

УДК 621.391.8:629.056.8

АНАЛИЗ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ПРИЁМНИКА СПУТНИКОВЫХ СИГНАЛОВ ПОСТРОЕННОГО ПО СИЛЬНО СВЯЗАННОЙ СХЕМЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ

А.А. САНЬКО, М.А. БАСОВ, Т.М. КИЛЕЕВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Беларусь)

E-mail: nimiz75@mail.ru

Аннотация. В работе представлены результаты исследования помехоустойчивости ГНСС-приемника, реализованного на основе сильно связанной архитектуры комплексирования. Установлено, что применение данной схемы позволяет существенно минимизировать время априорного поиска навигационных сигналов и обеспечить сохранение работоспособности системы в условиях интенсивного воздействия широкополосных помех.

Abstract. The paper presents the results of a study on the noise immunity of a GNSS receiver based on a tightly coupled integration architecture. It is established that the application of this scheme significantly minimizes the a priori search time for navigation signals and ensures the system's operational stability under conditions of intensive broadband interference

Введение

Обеспечение требуемых показателей точности и достоверности навигационных решений накладывает жёсткие ограничения на характеристики бортового оборудования высокоманевренных объектов. В современной практике решение данной задачи базируется на создании интегрированных навигационных систем, объединяющих возможности инерциальных (ИНС) и спутниковых (СНС) навигационных систем.

Синтез робастных алгоритмов навигации становится критически необходимым в условиях сложной помеховой обстановки, сопровождающейся деградацией созвездия СНС, когда число видимых навигационных космических спутников становится меньше минимально требуемого (менее четырех), что делает невозможным получение навигационного решения традиционными методами.

Синергетический эффект интеграции ИНС и СНС в составе комплексной навигационной системы (КНС) обусловлен различной физической природой используемых методов и их комплементарными характеристиками. Реализация алгоритмов совместной обработки избыточной информации позволяет обеспечить динамическую калибровку и компенсацию дрейфов ИНС. Одновременно с этим достигается повышение помехозащищенности и достоверности навигационных решений за счёт статистической фильтрации измерительных шумов, оценивания систематических погрешностей ГНСС-приемника и высокой частоты экстраполяции навигационных параметров [1, 2]. Кроме того, архитектура КНС гарантирует непрерывность навигационного обеспечения в условиях нестабильного приёма сигналов СНС, включая периоды их кратковременного пропадания или функционирования по неполному созвездию [3]. Одним из основных элементов системы КНС является ГНСС-приемник, работающий по слабо связанной или сильно связанной схеме комплексирования.

Постановка задачи

В данной работе ставилась задача по синтезу математической модели ГНСС-приемника диапазона L1 GPS, функционирующего в составе сильно связанной архитектуры КНС, а также количественной оценки его помехоустойчивости при воздействии интенсивных широкополосных помех и времени перезахвата спутника.

Решение задачи

Имитационная модель ГНСС-приемника диапазона L1 GPS реализована в программной среде *MATLAB/Simulink* с применением специализированных библиотек *Navigation Toolbox* и *Satellite Communications Toolbox*, что позволило обеспечить высокую достоверность моделирования процессов обработки сигналов в сильно связанной архитектуре КНС.

Формируемые навигационные сигналы моделировались, как аддитивная смесь компонентов на основе структуры сообщения LNAV. В качестве параметров моделирования приняты: тактовая частота C/A-кода (1,023 МГц), P-кода (10,23 МГц), частота дискретизации (38,192 МГц), несущая частота (1575,42 МГц).

В ходе исследования проводилось имитационное моделирование работы приёмника ГНСС при воздействии широкополосной заградительной помехи. Ниже представлены ключевые характеристики моделирования и **настройки тракта первичной обработки:**

Параметры опорного тракта: Тактирование узлов приёмника осуществлялось от имитируемого высокостабильного опорного генератора с номинальной частотой 10 МГц. Системная задержка, обусловленная временем обработки данных в цифровом тракте, составляла 2 мс.

Режимы накопления сигнала: Время когерентного накопления 1 мс, что соответствует длительности одного цикла ПСП (С/А-код). Суммарное время накопления составляло 20 мс, что позволило повысить энергетический потенциал при поиске слабых сигналов.

