

Уязвимость систем синхронизации, основанных на использовании глобальных навигационных спутниковых систем

Г.С. НУДЕЛЬМАН, А.А. ОГАНЕСЯН, В.Н. ХАРИСОВ
ОАО «ВНИИР» ОАО «ВНИИР-Прогресс»
Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Синхрофазоры, аппаратура ГЛОНАСС/GPS, помехоустойчивость аппаратуры потребителей ГЛОНАСС/GPS

1 ВВЕДЕНИЕ

Человечеству с конца 20-го века стало доступно новое, искусственно созданное, поле Земли – высокоточное навигационно-временное поле глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) ГЛОНАСС и GPS. Уже сегодня это поле становится фундаментом новых систем, коренным образом улучшающих качество жизни людей и возможности техники. ГНСС ГЛОНАСС и GPS нашли широкое применение во многих отраслях, в частности, в энергетике, на транспорте, в оборонной отрасли и др. [1]. На системы ГНСС возлагаются принципиальные, системообразующие функции высокоточной синхронизации, определения местоположения и навигации. Так в энергетике основным направлением повышения эффективности отрасли является внедрение распределенных систем мониторинга и защиты (СПРМ, WAMS, WAPS), новейших автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций. Все эти системы в своей основе опираются на единое время, формируемое по сигналам ГНСС [3].

Вместе с тем, существует ряд потенциальных источников разрушения навигационно-временного поля ГНСС, в частности, это источники помех промышленного происхождения, специально организованные помехи, «глушилки» и т.п. Санкционированное и несанкционированное использование данных источников приводит к разрушению навигационно-временного поля ГНСС, как правило, на значительной площади, превышающей единицы и десятки квадратных километров. Столь существенное влияние источников разрушения навигационно-временного поля ГНСС на аппаратуру пользователей (АП) является следствием ее крайне низкой помехоустойчивости и может привести к катастрофическим последствиям.

2 ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1 Помехоустойчивость АП ГНСС

Наиболее распространенным показателем помехоустойчивости АП ГНСС служит максимальное отношение мощности помехи J к мощности сигнала S на входе приемника (или на выходе изотропной антенны), при котором приемник остается в рабочем режиме. Для помех с шириной спектра, большей, чем у сигнала, для определения мощности необходимо задать полосу частот. Для приемников GPS можно использовать полосу частот помехи по первым нулям спектра сигнала, т.е. для открытого C/A кода ширина полосы $B \approx 2$ МГц. Для приемников ГЛОНАСС, работающих по СТ коду в диапазоне L1, эта величина составляет $B \approx 8,3$ МГц [1]. Обычное обозначение этого показателя J/S (от английского jammer to signal). Показатель J/S связан с дальностью подавления $R_{\text{под}}$ зависимостью:

$$R_{\text{под}}^2 = \frac{(PG)\lambda^2}{(4\pi)^2} \frac{G_{\text{np}}}{S(J/S)}, \quad (1)$$

где S – мощность входного сигнала, равная 10^{-16} Вт (–160 дБВт);

