

УДК 621.396

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО РЕГИСТРАЦИИ И ПОСТОБРАБОТКЕ ПРЕОБРАЗОВАННОЙ РАДИОЧАСТОТНЫМ ТРАКТОМ СМЕСИ ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА И ИНТЕНСИВНОЙ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

Кузьмин Е.В., к.т.н., доц., доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», e-mail: ekuzmin@sfu-kras.ru

Тараненко А.Ю., ассистент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», e-mail: ataranenko@sfu-kras.ru

THE RESULTS OF EXPERIMENTS ON RECORDING AND POST-PROCESSING A MIXTURE OF A SPREAD SPECTRUM SIGNAL AND INTENSE CW INTERFERENCE CONVERTED BY A RADIO FREQUENCY FRONT-END

Kuzmin E.V., Taranenko A.Yu.

An experimental laboratory study of the suppression effectiveness of in-band intense continuous wave (CW) interference for radio electronic systems with spread spectrum signals has been carried out. Digital recording of an additive mixture of spread spectrum signals and CW interference at the output of the receiver radio frequency front-end (RF front-end) has been performed. Spectral pre-correlation algorithms of CW interference suppression and spread spectrum signals searching by delay procedures was carried out by post-processing of the recorded mixture samples. Spread spectrum signals simulator was used. The RF front-end is formed by a typical amplifying and filtering links. Recording of the mixture samples is performed into external memory by a digitally recording samples device. The post-processing of the mixture samples included a Fourier procedure for spread spectrum signals searching in the absence and presence of CW interference suppression algorithms. Spectral ranked element-by-element rejection and compensation based on spectral-weight estimation of CW interference parameters was used. The output effects of the spread spectrum signals searching procedure are presented in case of presence and absence of CW interference suppression. The effectiveness of the spectral pre-correlation algorithms for intense CW interference suppression was experimentally confirmed.

Key words: spread spectrum signals, continuous wave interference, signal acquisition, interference rejection, spectral-weight estimation, signals simulator, radio frequency front-end, post-processing.

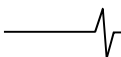
Ключевые слова: шумоподобные сигналы, гармоническая помеха, поиск сигналов, подавление помехи, спектрально-весовое оценивание, имитатор сигналов, радиотракт, постобработка.

Введение

Узкополосные и гармонические помехи (УП, ГП) являются распространёнными видами помеховых воздействий, способных снижать эффективность работы радиоэлектронных систем (РЭС) с шумоподобными сигналами (ШПС) [1-11]. Цифровая спектральная обработка ШПС обладает высокими алгоритмическими возможностями по подавлению УП, в частности, она потенциально позволяет существенно ослабить действие ГП [3; 11–17]. Вместе с тем, влияние радиочастотного тракта (радиотракта) приёмника является немаловажным фактором, сдерживающим достижение потенциально возможных характеристик подавления помех [3; 14]. Современные возможности синтеза и регистрации сигналов, а также наличие готовых инженерных решений для общепринятых радиочастотных преобразований, predisполагают к проведению серии натурных лабораторных экспериментов по выделению слабых ШПС на фоне интенсивной ГП при учёте влияния типового состава радиотракта. При проведении экспе-

Проведено экспериментальное лабораторное исследование эффективности подавления интенсивной гармонической помехи, воздействующей в полосе частот информационно-измерительных радиоэлектронных систем (РЭС) с шумоподобными сигналами (ШПС). Выполнена цифровая регистрация аддитивной смеси шумоподобных сигналов РЭС и помехи на выходе радиочастотного тракта (радиотракта) приёмника. Проведена постобработка зарегистрированных реализаций смеси, включающая «спектральные» меры предкорреляционного подавления помехи и последующий поиск ШПС по задержке. Для генерации ШПС использовался имитатор сигналов РЭС. Радиотракт образован типовым «преселекторным» наполнением, включающим усилительные и фильтрующие звенья. Регистрация реализаций выполнена средством для цифровой записи отсчётов во внешнюю память. Постобработка реализаций включала Фурье-процедуру поиска ШПС при отсутствии и наличии мер подавления помехи, в качестве которых применена спектральная ранжированная ползменная режекция, а также компенсация, основанная на спектрально-весовом оценивании параметров. Представлены выходные эффекты процедуры поиска ШПС при наличии и отсутствии мер подавления интенсивной гармонической помехи, экспериментально подтверждающие их эффективность.