Процедура поиска в частотной области: Диапазон неопределённости по доплеровскому смещению частоты ± 10 кГц. Дискретизация частотного пространства (шаг поиска) варьировался в пределах 250 и 500 Гц (справочно: для сигналов L1 С/А, шаг поиска в частотном диапазоне составляет 500 Гц или 250 Гц).

Критерий обнаружения сигнала: Принятие решения о наличии полезного сигнала в канале коррелятора осуществлялось по пороговому правилу. Порог обнаружения устанавливался исходя из условия превышения уровня $SNR_k \geq 1$, где SNR_k представляет собой нормированное отношение амплитуды максимального корреляционного пика к среднеквадратическому отклонению (СКО) шума, рассчитанному в заданном частотном диапазоне поиска.

Параметры сигнально-помеховой смеси:

Спутниковая группировка: Моделировалось созвездие из 4-х космических аппаратов, обеспечивающее минимально необходимый геометрический фактор для решения навигационной задачи.

Шумовой фон: Уровень собственной тепловой мощности шума приёмного тракта был принят на уровне -130 дБВт.

Входное отношение сигнал/шум SNR_{vx} : С учётом воздействия внешних дестабилизирующих факторов, отношение мощности сигнала к мощности помехи на выходе антенной системы варьировалось в диапазоне от -5 до -30 дБ.

Модель помеховой обстановки: Дegrадирующее воздействие имитировалось путём наложения широкополосной заградительной помехи, представляющей собой аддитивный белый гауссовский шум (AWGN) с управляемой спектральной плотностью мощности. Данный подход позволил воспроизвести условия эксплуатации приёмника в сложной электромагнитной обстановке при воздействии интенсивных шумовых помех. Данная конфигурация позволяет адекватно оценить помехоустойчивость алгоритмов поиска и слежения в условиях интенсивного шумового противодействия, характерного для применения средств РЭБ или преднамеренных помех.

Процедура поиска была реализована на основе алгоритма параллельного кодово-фазового поиска с применением быстрого преобразования Фурье. Данный подход позволяет осуществлять анализ всей области частотной неопределённости в рамках одного цикла накопления данных, что существенно сокращает вычислительные затраты по сравнению с последовательным методом.

На рис. 1 приведены результаты имитационного моделирования работы приёмника, реализующего слабосвязанную схему комплексирования (при стандартном диапазоне частотного поиска ± 10 кГц). Анализ полученных данных показывает, что критический порог функционирования достигается при снижении входного отношения сигнал/шум до уровня -25 (-26) дБ, в данных условиях алгоритм поиска не обеспечивает захват минимально необходимого созвездия НС. Математическое ожидание времени поиска при шаге дискретизации частот $\Delta f = 500$ Гц, составило $T_p = 4$ с, в то время как детализация шага до $\Delta f = 250$ Гц, привела к увеличению временных затрат до $T_p = 12$ с.

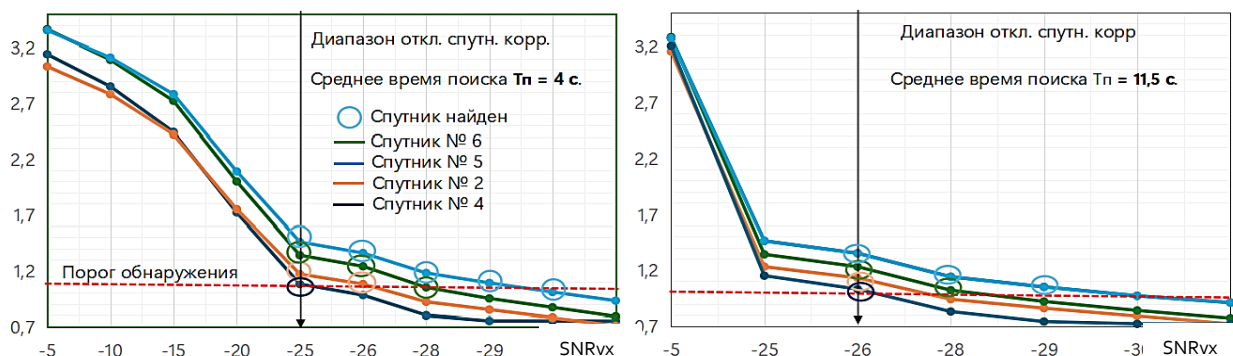


Рис.1. Зависимость выходного отношения сигнал/шум в корреляторе SNR_k от входного отношения сигнал/шум SNR_{vx} , для алгоритма поиска приёмника со слабо связанной схемой комплексирования

Результаты второй части моделирования представлены на рис.2.

