+10$ кГц. После этого искался глобальный максимум среди всех отсчетов 11 взаимных корреляционных функций. Значение найденного максимума сравнивалось с порогом. Если максимум оказывался ниже порога, то принималась новая реализация входного сигнала, и взаимные корреляционные функции вычислялись заново. Если же порог был превышен, то считалось, что сигнал обнаружен. В этом случае по номеру корреляционной функции предварительно определялся доплеровский сдвиг частоты навигационного спутника, а по номеру отсчета – примерное значение псевдодальности.

При проведении экспериментальных исследований сигнал с выхода аналого-цифрового преобразователя радиочастотной части моделировался следующим образом. Гармонический сигнал с частотой 2 МГц и единичной амплитудой подвергался фазовой манипуляции псевдослучайной последовательностью, представляющей собой дальномерный код СРНСС ГЛОНАСС (M-последовательность, снимаемая с 7-го разряда 9-разрядного регистра сдвига, которому соответствует образующий полином вида $G(x) = 1 + x^5 + x^9$). Аналоговые отсчеты полученного сигнала, взятые с частотой 16,383 МГц (чтобы число отсчетов реализации было равно целой степени двойки), суммировались с отсчетами белого гауссовского шума с нулевым матожиданием и дисперсией, обеспечивающей заданное отношение сигнал-шум. Для расчетов бралось максимальное значение отношения сигнал-шум, равное -20 дБ. Суммарный сигнал клипировался, чем моделировалось действие одноразрядного АЦП. Копии

навигационного радиосигнала с различными доплеровскими смещениями моделировались аналогично, но без суммирования с отсчетами шума.

Усреднением по 100 реализациям белого гауссовского шума были вычислены вероятностные характеристики рассмотренной процедуры обнаружения.

Вероятностью правильного обнаружения $P_{\text{прав. обн}}$ называется вероятность превышения порога при наличии навигационного радиосигнала. Вероятностью правильного измерения $P_{\text{пр. изм}}$ называется вероятность того, что

$$F_{\text{доп } i} - 1\text{кГц} \leq F_{\text{доп. ист}} < F_{\text{доп } i} + 1\text{кГц},$$

где $F_{\text{доп. ист}}$ – истинное доплеровское смещение спутникового навигационного радиосигнала; i – номер взаимной корреляционной функции, имеющей максимальный пик; $F_{\text{доп } i}$ – доплеровская добавка частоты i -го эталонного сигнала. В соответствии с теоремой перемножения вероятностей, вероятность того, что в процессе поиска спутниковый навигационный радиосигнал будет обнаружен, и его доплеровское смещение измерено правильно, равна:

$$P_{\text{пр}} = P_{\text{пр. обн}} \cdot P_{\text{пр. изм}}.$$

При снижении порога $P_{\text{пр. обн}}$ растет, а $P_{\text{пр. изм}}$ снижается.

Вероятностью ложного измерения оценивалась по формуле

$$P_{\text{ложн. изм}} = 1 - P_{\text{пр. изм}}.$$

Вероятностью ложной тревоги $P_{\text{ложн. тр}}$ называется вероятность превышения порога при отсутствии сигнала (принимается только шум).

Значение порога выбирается, исходя из вероятности ложного измерения, так как после ложного измерения запускается процедура захвата, и проходит определенное время, прежде чем будет принято решение о невозможности захвата и возврату к процедуре поиска. Снижение же $P_{\text{пр. обн}}$ при уменьшении $P_{\text{ложн. изм}}$ путем повышения порога не приводит к большим временным затратам, потому что при отсутствии превышения порога сразу же происходит возобновление поиска.

На рисунке 1 приведена зависимость вероятности $P_{\text{ложн}} = P_{\text{пр. обн}} \cdot P_{\text{ложн. изм}}$ от величины $S_{\text{пор}}$ порога. Как видно, при $S_{\text{пор}} = 700$ резкое уменьшение $P_{\text{ложн}}$ прекращается, и дальнейшее увеличение $S_{\text{пор}}$ не приводит к существенному снижению $P_{\text{ложн}}$.

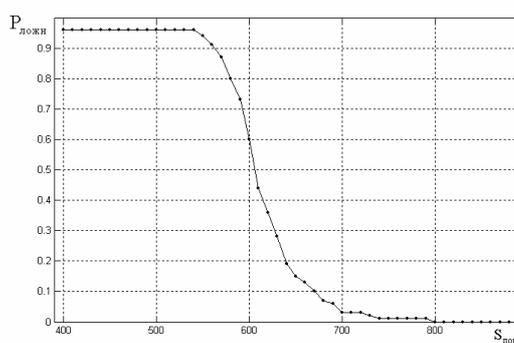


Рис. 1

На рис. 2 приведены зависимости ширины полосы доплеровских сдвигов частоты, в которой не менее 0,9 и 0,8 соответственно, от величины порога. Из графиков следует, что при выбранном значении ширина полосы доплеровских сдвигов уменьшается не более, чем на 20% по отношению к своему максимальному значению.