риментов шумоподобные сигналы генерировались имитатором, позволяющим в лабораторных условиях формировать банк стандартных сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) второго поколения, являющихся одним из наиболее распространённых



примеров РЭС со слабыми ШПС. Регистрация смеси ШПС и ГП на выходе радиотракта выполнялась с помощью средства цифровой записи (СЦЗ).

Цель статьи – экспериментальное исследование возможности реализации поиска шумоподобного сигнала в режиме постобработки при его цифровой регистрации в смеси с интенсивной помехой на выходе радиочастотного тракта, а также сравнение эффективности различных мер подавления помехи.

Структурная схема и описание физических лабораторных экспериментов

Обобщённая структурная схема выполненных экспериментов показана на рис. 1, где применены следующие обозначения: ПК – персональный компьютер, используемый для управления основными структурными элементами, а также для постобработки зарегистрированных реализаций аддитивной смеси ШПС и ГП; ИМ – имитатор сигналов ГНСС, обеспечивающий формирование стандартных сигналов; ГЕН – СВЧ-генератор гармонических сигналов, выполняющий роль генератора гармонической помехи; РТ – радиотракт, образованный полосовыми фильтрами и малошумящими усилителями; СЦЗ – средство цифровой записи, обеспечивающее аналого-цифровое преобразование (АЦП) и высокоскоростную регистрацию отсчётов смеси; символом «+» обозначен сумматор сигналов; радиочастотные соединения показаны обыкновенными линиями и стрелками, указывающими направление прохождения сигналов; двойными линиями показаны интерфейсные связи между ПК и имитатором, между ПК и СЦЗ; указатели «Упр.» означают передачу команд управления, а указатель «Данные» – передачу зарегистрированных отсчётов. На структурной схеме не показано управление СВЧ-генератором со стороны ПК и не показаны вспомогательные контрольно-измерительные приборы (анализатор спектра, осциллограф), использованные для настройки и контрольных оценок необходимых параметров смеси при проведении экспериментов.

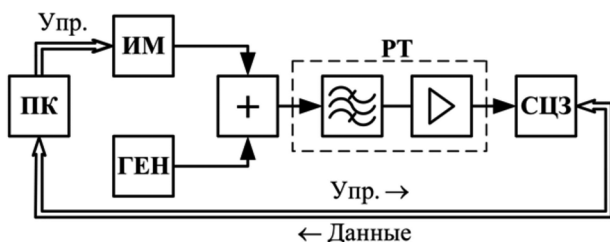


Рис. 1. Структурная схема экспериментов по регистрации и постобработке смеси ШПС и интенсивной гармонической помехи на выходе радиотракта

С использованием лабораторной установки, основная часть которой представлена структурной схемой (рис. 1), выполнена серия экспериментов по генерации физической аддитивной смеси ШПС с гармонической помехой, её регистрации на выходе радиотракта и дальнейшей постобработке. Первая серия экспериментов предполагала отключение генератора помехи, что было необходимо для настройки и проверки энергетического потенциала (отношения «сигнал/шум»), а также для отладки общей структуры эксперимента, включая

процесс получения (записи) отсчётов, выполнения одной из целевых задач при постобработке – поиска ШПС и проверку функционирования соответствующей процедуры. Далее выполнялась вторая серия экспериментов, предполагающая регистрацию смеси при включённом генераторе помехи и постепенном увеличении отношения «помеха/сигнал». Для каждого рассматриваемого случая производилась регистрация смеси и её постобработка.

Результаты постобработки данных физических лабораторных экспериментов

На рис. 2-4 в графической форме показаны результаты программной постобработки дискретных отсчётов физической аддитивной смеси ШПС, гармонической помехи и шума радиотракта. На рис. 2 представлены две группы (I и II) нормированных выходных эффектов Z_n процедуры поиска фазоманипулированных ШПС по задержке, соответствующие сигналам двух рассматриваемых РЭС, которые сгенерированы имитатором, преобразованы радиотрактом и зарегистрированы СЦЗ. Внешняя помеха отсутствовала. Энергетический потенциал $q=40$ дБГц. По оси абсцисс отложено нормированное к периоду повторения ШПС временное смещение τ/T_n . Нумерация графиков (5.8) соответствует количеству когерентных накоплений при выполнении корреляционной обработки ($M=5..8$). На рис. 3 представлены выходные эффекты процедуры поиска при наличии мощной гармонической помехи, для отношения «помеха/сигнал» $q_{nc}=64$ дБ. Энергетический потенциал прежний. Количество когерентных накоплений $M=9$. Кривая 1 получена при отсутствии мер подавления помехи и демонстрирует некорректную работу процедуры поиска, т.к. её максимум не указывает на заданное временное положение сигнала. Кривая 2 получена при предварительном подавлении помехи на основе спектральной ранжированной поэлементной режекции [16]. При постобработке в спектре взвешенной смеси режектировался приблизительно 1 % частотных выборок (от их общего числа), локализующихся в окрестности максимума, определяемого помехой. Кривая 3 (серый фон) получена при применении компенсации помехи, основанной на спектрально-весовом оценивании её параметров [17].