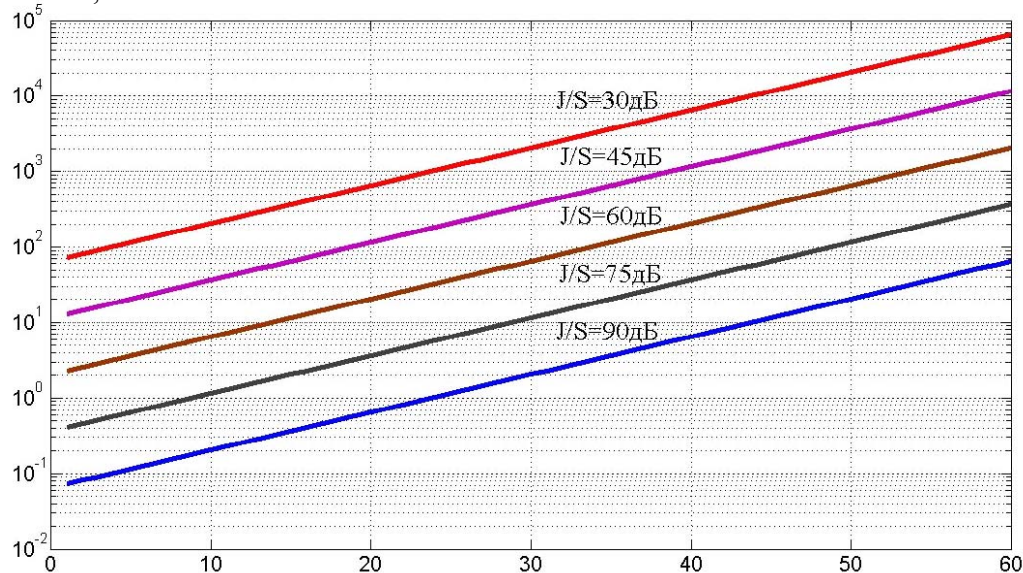
$G_{пр}$ - коэффициент усиления антенны приемника (≈ 2);

λ - длина волны ($\approx 0,2$ м);

P_G – эквивалентная мощность постановщика помех.

Зависимость радиуса подавления от помехоустойчивости приемника и эквивалентной мощности постановщика помех приведена на рисунке 1.

R подавления, км



P_G , эквивалентная мощность постановщика помех, дБВт

Рисунок 1 – Зависимость радиуса подавления от помехоустойчивости приемника и эквивалентной мощности постановщика помех

Анализ показывает, типовая коммерческая аппаратура с $J/S=30$ дБ может быть подавлена на дальности 60 км постановщиком помех с эквивалентной мощностью всего 1 Вт. Вместе с тем, повышение помехоустойчивости на 30 дБ уменьшает дальность подавления такой АП ГНСС более чем в 30 раз. Именно помехоустойчивость является «ахиллесовой пятой» АП ГНСС. Обратимся к результатам исследований помехоустойчивости аппаратуры ГНСС за последний год.

2.2 Исследования помехоустойчивости АП ГНСС

Специалистами ОАО «ВНИИР-Прогресс» (дочернее предприятие ОАО «ВНИИР») в 2012 году был поставлен ряд экспериментов. Первый эксперимент проводился в Ленинградской области в рамках взаимодействия с ФГУП «ГосНИИПП» ФСТЭК РФ. В ходе экспериментов была проведена серия как наземных (рисунок 2) так и летных исследований (рисунок 3) исследований.



Рисунок 2 – Наземные испытания на полигоне ФГУП ГосНИИПП



Рисунок 3 – Подготовка к летным испытаниям на полигоне ФГУП ГосНИИПП

Основной вывод по результатам исследований помехоустойчивости типовой аппаратуры ГНСС сводится к следующему. Большая часть аппаратуры пользователей ГЛОНАСС/GPS, представленной на российском рынке, имеет примерно одинаковую помехоустойчивость, лежащую в пределах $J/S=35...45$ дБ. Второй эксперимент был проведен на базе цифровой подстанции ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС» (рисунок 4). Выводы по результатам исследований совпали с предыдущими исследованиями.

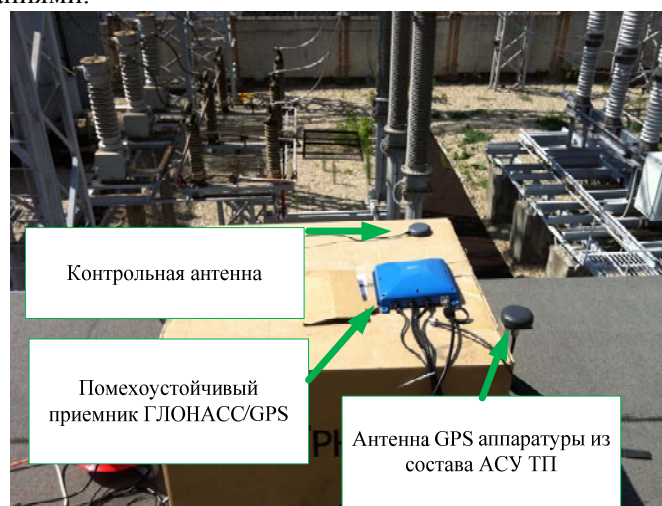


Рисунок 4 – Размещение оборудования на испытаниях в ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС»

