

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБРАБОТКИ СИГНАЛОВ НА ФОНЕ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ ЗА СЧЁТ ВЫБОРА ФУНКЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ВЗВЕШИВАНИЯ ДЛЯ ЧАСТОТНОГО РЕЖЕКТОРА

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

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE SIGNALS PROCESSING IN CASE OF CONTINUOUS WAVE INTERFERENCE BY CHOOSING THE FUNCTION OF THE PRELIMINARY WEIGHTING FOR FREQUENCY NOTCH

Kuzmin E.V.

The efficiency of the spread spectrum signal delay searching is investigated for the suppression of an intense additive continuous wave interference due to frequency rejection based on the discrete Fourier transform. To reduce the influence of the «pedestal effect» on the quality of processing, the weight (window) functions of Hann, Blackman, Parzen (de la Valle-Poussin), Henning and some others are considered. Statistical experiments have established and demonstrated an increase in the efficiency of spread spectrum signal searching under these conditions when using power-law variations of the Henning window (in comparison with others considered). The article presents curves of dependences of the probability of correct signal searching for various reception conditions and typical variants of the produced coherent accumulations.

Key words: signals searching, continuous wave interference, frequency notch, weight function, discrete Fourier transform.

Ключевые слова: поиск сигналов, гармоническая помеха, частотная режекция, весовая функция, дискретное преобразование Фурье.

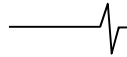
Введение и постановка задачи

Одним из наиболее распространённых видов мешающих сигналов являются узкополосные (сосредоточенные по спектру) помехи [1-13], в пределе – гармонические помехи (ГП), негативное влияние которых мотивирует многих исследователей на разработку различных алгоритмов для их нейтрализации [1-10], а также на анализ их влияния (к примеру, [11-14] и др.). В частности, известны работы, в которых борьба с помехой производится за счёт применения субполосной фильтрации [1, с. 126-128], [4, с. 47-48]. Данный способ предполагает наличие «банка» канальных полосовых фильтров, однотипные амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) которых примыкают друг к другу и перекрывают полосу частот полезного сигнала, что делает возможным отключение (или ограничение) любого из парциальных каналов при фиксации превышения в них определённого порогового уровня [1; 4]. Возможным вариантом подавления ГП является применение адаптивных фильтров (АФ) [3, с. 288-294], [8], [9, с. 754-756, 758-771], обеспечивающих необходимую АЧХ за счёт расчёта оптимальных весовых коэффициентов. Кроме того, применяется частотная режекция (ЧР) на основе прямого и обратного дискретного преобразования Фурье (ДПФ, ОДПФ) [2], [9, с. 771-778], основанная на анализе значений спектра входной реализации и обнулении поражённого помехой участка спектра, выявляемого при превышении установленного порогового уровня. Существуют и иные способы борьбы с ГП, в ко-

Исследована эффективность поиска шумоподобного сигнала по времени запаздывания при подавлении интенсивной аддитивной гармонической помехи за счёт частотной режекции на основе дискретного преобразования Фурье. Для снижения влияния «эффекта пьедестала» на качество обработки рассмотрены весовые (оконные) функции Ханна, Блэкмана, Парзена (Валле-Пуссена), Хеннинга и некоторые другие. Статистическими экспериментами установлено и продемонстрировано повышение эффективности поиска шумоподобного сигнала в указанных условиях при использовании степенных вариаций окна Хеннинга (в сравнении с другими рассмотренными). Представлены семейства зависимостей вероятности правильного выполнения поиска сигнала для различных условий приёма и типовых вариантов производимых когерентных накоплений.

торых выполняется оценивание её параметров, например – [6], [9, с. 752-754]. Каждый из вариантов подавления ГП имеет преимущества и недостатки. Как показано в [9], АФ с трансверсальной структурой и частотная режекция на основе ДПФ обладают паритетной эффективностью применения, причём процедура ЧР-ДПФ выигрывает по ряду показателей (быстродействие, ресурсозатратность, сложность алгоритма) при практической реализации [9, с. 777]. Для реализации ЧР выполняется дискретное (быстрое) преобразование Фурье, а для минимизации влияния «эффекта пьедестала» используются весовые (оконные) функции (ВФ) [2; 7], [9, с. 775], которых известно достаточно много, к примеру: [15], [16, с. 176], [17, с. 288-303], [18].