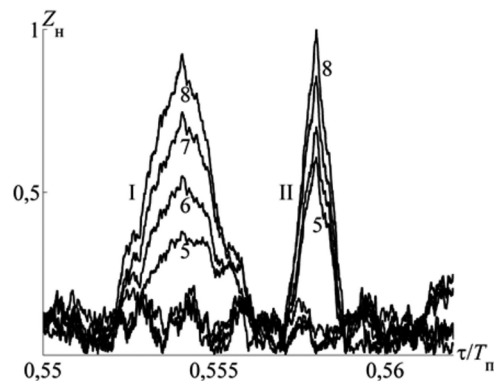


Рис. 2. Нормированные выходные эффекты процедуры поиска ШПС по задержке. Случай отсутствия внешнего помехового фона, $q=40$ дБГц, $M=5..8$

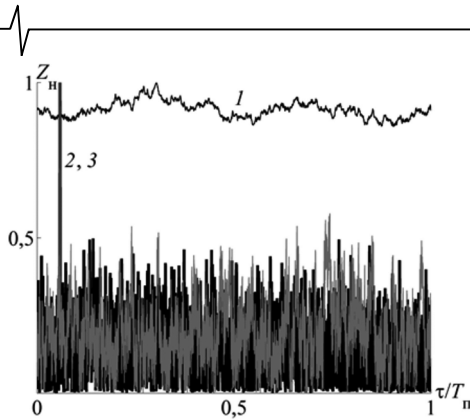


Рис. 3. Нормированные выходные эффекты процедуры поиска ШПС по задержке. Случай наличия внешнего помехового фона, $q_{\text{ис}}=64$ дБ, $q=40$ дБГц, $M=9$

На рис. 4 показаны выходные эффекты, полученные и пронумерованные аналогично выходным эффектам на рис. 3, но при повышении отношения «помеха/сигнал» до 74 дБ и увеличении количества накоплений до $M=20$. В табл. 1 представлены данные о «размахе» D значений отсчётов аддитивных смесей ШПС, помехи и шума РТ ($q=40$ дБГц), зарегистрированных на выходе СЦЗ при различных рассмотренных отношениях «помеха/сигнал», включая случай отсутствия помехи, что показано прочерком. Кроме того, в табл. 1 показаны значения необходимого в каждом случае количества накоплений M для устойчивого выделения сигнального всплеска.

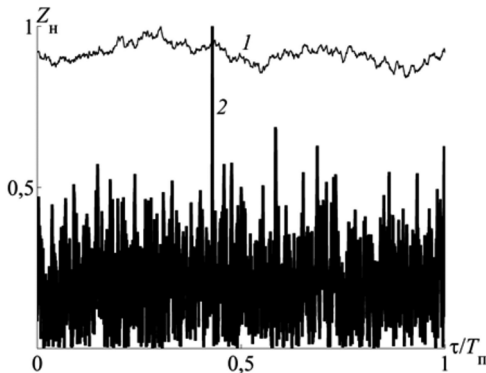


Рис. 4. Нормированные выходные эффекты процедуры поиска ШПС по задержке. Случай наличия внешнего помехового фона, $q_{\text{ис}}=74$ дБ, $q=40$ дБГц, $M=20$

Таблица 1. Значения «размаха» D зарегистрированных отсчётов при различных отношениях «помеха/сигнал»; требуемое кол-во накоплений M

$q_{\text{ис}}, \text{дБ}$	–	40	54	64	74
D	255	192	79	60	55
M	≥ 4	6	6	9	≥ 12

Таким образом, проведённые физические лабораторные эксперименты по цифровой обработке зарегистрированных на выходе радиотракта шумоподобных сигналов, в условиях отсутствия помехи (рис. 2) и при её воздействии (рис. 3, 4), подтверждают корректность применения (реализации) алгоритмического инструментария для поиска ШПС (рис. 2-4) и высокую эффективность выполнения предварительной (предкорреляционной) спектральной обработки смеси (рис. 3, 4). В рассмотренных условиях спектральная ранжированная

позлементная режекция помехи и компенсационный подход, основанный на спектрально-весовом оценивании параметров помехи, обладают паритетной эффективностью.