В эксперименте аппаратура синхронизации по сигналам ГЛОНАСС/GPS была подавлена маскирующей помехой с мощностью эквивалентной воздействию источника мощностью 2 Вт с расстояния 10 км. Вместе с тем, как показали проведенные специалистами ОАО «ВНИИР-Прогресс» исследования, помехоустойчивость аппаратуры ГНСС далека от потенциальной, реализуемой, например, адаптивными антенными решетками.

Практически в это же время, специалистами из университета Остин (University of Texas at Austin, США), был проведен ряд экспериментов по воздействию имитационной помехи на типовую аппаратуру GPS [11]. Результаты, как и следовало ожидать, оказались весьма неутешительными для пользователей ГНСС. С помощью имитационной помехи был осуществлен уход траектории беспилотного летательного аппарата, автопилот которого работал по сигналам GPS. При этом воздействие имитационной помехой было прекращено для предотвращения столкновения летательного аппарата с землей. Второй эксперимент специалистов из Остина заключался в следующем. С помощью имитационной помехи было осуществлено смещение системного времени GPS в синхрофазоре (PMU) – ключевом элементе интеллектуальных распределенных систем в энергетике (рисунок 5).

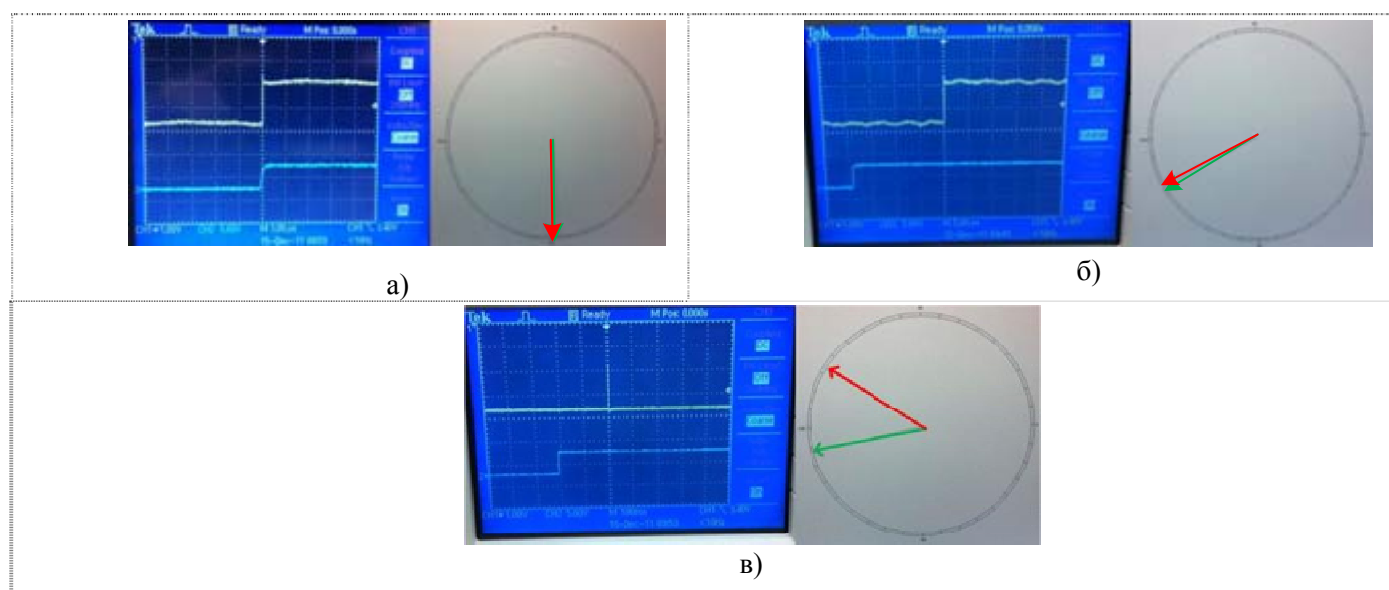


Рисунок 5 – Влияние имитационной помехи на синхрофазоры: а) начало исследований – фазы согласованы, б) 620 секунда эксперимента – уровень рассогласования превысил допустимые по стандарту IEEE C37.118 значения, в) 1370 секунда эксперимента – рассогласование достигло 45 градусов.

Имитация рассогласования шкал синхрофазоров может привести к крайне опасным последствиям: от некорректных действий персонала диспетчерских центров, приводящих к разбалансированию системы, до автоматического отключения отдельных элементов или аварийного деления сети.

Эти и другие исследования помехоустойчивости аппаратуры пользователей ГНСС наглядно показывают всю опасность, связанную с недооценкой уязвимости систем синхронизации, определения местоположения и навигации на основе ГНСС. Однако, как подчеркивалось выше, низкая помехоустойчивость аппаратуры пользователей ГНСС не является свойством навигационных спутниковых систем.