С целью повышения качества обработки сигналов на фоне помех с использованием ДПФ применяются различные ВФ. Так, в [2] для предварительного «взвешивания» и последующего выполнения ДПФ применена ВФ Хэмминга. В [5] используется прямоугольная (единичная)



ВФ и обсуждаются возникающие при этом отрицательные эффекты. В [7] рассматриваются семь различных ВФ, обосновывается целесообразность использования ВФ Парзена и Ханна, но не демонстрируются какие-либо вероятностные зависимости, характеризующие качество приёма сигнала. В [9] для реализации процедуры ЧР-ДПФ в интересах повышения качества обработки шумоподобного сигнала (ШПС) применена ВФ Парзена [9, с. 777]. Там же [9] приведены числовые значения некоторых выбранных параметров для сравнения эффективности процедуры ЧР-ДПФ с эффективностью АФ. С учётом наличия разнообразия известных ВФ [15-18], отличающихся своими характеристиками и сложностью аналитического описания, представляется целесообразным и практически полезным уточнение и развитие вопроса об их рациональном выборе для конкретных задач обработки сигналов. А поскольку одним из необходимых этапов приёма ШПС является поиск по времени запаздывания [9, с. 118-135], [19, с. 103-109], на качество которого влияет наличие ГП [10; 12], то сравнительный анализ и выбор ВФ для реализации процедуры ЧР-ДПФ при решении задачи поиска является актуальной задачей.

Цель работы: выбор функции предварительного «взвешивания» для процедуры ЧР-ДПФ в интересах повышения эффективности обработки шумоподобных сигналов (в первую очередь поиска) на фоне гармонической помехи и шума.

Модель наблюдений и частотная режекция гармонической помехи

Рассмотрим аддитивную смесь полезного шумоподобного сигнала $s(t)$, гармонической помехи $m(t)$ и белого шума $\xi(t)$ (к примеру, [6; 8], [9, с. 752-753]):

$$y(t) = A_c s(t) + A_n m(t) + \xi(t), \tag{1}$$

$$m(t) = \sin(2\pi f_n t \pm \varphi_n),$$

которая в дискретном времени $t_n = nT$ с шагом дискретизации $T = 1/f_d$ может быть представлена в виде

$$y(n) = y(t_n) = A_c s(t_n) + A_n m(t_n) + \xi(t_n, \sigma_\xi^2), \tag{2}$$

$$n = 0, 1, \dots, N-1,$$

где n – номер временной выборки; N – объём выборки; σ_ξ^2 – дисперсия квазигармонического шума, определяемая спектральной плотностью мощности N_0 и частотой дискретизации f_d . Рассматриваемый в статье способ частотной режекции гармонической помехи [9, с. 772] основан на «пороговой» обработке частотных выборок $\dot{Y}(k)$, получаемых путём дискретного преобразования Фурье [16, с. 57]

$$\dot{Y}(k) = F\{y(n)w(n)\} = \sum_{n=0}^{N-1} y(n)w(n)\exp(-j2\pi kn/N), \tag{3}$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1,$$

полученного по временным отсчётам произведения наблюдений аддитивной смеси $y(n)$ (2) и весовой

функции $w(n)$. Данный способ реализации процедуры ЧР-ДПФ предполагает обнуление значений (3) при $|\dot{Y}(k)| \geq z$, и может быть представлен аналогично [9, с. 772]:

$$y_{\text{чр}}(n) = F^{-1}\{\dot{Y}_z(k)\} = N^{-1} \sum_{k=0}^{N-1} \dot{Y}_z(k) \exp(j2\pi kn/N), \tag{4}$$

$$\dot{Y}_z(k) = \begin{cases} \dot{Y}(k), & |\dot{Y}(k)| < z, \\ 0, & |\dot{Y}(k)| \geq z. \end{cases}$$

В выражениях (3), (4) использованы следующие обозначения: k – номер частотной выборки; $F\{\bullet\}$ и $F^{-1}\{\bullet\}$ – операторы прямого и обратного ДПФ соответственно; $j = \sqrt{-1}$ – мнимая единица; $z = \text{const}$ – значение устанавливаемого порога; точка сверху означает комплексный характер величины; $y_{\text{чр}}(n)$ – отсчёты процесса на выходе процедуры ЧР-ДПФ; $\dot{Y}_z(k)$ – отсчёты комплексного спектра (3), обработанные согласно (4) – т.е. спектральные отсчёты с подавленными компонентами помехи при условии $|\dot{Y}(k)| \geq z$. Выражение для ОДПФ в (4) дано согласно [16, с. 57]. Приведённое описание дополнительно поясняется структурной схемой, представленной на рис. 1. Частотные режекторы, подобные показанному на рис. 1, многократно встречаются в литературе, например в [2], [9, с. 771].