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 2, при рассматриваемых условиях наблюдения, характеризующихся отсутствием внешней помехи и наличием в регистрируемой смеси лишь полезных ШПС и шума радиотракта, выходные эффекты Z_n процедуры поиска при обработке сигналов двух РЭС соответствуют ожидаемым. Они содержат сигнальные всплески, позволяющие определить оценки задержек генерируемых имитатором сигналов. Кроме того, из рис. 2 видно, что временные интервалы, соответствующие длительности «оснований» наблюдаемых выходных эффектов, отличаются приблизительно в два раза, что объясняется различными длинами псевдослучайных последовательностей, используемых для синтеза ШПС в рассматриваемых РЭС, при равенстве периодов их повторения T_n . Устойчивое проявление сигнальных всплесков в выходных эффектах Z_n наблюдается при количестве производимых когерентных накоплений $M \geq 4$, что согласуется с ожидаемым поведением [3; 15]. Из рис. 3, 4 видно, что при воздействии интенсивной помехи ($q_{\text{ис}}=64$ дБ, 74 дБ) и отсутствии мер по её подавлению, процедура поиска ШПС обладает выходными эффектами (кривые 1) с заметной «постоянной составляющей» и максимумами, существенно смещёнными относительно истинного временного положения ШПС. Это является следствием негативного влияния помехи. Применённые меры подавления помехи приводят к существенному улучшению ситуации (кривые 2, 3 на рис. 3 и кривая 2 на рис. 4): выходные эффекты содержат сигнальные выбросы, позволяющие правильно решить задачу поиска ШПС. Строго говоря, целевая задача обработки ШПС, решение которой следует после выполнения мер борьбы с помехой, может быть произвольной, а задача поиска ШПС является первичной, объективно необходимой и выбрана, в том числе, для наглядности визуализации достигаемого положительного эффекта, проверки практической возможности его получения. В рассмотренных условиях наблюдения полезных ШПС применяемые меры подавления помехи практически одинаково эффективны (рис. 3, 4), однако, из рис. 3 видно, что подавление помехи на основе спектрально-весового оценивания её параметров и компенсации приводит к слегка повышенным значениям боковых выбросов (кривая 3, серый фон), что, с одной стороны, не мешает решению целевой задачи поиска ШПС, а с другой стороны – несколько отличается от ожидаемого поведения, полученного статистическим моделированием [17]. Возможной и объяснимой причиной является функционирование системы цифровой автоматической регулировки усиления в составе СЦЗ, вносящей дополнительные «шумы», влияющие на эффективность спектрально-весового оценивания параметров помехи и точность её цифрового воспроизведения для компенсации. Кроме того, следует дополнительно отметить, что неизбежное влияние автоматической регулировки усиления оказывает и на полезный ШПС, уровень которого снижается,

при отработывании по интенсивной помехе с целью избегания возможных «ограничений» регистрируемой смеси. Проведённое ранее исследование [17] алгоритмических возможностей подавления интенсивной помехи на основе спектрально-вещного оценивания её параметров и компенсации предполагало её присутствие в смеси с шумом приёмника, но не учитывало влияние регулировки усиления и других погрешностей, вносимых радиотрактом и СЦЗ.

Устойчивое функционирование совместно применяемых этапов обработки ШПС на фоне интенсивной ГП ($q_{\text{ис}} = 74 \text{ дБ}$), включающих спектральную режекцию помехи и Фурье-процедуру поиска сигнала, позволяет зафиксировать выигрыш от 4 дБ до 14 дБ в сравнении с возможностями обеспечения функционирования приёмной аппаратуры РЭС [3, с. 758] при тех же мерах борьбы с помехой. В проведённых экспериментах, повышение отношения «помеха/сигнал» до 74 дБ приводило к дополнительному подавлению сигнала (табл. 1), поэтому при имеющихся технических ограничениях выделение сигнального всплеска оказалось возможно лишь при повышении интервала накопления – количества производимых когерентных накоплений ($M > 12$). Следует заметить, что это не всегда представляется возможным в силу формата ШПС, содержащих «медленную» информационную компоненту. Вместе с тем, при некоторых потерях, когерентное накопление может заменяться некогерентным. Кроме того, в модернизированных форматах ШПС для ГНСС имеются сигналы без информационной компоненты, что делает подход увеличения количества когерентных накоплений реализуемым и оправданным [18]. Алгоритмические возможности подавления помехи на основе режекции и компенсации являются существенно большими [3; 11; 14-17], но для их практической реализации требуется РТ, обеспечивающий расширенный динамический диапазон, а также СЦЗ, обладающее АЦП с высокой разрядностью и не вносящее дополнительных aberrаций.

