СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РАБОТЫ СПУТНИКОВЫХ НАВИГАЦИОННЫХ ПРИЁМНИКОВ В УСЛОВИЯХ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОМЕХ

А.В. Ряполов, Д.А. Гредяев, Н.В. Фамбулов

*Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики им. академика Е.И. Забабахина,
Снежинск, Российская Федерация*

Представлены результаты лабораторного исследования нескольких модулей навигационных приемников глобальных радионавигационных систем при одновременной обработке полезных и помеховых сигналов. В исследовании применены помехи с разной мощностью и шириной спектра: гармоническая, шумовая, фазомодулированная и импульсная. Наблюдаемыми показателями работы приемников являлись количество отслеживаемых навигационных сигналов и усредненное значение соотношения сигнал/шум. Выполненные эксперименты позволили определить максимальные уровни помех, при которых не теряется слежение за навигационными сигналами.

Ключевые слова: спутниковые радионавигационные системы, навигационный приемник, ГЛОНАСС, GPS, гармоническая помеха, шумовая помеха.

COMPARATIVE ANALYSIS OF GNSS RECEIVERS WORKING UNDER INTERFERENCE ATTACK

A.V. Ryapolov, D.A. Gredyaev, N.V. Fambulov

*Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russia Research
Institute of Technical Physics, Snezhinsk, Russian Federation*

The results of a laboratory study of several modules of GNSS receivers with the simultaneous processing of useful and interference signals are presented. The study applied interference with different powers and spectral widths: harmonic, noise, phase modulated and pulsed. The observed operating result of the receivers were the number of tracking navigation signals and the average value of the signal-to-noise ratio. The experiments performed allowed us to determine the maximum interference levels at which the tracking of navigation signals is not lost.

Keywords: global navigation satellite system, navigational receiver, GLONASS, GPS, harmonic interference, noise interference.

Использование приемников спутниковых навигационных систем позволяет точнее определять местоположение и эффективно управлять движением мобильных объектов. От качества приема навигационных сигналов во многом зависит результат выполнения поставленной задачи. Одним из уязвимых мест этих систем является малый уровень мощности принимаемых радиосигналов вследствие их ослабления при распространении. Появление в полосе рабочих частот непреднамеренных или преднамеренных помех может привести к ухудшению или полному блокированию приёма навигационных сигналов.

Допустимые уровни помех, а также методы проведения испытаний на устойчивость к помехам содержатся в ряде стандартов, таких как [1–3]. Однако стандарты не могут учесть всех вариантов воздействий. Помимо этого, нередко в технической документации на навигационную аппаратуру потребителей (НАП) можно встретить упоминания о применении встроенных средств борьбы с внутрисполосными помехами [4]. Соответственно, существующие образцы НАП имеют некоторый запас по помехоустойчивости. Поэтому представ-

ляет практический интерес определение предельной устойчивости различных навигационных приемников к воздействию помех различного вида и мощности.

Для достижения этой цели был выполнен ряд исследований, которые иллюстрируются структурной схемой (рис. 1). Был использован имитатор спутниковых сигналов, который позволяет генерировать сигналы ГЛОНАСС L1 и GPS L1. Генератор сигналов являлся источником помех в рабочей полосе частот навигационных приемников. Сигналы имитатора и генератора помех объединялись в СВЧ-сумматоре, выход которого подключался непосредственно в СВЧ-входу исследуемого приёмника. Информация о приёме и отслеживании навигационных сигналов с НАП передавалась по цифровому интерфейсу в персональный компьютер. Наблюдение за работой НАП выполнялось в специализированных программах, где были представлены следующие сведения: вычисленные координаты местоположения, геометрический фактор, скорость, время, параметры слежения за сигналами – соотношение сигнал/шум (далее – С/Ш), доплеровский сдвиг частоты и т.д. Несмотря на обработку в приемниках сигналов ГЛОНАСС и GPS, в проведенных исследованиях оценивался преимущественно прием сигналов отечественной навигационной системы.

Рис. 1. Схема исследования навигационных приёмников на помехоустойчивость

В исследовании использовались 3 приёмника различного производства и уровня сложности: Neoway G6 и Geos-3М – приёмники, ориентированные на народно-хозяйственное применение, приёмный модуль РНПИ (далее – МРНПИ) специального назначения.

Neoway G6 – приёмник, конструктивно выполненный в виде модуля, работающий по сигналам ГЛОНАСС L1, GPS L1 и BEIDOU B1. Производитель – Neoway Technology, КНР. Чувствительность по захвату навигационного сигнала – не хуже -177 дБВт, а по удержанию сигнала – не хуже -193 дБВт [5].