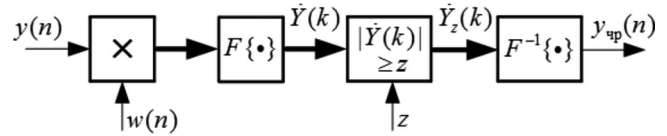
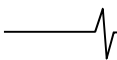


Рис. 1. Структурная схема процедуры ЧР на основе ДПФ-ОДПФ и предварительного «взвешивания» входной аддитивной смеси

Результаты статистических экспериментов

При проведении статистического исследования по выбору ВФ для процедуры ЧР-ДПФ использована опробованная методика [10; 12; 20], позволяющая получать зависимости вероятности правильного выполнения поиска ШПС от варьируемых условий наблюдения, в данном случае – при изменении отношения «ГП / сигнал» $q_{\text{пс}} = 20 \lg(A_n/A_c)$ («ГП / С»). Способ получения выходного эффекта (корреляционного «всплеска») процедуры поиска основан на применении ДПФ к квадратурно преобразованным отсчётам «взвешенной» входной реализации (2) и к отсчётам опорной псевдослучайной последовательности (длины 511), порождающей фазоманипулированный ШПС, одному периоду которого соответствует $N = 4096$. Отношение частоты дискретизации к центральной частоте ШПС равно 4. Зависимости получены методом статистического моделирования при 20000 испытаний. Задержка ШПС и начальная фаза ГП устанавливались случайными равномерно распределёнными величинами в каждом испытании. Частота ГП устанавливалась как фиксированной, так и случайной величиной.

На рис. 2-9 представлены семейства зависимостей вероятности P правильного выполнения поиска ШПС по задержке от нормированного (к максимальному значе-



нию $q_{\text{псmax}}$) отношения «ГП / С» $q_{\text{н}} = q_{\text{пс}} / q_{\text{псmax}}$. Нумерация кривых на рис. 2-9 означает использование в (3) конкретной ВФ $w(n)$: 1 – Ханна [18, с. 41]; 2 – Блэкмана [18, с. 43-44]; 3 – Парзена (Валле-Пуссена) [18, с. 51]; 4, 4a, 4b – Хеннинга $\sin^\alpha(\pi n/N)$ [18, с. 40], при параметре $\alpha = 3, 4, 5$ соответственно. Кривые на рис. 2-6, 8 получены при фиксированной частоте ГП, совпадающей с главным лепестком спектра ШПС. Кривые на рис. 7, 9 получены при случайной в каждом испытании частоте ГП, принимающей равновероятные значения в пределах полосы частот главного лепестка спектра ШПС. Отношение мощностей полезного сигнала $P_c = 0,5A_c^2$ и шума задавалось отношением $q_{\text{зн}} = 10 \lg(P_c/N_0)$ – т.н. энергетическим потенциалом (ЭП) [19, с. 11], выраженным в логарифмических единицах. Рис. 2, 4, 6, 8 получены при значении ЭП, равного 40 дБГц, а рисунки 3, 5, 7, 9 соответствуют ЭП, равному 45 дБГц. Каждое из представленных семейств получено при различном количестве производимых когерентных накоплений M , что отмечено в подрисуночных подписях. При $M = 1$ получение выходного эффекта процедуры поиска осуществлялось за счёт обработки одного периода полезного сигнала, а при $M > 1$ интервал корреляционной обработки M -кратно увеличивался.