Заключение

В статье проведено экспериментальное исследование, включающее цифровую регистрацию и постобработку аддитивной смеси слабых шумоподобных сигналов информационно-измерительных РЭС и интенсивной гармонической помехи на выходе радиочастотного тракта, образованного типовыми структурными элементами. Получены выходные эффекты процедуры поиска ШПС при наличии и отсутствии помехи, а в случаях её воздействия – при наличии и отсутствии мер подавления. В рассмотренных условиях применяемые меры подавления помехи, предполагающие поэлементную спектральную режекцию или компенсацию, основанную на предварительном спектрально-вещном оценивании параметров помехи, обладают паритетной эффективностью. Экспериментально показано устойчивое функционирование процедуры поиска ШПС на фоне интенсивной ГП вплоть до отношений «помеха/сигнал» $q_{\text{ис}} = 74 \text{ дБ}$ (выигрыш до 14 дБ в сравнении с [3, с. 758]), что определяется характеристиками радиотракта, разрядностью АЦП и особенностями автоматической регулировки усиления в СЦЗ, приводящей к подавлению сигнала при отработывании по помехе, а не возможностями алгоритмов подавления помехи, которые при рассматрива-

емых условиях обеспечивают паритетную эффективность и обладают существенно большими потенциальными возможностями.

Литература

1. Смирнов Н.И., Горгадзе С.Ф. Помехоустойчивость асинхронных систем передачи с шумоподобными сигналами при действии узкополосных помех. Радиотехника. 1993. № 7. С. 27-36.
2. Борисов В.И., Зинчук В.М., Лимарев А.Е. и др. Помехозащищённость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов модуляцией несущей псевдослучайной последовательностью. М.: Радио и связь, 2003.
3. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.
4. Borio D. GNSS acquisition in the presence of continuous wave interference. IEEE Transactions on aerospace and electronic systems. 2010, vol. 46, no. 1, pp. 47-60.
5. Авдеев В.А., Кошкарлов А.С., Коннов Е.В. Обнаружение помех в частотных диапазонах космических навигационных систем. Журнал радиоэлектроники. 2015. № 10. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/oct15/12/text.pdf>.
6. Bek M.K., Shaheen E.M., Elgamel S.A. Analysis of the global position system acquisition process in the presence of interference. IET Radar, Sonar & Navigation. 2016, vol. 10, no. 5, pp. 850-861.
7. Ye F., Tian H., Che F. CW interference effects on the performance of GPS receivers. Progress In Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL), 19-22 November 2017, Singapore. pp. 66-72.
8. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приёма сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи. Журнал радиоэлектроники. 2018. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>.
9. Кузьмин Е.В. Анализ частотных характеристик процедур корреляционной обработки при произвольных и фазоманипулированных опорных сигналах. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 4. С. 34-44.
10. Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г. Влияние гармонической помехи на эффективность процедуры беспорогового поиска шумоподобного сигнала по времени запаздывания с переходом в частотную область определения. Радиотехника и электроника. 2022. Т. 67. № 8. С. 774-781.
11. Кузьмин Е.В. Влияние многотональной помехи на поиск псевдослучайного сигнала и повышение эффективности режекции за счёт взвешивания современными модификациями функций Дольфа-Чебышева. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 4. С. 58-61.
12. Davidovici S., Kanterakis E.G. Narrow-Band Interference Rejection Using Real-Time Fourier Transforms. IEEE Transactions on Communications. 1989, vol. 37, no. 7, pp. 713-722.
13. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993.
14. Бакитко Р.В., Польщиков В.П., Шилов А.И., Хацкевич Я.Д., Болденков Е.Н. Использование весовых функций для предварительной обработки шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех. Радиотехника. 2006. № 6. С. 13-17.
15. Кузьмин Е.В. Повышение эффективности обработки сигналов на фоне гармонической помехи за счёт выбора функции предварительного взвешивания для частотного режктора. Цифровая обработка сигналов. 2021. № 4. С. 16-20.
16. Кузьмин Е.В. Показатели качества алгоритма ДПФ-режекции узкополосной помехи при различных функциях предварительного взвешивания. Цифровая обработка сигналов. 2023. № 1. С. 48-53.
17. Кузьмин Е.В. Нейтрализация интенсивной гармонической помехи за счёт спектрально-вещного оценивания её параметров. Цифровая обработка сигналов. 2022. № 2. С. 21-28.
18. Ярлыков М.С. Полные СВОС-сигналы и их корреляционные функции. Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 9. С. 914-930.