Geos-3М – приёмное устройство, конструктивно выполненное аналогично Neoway G6. Производитель – Дизайн-центр «ГеоСтар Навигация», Россия. Данный модуль предназначен для вычисления текущих координат и скорости объекта в реальном масштабе времени в автономном и дифференциальных режимах. Приемник имеет 32 измерительных канала для ГЛОНАСС L1 и GPS/SBAS L1. Чувствительность по захвату сигнала НКА с входа приёмного тракта Geos-3М не хуже -173 дБВт, а по удержанию сигнала – не хуже -190 дБВт [6].

МРНПИ – одноплатный, полнофункциональный, 24-канальный навигационный приёмоизмеритель, предназначенный для работы с сигналами ГЛОНАСС в частотном диапазоне L1 и L2 и GPS/SBAS в частотном диапазоне L1. Производитель – АО «КБ Навис», Россия. Чувствительность по захвату сигнала НКА с входа приёмного тракта МРНПИ не хуже -182 дБВт, а по удержанию сигнала не хуже -195 дБВт [7].

В исследовании были использованы следующие типы радиопомех:

- гармонические на частотах 1575,42 и 1600 МГц;
- шумовая с полосой ± 10 МГц относительно центральной частоты 1600 МГц;
- фазомодулированная (ФМ) с несущей частотой 1600 МГц, модулированная меандром с частотой 511 кГц;
- импульсная с несущей частотой радиоимпульсов 1600 МГц, имеющих период повторения 125 мкс, при степенях заполнения импульсов 10, 25 и 50 % относительно длительности периода.

Каждая из двух гармонических помех рассчитана на подавление навигационных сигналов в полосах GPS и ГЛОНАСС соответственно. Причем гармонический сигнал на частоте 1575,42 МГц для сигналов ГЛОНАСС L1 являлся внеполосной помехой.

Для ФМ-помехи была задана девиация фазы 180° , что моделировало присутствие фазоманипулированной помехи. Частота моделирующего меандра задавалась равной 511 кГц, что в отсутствии полноценной имитационной помехи моделировало воздействие сигнала, схожего по структуре с навигационным сигналом ГЛОНАСС.

Порядок исследования спутниковых приёмников сохранялся одинаковым для всех случаев. Первоначально выполнялось включение навигационного приёмника и имитатора спутниковых сигналов. Выдерживалось время, необходимое для захвата приёмником навигационных сигналов и получения навигационного решения. Далее, начиналось генерирование помехи, начиная от уровня -130 дБм. Постепенно уровень помехи повышался с шагом $+5$ дБ или $+10$ дБ. Максимальное значение мощности, подаваемой в приёмник, составляло 0 дБм. Исследование воздействия помехи прекращалось при потере слежения за всеми навигационными сигналами. В качестве показателей работы навигационного приёмника для каждого уровня подаваемой помехи определялись среднее значение соотношения С/Ш и количество отслеживаемых навигационных сигналов.

На рис. 2 показан пример отслеживания сигналов ГЛОНАСС L1 в пользовательской программе, считывающей данные из навигационного приёмника Neoway G6 по протоколу NMEA 0183.

Рис. 2. Отображение сигналов ГЛОНАСС L1:
а) слежение, б) потеря слежения при гармонической помехе

На рис. 2а показано слежение за восемью навигационными сигналами ГЛОНАСС L1 при наличии гармонической помехи мощностью -65 дБм и частотой 1575,42 МГц. По каждому из сигналов приёмником определяется соотношение С/Ш. На рис. 2б показана работа приёмника при той же помехе мощностью -30 дБм. Во втором случае слежение за сигналами потеряно.

На рис. 3 представлены зависимости усредненных соотношений С/Ш для отслеживаемых сигналов ГЛОНАСС L1, которые обрабатывались приёмником Neoway G6 на фоне действующих радиопомех. На этих графиках и далее для наглядности рядом с кривыми показано количество отслеживаемых сигналов. По всем кривым на рис. 3 видно, что количество отслеживаемых навигационных сигналов ≥ 4 , что позволяет получить навигационное решение. Исключение составляют крайние справа точки при ФМ-помехе перед срывом слежения. Гармоническая помеха в полосе ГЛОНАСС L1 (рис. 3а) вызывала уменьшение отношения С/Ш, начиная от уровня -100 дБм, и при уровне более -70 дБм слежение полностью обрывалось. Внеполосная гармоническая помеха на частоте GPS L1 оказывала снижение С/Ш, начиная от уровня около -60 дБм, и при уровне -30 дБм слежение тоже прерывалось.

Шумовая помеха (рис. 3б) оказывает более существенное значение на приём навигационных сигналов. Снижение отношения С/Ш наблюдается от уровня -110 дБм и при помехе -70 дБм слежение обрывается. Можно заметить, что шумовая и гармоническая ($f = 1600$ МГц) помехи вызывают срыв слежения при достаточно близких уровнях воздействия, но среднее соотношение С/Ш при шумовом воздействии во всех точках меньше приблизительно на 5–10 дБ.