При проведении исследований для всех рассмотренных условий наблюдения ШПС получены кривые вероятностей правильного выполнения поиска при отсутствии мер по нейтрализации ГП, т.е. без докорреляционного применения процедуры ЧР-ДГФ. Кроме того, получены аналогичные кривые при использовании в (3) прямоугольной ВФ. Эти зависимости имеют схожее поведение с показанными на рис. 2-9 кривыми, но не показаны в составе представленных семейств, поскольку занимают положение в окрестности значений $0 < q_{\text{н}} < 0,5$ – демонстрируют существенно более скромные характеристики эффективности в сравнении с кривыми 1-4. При планировании статистических вычислительных экспериментов предварительно рассматривались следующие ВФ (помимо вышеперечисленных): Бартлетта, Бомана, Блэкмана-Хэрриса, Гаусса, Кайзера, Натталла, Тьюки, Хэмминга и некоторые другие [18].

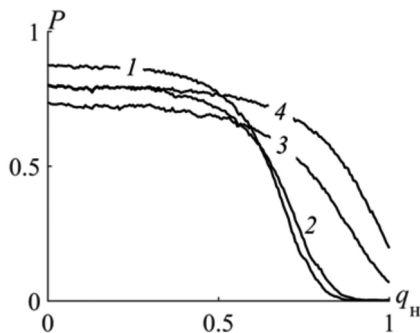


Рис. 2. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{зн}} = 40$ дБГц, $M = 2$

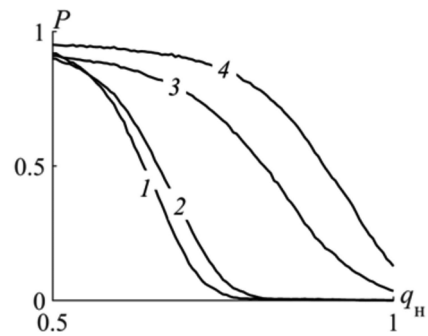


Рис. 3. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{зн}} = 45$ дБГц, $M = 1$

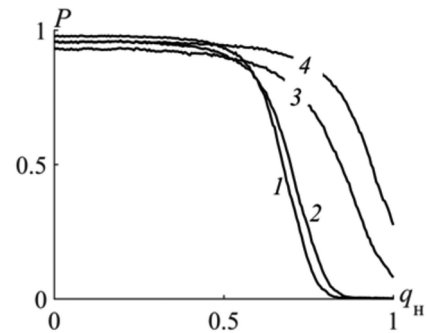


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{зн}} = 40$ дБГц, $M = 3$

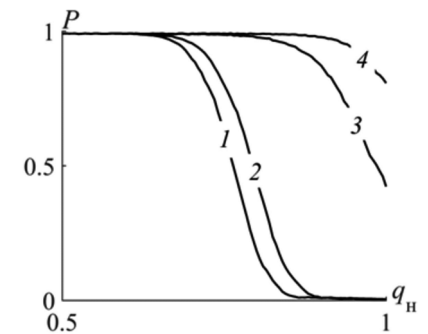


Рис. 5. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{зн}} = 45$ дБГц, $M = 2$

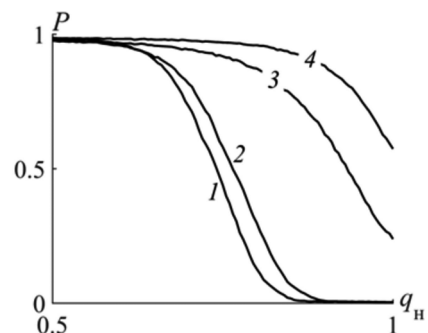


Рис. 6. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{зн}} = 40$ дБГц, $M = 4$

Далее, на основе полученных результатов проведённого статистического моделирования, сделаем выводы количественного и качественного характера. Сравним характер поведения кривых, а также дадим

¹ Некратной значению частоты дискретизации.

оценку повышения эффективности поиска ШПС на фоне ГП в зависимости от типа ВФ предварительного «взвешивания», предшествующей процедуре частотной режекции на основе прямого и обратного ДПФ.