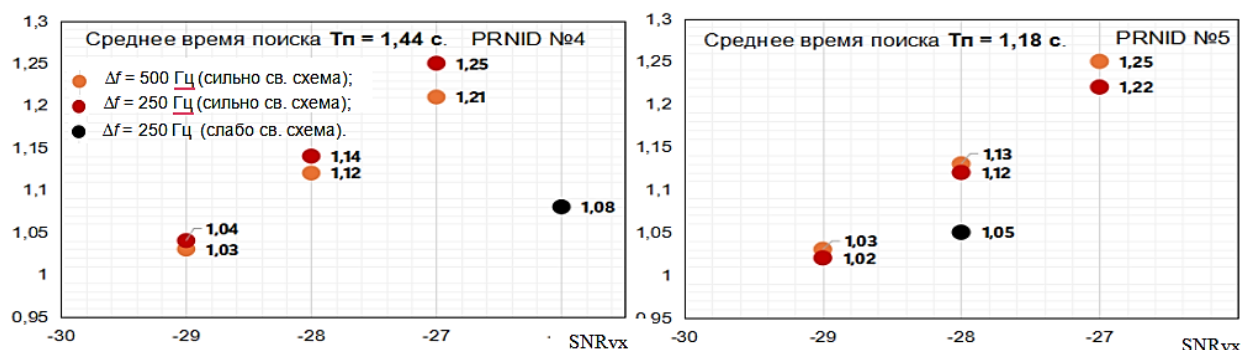


Рис.2. Зависимость выходного отношения сигнал/шум в корреляторе SNR_k от входного отношения сигнал/шум SNR_{vx}, для алгоритма поиска приёмника со сильно связанной схемой комплексирования

Сравнительный анализ характеристик (рис. 2) показал, что переход к сильно связанной схеме комплексирования с использованием априорных данных от ИНС обеспечивает существенное улучшение тактико-технических характеристик приёмника. Сужение области частотной неопределённости до ± 250 и ± 500 Гц, относительно прогнозируемого доплеровского смещения позволило достичь следующих результатов:

- сокращение временных затрат на поиск: время захвата сигналов снизилось на порядок с 11,5 с до 1,12 с при шаге поиска 250 Гц и почти в 4 раза при 500 Гц. Унификация времени поиска для различных шагов объясняется переходом к анализу узкого частотного окна, где вычислительная нагрузка перестаёт быть доминирующим фактором;
- повышение помехоустойчивости: пороговое значение входного отношения сигнал/шум SNR_{vx}, при котором сохраняется работоспособность системы, для сильно связанной схемы составило -31 дБ, что на 5-6 дБ выше показателя слабо связанной схемы (-25... -26 дБ);
- живучесть системы: в отличие от классического метода, требующего созвездия минимум из четырех НС, сильно связанная архитектура сохраняет возможность коррекции навигационного решения даже при видимости единичного спутника, что критически важно в условиях интенсивной работы систем РЭБ.

Заключение

Проведённое исследование подтвердило преимущество использования сильно связанной архитектуры комплексирования ГНСС-приёмника с инерциальной навигационной системой в условиях интенсивного радиоэлектронного противодействия. Результаты моделирования обладают практической значимостью и рекомендуются к внедрению в рамках опытно-конструкторских работ по созданию перспективных помехозащищённых навигационных модулей, а также при модернизации существующих образцов специальной техники и вооружения.

Список использованных источников

1. Г.И. Емельянцева, А.П. Степанов Интегрированные инерциально-спутниковые системы ориентации и навигации / Под общей ред. акад. РАН В.Г. Пешехонова - СПб.: ГИЦ РФ АО "Концерн "ЦНИИ "Электрон", 2016. - 394 с.
2. Фомичев А.А., Колчев А.Б., Ларионов П.В., Пугачев Р.В., Успенский В.Б. Комплексирование информации в интегрированной навигационной системе при неполном рабочем созвездии спутников // Гирскопия и навигация. — 2007. — № 1. — С. 3–15.
3. Victor Canepa and Pablo Servidia. Design and evaluation of INS/GNSS loose and tight coupling applied to launch vehicle integrated navigation. Metascience in Aerospace, 1(1): 66–109.