Рис. 3. Результаты исследования навигационного приемника Neoway G6 к воздействию помех: а) гармонических; б) шумовой; в) ФМ с $f_{\text{мод}} = 511$ кГц; з) импульсной с $T = 125$ мкс

ФМ-помеха (рис. 3в) за счет расширенного спектра сигнала воздействие оказывает сразу на нескольких частотах в рабочей полосе ГЛОНАСС L1. Можно заметить, что это выражается в резком уменьшении количества отслеживаемых сигналов при уровнях ФМ-помехи в диапазоне от -90 до -60 дБм. Для гармонической помехи при этом диапазоне мощностей уменьшение количества отслеживаемых сигналов менялось не так значительно, но перегрузка приемника по уровню происходила раньше, чем при ФМ-помехе.

По приведенному на рис. 3з графику видно, что приёмник выполняет слежение за навигационными сигналами во всех вариантах формирования импульсной радиопомехи. Наблюдается проседание отношения С/Ш на 10–15 дБ при изменении уровня помехи в пределах от -100 до -20 дБм, которое практически не влияло на уменьшение числа отслеживаемых навигационных сигналов. В области максимальных уровней помех, вероятно, происходило значительное проседание усиления в тракте промежуточной частоты, что выражалось в резком снижении отношения С/Ш и уменьшении числа отслеживаемых сигналов на 1–2. Тем не менее импульсный характер помехи позволяет продолжать слежение за необходимым для получения навигационного решения количеством сигналов.

На рис. 4 показаны графики зависимостей усредненного отношения С/Ш для навигационного приёмника МРНПИ, работающего в аналогичных условиях воздействия помех. По приведенным на рис. 4а графикам видно, что устойчивость приёмника МРНПИ к гармоническим помехам хуже, чем у приёмника Neoway G6. При помехе на частоте 1600 МГц срыв слежения происходит при уровне порядка -75 дБм. При помехе на частоте 1575,42 МГц уровни срыва слежения: -50 дБм (МРНПИ), -35 дБм (Neoway G6). В случае воздействия шумовой помехи (рис. 4б) МРНПИ при уровне -80 дБм количество отслеживаемых в МРНПИ сигналов снижалось до трех, при -75 дБм слежение срывалось.

По графику зависимости на рис. 4в можно заключить, что при воздействии ФМ-помехи приёмник МРНПИ работает хуже, чем Neoway G6, а именно срыв слежения происходит при уровне -65 дБм.

По результатам на рис. 4з можно утверждать, что в целом МРНПИ показывает уверенную устойчивость к импульсным помехам, единственный случай срыва слежения зафиксирован при 50%-м заполнении импульсов относительно длительности периода.

Рис. 4. Результаты исследования навигационного приемника МРНПИ к воздействию помех: а) гармонических; б) шумовой; в) ФМ с $f_{\text{мод}} = 511$ кГц; з) импульсной с $T = 125$ мкс

В ходе проведения исследований навигационного приёмника Geos-3М была выяснена особенность его работы в условиях одновременной обработки сигналов ГЛОНАСС L1 и GPS L1. На рис. 5 показан вывод в пользовательской программе сведений о приеме сигналов двух навигационных систем при отсутствии помех. Видно, что алгоритм приёмника для получения навигационного решения ориентируется в первую очередь на сигналы GPS, при этом отслеживая, но не используя большее число сигналов ГЛОНАСС. Эта особенность проявляется на последующих графиках усредненных зависимостей отношения С/Ш для отслеживаемых сигналов ГЛОНАСС L1 (рис. 6).

Рис. 5. Отслеживание сигналов приемником Geos-3М: а) GPS L1, б) ГЛОНАСС L1

По рис. 6а видно, что в случае генерирования помехи на частоте 1600 МГц количество отслеживаемых сигналов находилось в диапазоне пяти-шести. При подаче помехи на частоте 1575,42 МГц изначально отслеживалось четыре сигнала ГЛОНАСС, но при повышении мощности помехи от -100 до -70 дБм количество используемых сигналов GPS уменьшалось. Таким образом, приёмник постепенно переходил на использование только сигналов ГЛОНАСС, пока не был полностью перегружен мощностью помехи, и отслеживание всех сигналов прекратилось.

В исследовании на устойчивость к шумовой помехе (рис. 6б) также использовались сигналы двух навигационных систем. Количество отслеживаемых сигналов ГЛОНАСС при всех уровнях помех сохранялось равным четырем.