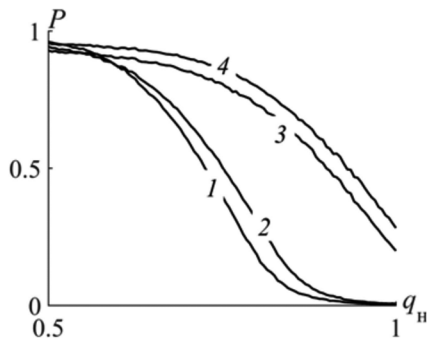


Рис. 7. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{эп}} = 45$ дБГц, $M = 1$

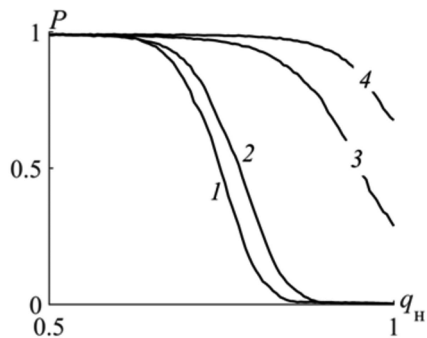


Рис. 8. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{эп}} = 40$ дБГц, $M = 5$

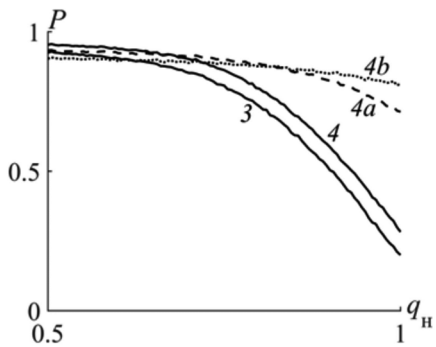


Рис. 9. Зависимость вероятности правильного выполнения поиска ШПС от нормированного отношения «ГП / С». Условия эксперимента: $q_{\text{эп}} = 45$ дБГц, $M = 1$

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 2-9, тип применяемой ВФ существенным образом влияет на качество режекции ГП и, как следствие – на эффективность процедуры поиска ШПС по задержке при обработке на фоне гармонической помехи. Для рассматриваемых условий наблюдения сигнала (1), (2) все полученные зависимости обладают ожидаемым монотонно убывающим поведением при $q_n > 0,5$ и равномерным начальным участком в области сравнительно малых значений отношения «ГП / С». Визуальное и численное сравнение представленных зависимостей позволяет сделать вывод о типе ВФ, применение которой повышает эффективность по-

иска. На всех представленных семействах заметно превосходство характеристик процедуры поиска, соответствующих степенным вариациям ВФ Хеннинга (кривые 4, 4a, 4b). Весовая функция Парзена в составе процедуры ЧР-ДПФ (см. кривые 3) применительно к поиску ШПС по задержке в указанных условиях занимает «второе место», всегда уступая ВФ Хеннинга при значении показателя её степени $\alpha = 3$ (кривые 4). При значениях $\alpha = 4,5$ (кривые 4a, 4b) также наблюдается расширение области значений отношения «ГП / С» ($q_n > 0,75$), при которых вероятность правильного поиска имеет большие значения (в сравнении с кривыми 3). Одновременно с этим при $\alpha = 4,5$ наблюдается снижение значений вероятности P в области сравнительно малых значений отношения q_n . Применение ВФ Ханна и Блэкмана (кривые 1, 2) демонстрирует близкие характеристики. Обе ВФ позволяют получать некоторое преимущество в сравнении с прямоугольной ВФ (по выбранному показателю качества). Однако как видно из рисунков, они заметно проигрывают ВФ Хеннинга и ВФ Парзена. Все другие рассмотренные и перечисленные в статье ВФ не продемонстрировали повышения эффективности процедуры поиска (для принятых условий моделирования), за исключением ВФ Бомана, позволяющей получать характеристики, паритетные демонстрируемым кривыми 3 (т.е. за счёт применения ВФ Парзена). В табл. 1, 2 выборочно представлены результаты проведённого количественного сравнения эффективности применения ВФ Хеннинга ($\alpha = 3$, кривые 4) и ВФ Парзена (кривые 3) – показаны округлённые разности $\Delta q_{\text{пс}}$ значений отношений «ГП / С», при которых обеспечивается фиксированный уровень вероятности правильного выполнения поиска ($P = \text{const}$) для каждой из двух «лидирующих» ВФ. При проведении сравнения применена интерполяция полученных кривых. Данные табл. 1 получены на основе рис. 3, 5, а в скобках показано значение $\Delta q_{\text{пс}}$, вычисленное по данным рис. 7, т.е. при случайном характере частоты ГП. Данные табл. 2 получены на основе рис. 6, 8.