Кириллов С.Н., Вазулин С.А., Слесарев А.С.

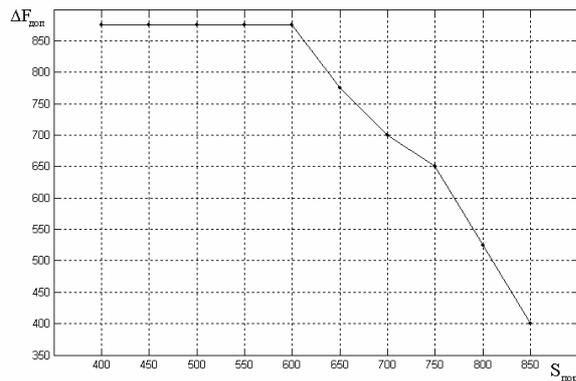


Рис. 2

На рис. 3 изображена зависимость от доплеровского сдвига частоты навигационного радиосигнала при.

Видно, что лишь в половине диапазона обеспечивается обнаружение и правильное измерение с достаточно большой вероятностью. Поэтому для обеспечения высокой во всем диапазоне можно применять следующий алгоритм поиска. Вычисляются 11 взаимных корреляционных функций принятой реализации и набора эталонных сигналов, сдвинутых на 2 кГц по частоте. Если произошло превышение порога, то производится измерение доплеровского сдвига, после чего начинается процедура захвата. Если же обнаружения не произошло, то вычисляются 11 взаимных корреляционных функций этой же входной реализации с другим набором эталонных сигналов, сдвинутых на 1 кГц относительно сигналов первого набора. Этим обеспечивается высокая вероятность во всем диапазоне при малом значении $P_{ложн}$

Чтобы произошел захват сигнала по временному положению, необходимо, чтобы в результате процедуры поиска псевдодальность определялась с ошибкой, не превышающей ширину апертуры временного дискретизатора. Обычно ширина апертуры временного дискретизатора равна удвоенной длительности элемента псевдослучайной последовательности, что при частоте дискретизации, равной 16,383 МГц, соответствует примерно 64 временным отсчетам. В результате моделирования было установлено, что в диапазоне доплеровских сдвигов частоты, соответствующем максимальной, среднеквадратическое отклонение измеренной в результате процедуры поиска псевдодальности от истинного значения не превышает 5 отсчетов, что позволяет произвести захват сигнала. При больших среднеквадратическое отклонение во много раз превышает ширину апертуры временного дискретизатора, но вследствие малой вероятности обнаружения при таких подобные ситуации будут достаточно редки.

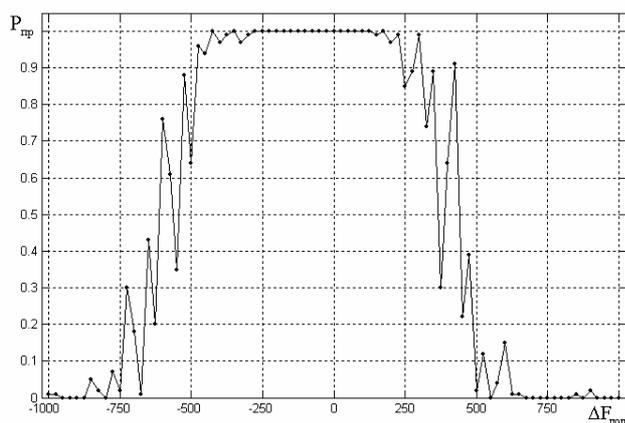


Рис. 3

При помощи моделирования была определена вероятность ложной тревоги для. Для этого производились вычисления взаимной корреляционной функции эталонного сигнала с 1млн. реализаций белого гауссовского шума с заданной дисперсией, и при этом фиксировалось количество превышений порога. В результате была получена вероятность ложной тревоги не более 0,001, что значительно меньше вероятности ложного измерения.

Таким образом, показано, что возможна программная реализация приемника спутниковых радионавигационных сигналов на основе взаимной корреляционной функции. При этом обеспечивается вероятность правильного измерения не хуже 0,9 и вероятность ложной тревоги не более 0,001. Возможно

дальнейшее улучшение характеристик обнаружения за счет повышения разрядности аналого-цифрового преобразователя или увеличения частоты дискретизации. Увеличение времени обработки не повлияет на ход процедуры захвата, так как псевдодальность до спутника изменяется линейно в течение примерно 30 секунд, и легко предсказать значение псевдодальности в любой момент этого промежутка времени.

Литература

- 1 Глобальная спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС. / Под ред. Харисова В.Н., Перова А.И., Болдина В.А. – М.: ИПРЖР, 1998. – 400 с.
- 2 Yang C. FFT Acquisition of Periodic, Aperiodic, Puncture, and Overlaid Code Sequences in GPS. // ION GPS 2001, 11-14 September 2001, Salt Lake City, UT, pp. 137–147. <http://www.gps-ttff.tripod.com/acq.htm>
- 3 Блейхут Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. – М.: Мир, 1989. – 448 с.