Рис. 6. Результаты исследования навигационного приемника Geos-3М к воздействию помех: а) гармонических; б) шумовой; в) ФМ с $f_{\text{мод}} = 511$ кГц; з) импульсной с $T = 125$ мкс

При исследовании устойчивости приёмника Geos-3М к ФМ-помехе, где использовались только сигналы ГЛОНАСС (рис. 6в) было выявлено, что устойчивость и число отслеживаемых сигналов помехи лучше, чем у ранее рассмотренных приёмников. А именно, срыв слежения у Geos-3М происходил при уровне -60 дБм, что отличается от МРНПИ, у которого он был при -65 дБм. Число отслеживаемых сигналов при росте уровня ФМ-помехи у Neoway G6 постепенно снижалось до 1, в то время как у Geos-3М держалось равным 8.

В ходе проведения исследований приемника Geos-3М на устойчивость к импульсным помехам (рис. 6з) было замечено необратимое проседание соотношения С/Ш по сравнению с предыдущими измерениями. Это связывается с вероятной деградацией характеристик радиочастотной части приемника вследствие воздействия помеховых сигналов. По полученным зависимостям видно, что для импульсных помех с заполнением импульса 10 и 25% от периода соотношение С/Ш было около 30 дБГц. Импульсная помеха с 50%-м заполнением при уровне -70 дБм и более вызвала значительный спад соотношения С/Ш до значений, которые уже не обеспечивают надежный прием навигационной информации.

В таблице объединены результаты по всем исследованным приемникам, куда сведены значения максимальных мощностей применённых помех, при которых не наступал срыв слежения за всеми сигналами. Сравнивая разные помехи по эффективности воздействия, были сделаны следующие выводы. Шумовая помеха в полосе сигналов ГЛОНАСС L1 оказалась наиболее эффективной для блокирования полезных сигналов. Следующей по критичности подавления полезных сигналов оказалась гармоническая помеха с частотой 1600 МГц. Затем следует ФМ-помеха с частотой модуляции 511 кГц. Наибольшие уровни, вызывающие срыв слежения, обнаружены при импульсных помехах. Приемники Neoway G6 и МРНПИ оказались либо слабо подвержены, либо устойчивы к тем вариантам импульсных помех, которые были созданы. У Geos-3М в ходе исследований на устойчивость к импульсным помехам наблюдалось значительное проседание среднего соотношения С/Ш и срыв слежения.

Показанные на рис. 3–6 зависимости получены в лабораторных условиях без использования антенн и приема сигналов со спутников. Для подтверждения данных результатов подобные измерения следует проводить с реальными навигационными сигналами под открытым небом.

**Предельные уровни помех, не вызывающих потерю слежения
за всеми навигационными сигналами**

Спутниковый навигационный приемник	Предельный уровень мощности помехи, дБм						
	Гармоническая		Шумовая 1590–1610 МГц	ФМ частота модуляции 511 кГц	Импульсная; заполнение, %		
	1600 МГц	1575,42 МГц			10	25	50
Neoway G6	–70	–40	–75	–60	0	0	0
МРНПИ	–80	–65	–80	–70	0	0	–10
Геос-3М	–70	–45	–70	–65	–10	–10	–20

Сравнивая результаты с приводимыми в стандартах допустимыми уровнями помех, можно сделать вывод, что НАП обладает некоторым запасом по помехоустойчивости к помехам в рабочей полосе частот. Тем не менее улучшение избирательности входных каскадов навигационных приемников, использование цифровой фильтрации до этапа корреляционной обработки и применение антенных систем с пространственно-временной фильтрацией еще больше повысит надежность работы навигационной аппаратуры в сложной помеховой обстановке.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 54116-2010. Глобальные навигационные спутниковые системы. Морская навигационная аппаратура потребителей. Технические характеристики, методы и требуемые результаты испытаний. М.: Стандартинформ, 2011. 23 с.
2. ГОСТ Р 55539-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Навигационные модули для использования в наземной навигационной аппаратуре. Технические требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2014. 11 с.
3. ГОСТ Р 55539-2013. Глобальная навигационная спутниковая система. Навигационные двухчастотные модули диапазонов L1 и L2. Технические требования. М.: Стандартинформ, 2015. 11 с.
4. Thiel A., Ammann M. Anti-jamming techniques in U-blox GPS receivers // U-blox. 2009. 9 p. URL: www.u-blox.com.
5. Neoway G6 Hardware User Guide. Issue 2.0. 2018. 33 p. URL: www.neoway.com.
6. Модуль Геос-3, Геос-3М. Руководство по эксплуатации. Версия 1.2. М.: Геостар навигация, 2013. 59 с. Режим доступа: www.geostar-navigation.com.
7. Модуль РНПИ 14Ц850. Руководство по эксплуатации. ТДЦК.468173004 РЭ. АО “КБ НАВИС”, 2009. 43 с.