2.3 Повышение помехоустойчивости АП ГНСС

Известны различные способы существенного повышения помехоустойчивости. В частности, характеристики помехоустойчивости последних разработок фирм Raytheon, Lockheed Martin, Rockwell Collins и других позволяют утверждать, что аппаратура пользователей ГНСС может стать практически неуязвимой к воздействию помех. Действительно, если к имеющейся помехоустойчивости навигационной аппаратуры ГНСС в $J/S=35...45$ дБ добавить еще 40...45 дБ, получаемых за счет специальных методов повышения помехоустойчивости, то итоговая помехоустойчивость составит J/S в 75...90 дБ. Что это дает? Например, повышение помехоустойчивости на 50 дБ эквивалентно уменьшению радиуса подавления в 250 раз! Это существенно уменьшает влияние помех на помехоустойчивую НАП (рисунок 6). Так, для подавления навигационной аппаратуры пользователей с помехоустойчивостью $J/S=90$ дБ в радиусе прямой видимости потребуется мощность источника помех в один мегаватт!



Рисунок 6 – Зоны подавления: типовой коммерческой аппаратуры и аппаратуры с помехоустойчивостью большей на 50 дБ

В настоящее время существует несколько методов повышения помехоустойчивости АП ГНСС [1]:

- алгоритмические;
- использование дополнительной информации;
- пространственно-временная обработка сигналов.

Алгоритмические методы включают в себя целый спектр улучшений современных алгоритмов обработки за счет внедрения оптимальных алгоритмов обработки сигналов, обеспечивающие наилучшее слежение за быстроменяющимися параметрами сигналов в условиях больших отношений помеха/сигнал, следующих из теории оптимальной нелинейной фильтрации [4, 6]. В частности, к алгоритмическим методам повышения помехоустойчивости относятся:

- использование многоканальных схем вместо следящих схем, применяемых в настоящее время;
- применение одноэтапных алгоритмов [9];
- применение алгоритмов интегральной аппроксимации вместо алгоритмов локальной аппроксимации.

Потенциально, уровень повышения помехоустойчивости за счёт оптимизации алгоритмов составляет порядка 10...20 дБ. Однако внедрение этих методов затрудняется сложностью их технической реализации.

Второй метод повышения помехоустойчивости предполагает использование дополнительной информации, например, от инерциальной навигационной системы [5]. Дополнительная информация используется для сужения эквивалентных полос слежения за параметрами радиосигнала и, как следствие, приводит к увеличению помехоустойчивости приема сигналов. Применительно к синхрофазорам (PMU), в качестве дополнительной информации можно использовать информацию об их неизменном положении в пространстве, что, в определенной мере, будет являться эквивалентом использования идеальной инерциальной системы. Как показывают теоретические исследования, использование дополнительной информации позволяет повысить помехоустойчивость на 10...25 дБ.

Третьим, и самым эффективным методом является пространственно-временная обработка сигналов ГНСС, позволяющая осуществлять интеллектуальную обработку по принципу «нули диаграммы направленности на источники помех» [7] (рисунок 7). Такие устройства получили название «антенные компенсаторы помех» (АКП). Как показывают теоретические и

экспериментальные исследования, пространственно-временная обработка позволяет повысить помехоустойчивость на 30...60 дБ.

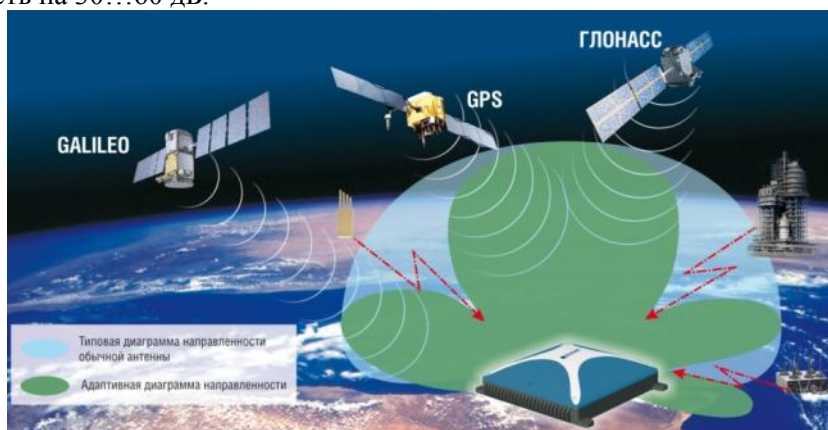


Рисунок 7 – Принцип пространственного подавления помех

2.4 Опыт разработки помехоустойчивой АП ГНСС

За рубежом, в основном в США и в Канаде, разработан целый ряд помехоустойчивой аппаратуры. В частности: GPS Anti-Jam Technology (GAJT) фирмы Novatel, Digital Anti-jam Receiver (DAR), Miniature Airborne GPS Receiver (MAGR) 2000, MAGR 2000 SAASM, Anti-jam GPS Receiver (AGR) фирмы Raytheon, High-gain Advanced GPS Receiver (HAGR) фирмы NAVSYS и др. Однако в соответствии с действующим законодательством этих стран, существуют экспортные ограничения на данный вид продукции и данная продукция двойного назначения не доступна для российских потребителей.

В России исследования по созданию помехоустойчивой АП ГНСС на основе применения пространственных методов подавления помех известны с начала 2000-х годов. В работе [8] описаны экспериментальные исследования макета АКП, обеспечивающего подавление широкополосной помехи до 30дБ. В другой работе [2] приведены исследования макета АКП с четырехэлементной АР в безэховой камере, разработанного специалистами ОАО «РИРВ». Исследование демонстрирует хорошие показатели подавления помех, тем не менее, из него следует, что уровень подавления одного источника широкополосной помехи составил всего 24 дБ.

Благодаря большому объему исследований к 2010 году специалисты ОАО «НИИ КП» совместно со специалистами, в настоящее время работающими в ОАО «ВНИИР-Прогресс», создали научно-технический задел, который позволил разработать помехоустойчивую аппаратуру спутниковой навигации «Актив-Н» [10]. Входящий в состав «Актив-Н» адаптивный антенный модуль обеспечивает подавление широкополосных помех на 35...45 дБ, а узкополосных помех до 55...60 дБ. В настоящее время специалисты ОАО «ВНИИР-Прогресс» разработали и успешно испытали первую на российском рынке помехоустойчивую АП ГНСС ГЛОНАСС/GPS на основе малогабаритной адаптивной антенной решетки «Комета». Основные результаты испытаний сводятся к следующему: изделие «Комета» обеспечивает повышение помехоустойчивости от 32 до 56 дБ и имеет помехоустойчивость $J/S=92...108$ дБ. Это означает, что изделие «Комета» обеспечивает приём сигналов в условиях воздействия нескольких пространственно-разнесенных помех с суммарным уровнем мощности в сотни тысяч раз больше, чем максимально допустимый уровень помех для обычной АП ГНСС.

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение передовых технологий векторных распределенных систем мониторинга/защиты, автоматизированных систем управления технологическими процессами подстанций является объективной необходимостью и направлено на повышение безопасности и эффективности энергосистемы страны. Фундаментом этих систем является единое навигационно-временное поле ГНСС ГЛОНАСС/GPS. Поэтому к АП ГНСС должны предъявляться особые требования по защите от преднамеренных и непреднамеренных помех.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования Изд. 4-е, перераб. Под ред. В.Н. Харисова и А.И. Перова. – М. Радиотехника. 2010 г.,
- [2] Ковита С. П., Козлов Р. Л., Коротков А. Н., Немов А. В., Тюфтяков Д. Ю., Царев В. М. Характеристики подавления помех в помехозащищенной аппаратуре потребителей ГНСС – М.: Новости навигации, №1 2009 г с.43–47.
- [3] Нудельман Г.С., Харисов В.Н., Оганесян А.А. Проблемы синхронизации на базе глобальных навигационных спутниковых систем. – М.: Релейщик №1, 2012 г. с.54-57.
- [4] Тихонов В.И. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем: учебное пособие для вузов / В.И. Тихонов, В.Н. Харисов. – М.: Радио и связь. 2004 г. – 608 с. – ISBN 5-256-01701-2.
- [5] Харисов В.Н., Аникин А.Л., Оганесян А.А. Статистический приемника спутниковой навигации и инерциальных датчиков. – М.: Радиотехника (Журнал в журнале) №7, 2005 г. с.104-107.
- [6] Харисов В.Н., Горев А.П. Исследования одноэтапного алгоритма навигационно-временных определений для приемника ГНСС. – М. Радиотехника (Журнал в журнале) №4, 2001 г. с.3-18.
- [7] Харисов В.Н., Ефименко В.С. Эффективность пространственной обработки для ГНСС. - М.: Радиотехника (Журнал в журнале) №7, 2002 г, с.88-92.
- [8] Харисов В.Н., Ефименко В.С., Давыденко И.Н., Охрименко А. Е., Папушой В.И., Пучило А.В., Романов А.В., Токарев А.В. Результаты экспериментальной проверки макета компенсатора помех для приемника спутниковой навигации – М.: Радиотехника (Журнал в журнале). №7 2004 г. с.13–18.
- [9] Харисов В.Н., Пудловский В.Б., Оганесян А.А. Одноэтапные алгоритмы для улучшения характеристик навигационных определений в ГНСС. – М.: Радиотехника (Журнал в журнале). №7 2008 г. с.13–18.
- [10] Харисов В.Н., Яскин Ю.С., Ефименко В.С., Бойко С.Н., Быстраков С.Г., Пастухов А.В., Савельев С.А. Характеристики подавления помех в первом образце помехоустойчивой аппаратуры потребителей СРНС ГЛОНАСС/GPS с адаптивной антенной решеткой – М.: Радиотехника (Журнал в журнале). №7 2010г. с.127–136.
- [11] Humphreys T. E., Shepard D. P., Bhatti J. A., Fansler A. A. Evaluation of Smart Grid and Civilian UAV Vulnerability to GPS Spoofing Attacks. - ION GNSS Conference, Nashville, TN | September 21, 2012/