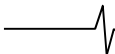
Таблица 1. Сравнение эффективности применения ВФ

| M | $\Delta q_{\text{пс}}$, дБ | |
|---|-----------------------------|------------|
| | $P = 0,9$ | $P = 0,99$ |
| 1 | 34,2 (17,2) | – |
| 2 | 16,6 | 33,7 |

Таблица 2. Сравнение эффективности применения ВФ

| M | $\Delta q_{\text{пс}}$, дБ | |
|---|-----------------------------|------------|
| | $P = 0,9$ | $P = 0,99$ |
| 4 | 22,9 | – |
| 5 | 19,1 | 59,1 |

Как видно из результатов статистических экспериментов, для рассматриваемых условий наблюдения сигнала эффективность процедуры поиска, выражаемая вероятностью P , может быть достигнута при различных значениях отношения «ГП / С» в зависимости от типа применяемой ВФ. Для рассматриваемой задачи обработки сигнала (поиска ШПС по задержке) установленное и продемонстрированное повышение эффективности исчисляет-



ся значениями порядка десятков децибел. Коэффициенты прохождения сигнала и подавления помехи зависят от типа ВФ и количества режектируемых спектральных отсчётов.

Заключение

В статье проведено исследование влияния типа весовой функции, применяемой для предварительной обработки в процедуре ЧР-ДПФ, на эффективность поиска ШПС по задержке в присутствии аддитивной гармонической помехи и шума. Рассмотрены следующие ВФ: прямоугольная, Ханна, Блэкмана, Парзена, степенные вариации окна Хеннинга и ряд других. Представлены семейства зависимостей вероятностей правильного выполнения поиска ШПС как функций отношения «ГП / С» для различных значений энергетического потенциала и типовых вариантов производимых когерентных накоплений. Установлено и проиллюстрировано заметное повышение эффективности поиска ШПС на фоне ГП при использовании в процедуре ЧР-ДПФ весовой функции Хеннинга, при показателе её степени $\alpha = 3$. Данная ВФ обладает простым аналитическим описанием, повышает потенциальные возможности и эффективность обработки ШПС в неблагоприятных условиях, что и позволяет рекомендовать её для этапа предварительного «взвешивания» при решении рассмотренных в статье задач.

Литература

1. Тузов Г.И. Статистическая теория приёма сложных сигналов. М.: Сов. радио, 1977. 400 с.
2. Davidovici S., Kanterakis E.G. Narrow-Band Interference Rejection Using Real-Time Fourier Transforms // IEEE Transactions on Communications, Jul. 1989. Vol. 37. № 7. pp. 713-722.
3. Уидроу Б., Стирнз С. Адаптивная обработка сигналов; пер. с англ. М.: Радио и связь, 1989. 440 с.
4. Витязев В.В. Цифровая частотная селекция сигналов. М.: Радио и связь, 1993. 240 с.
5. Шилов А.И., Бакитько Р.В., Польщиков В.П., Хацкелевич Я.Д. Предварительная обработка шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех // Радиотехника. 2005. № 7. С. 31-35.
6. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приёмнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи // Радиотехника. 2005. № 7. С. 36-42.
7. Бакитько Р.В., Польщиков В.П., Шилов А.И., Хацкелевич Я.Д., Болденков Е.Н. Использование весовых

функций для предварительной обработки шумоподобных сигналов при наличии сильных интерференционных помех // Радиотехника. 2006. № 6. С.13-17.

8. Перов А.И., Болденков Е.Н. Исследование адаптивных трансверсальных фильтров для приёмников спутниковой навигации при воздействии узкополосных помех // Радиотехника. 2006. № 7. С. 98-105.

9. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Радиотехника, 2010. 800 с.

10. Кузьмин Е.В., Зограф Ф.Г. Повышение вероятности правильного поиска шумоподобного сигнала по времени запаздывания на фоне тональной помехи // Успехи современной радиоэлектроники. 2016. № 11. С.137-140.

11. Куликов Г.В., Нестеров А.В., Лелюх А.А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журнал радиоэлектроники. 2018. № 11. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>.

12. Кузьмин Е.В. О влиянии квантования по уровню на эффективность процедуры поиска шумоподобного сигнала по задержке на фоне шума и гармонической помехи // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 2. С. 41-45.

13. Шахтарин Б.И. Анализ фазовой автоподстройки при воздействии гармонической помехи и шума // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66. № 8. С.782-790.

14. Кузьмин Е.В. Анализ частотных характеристик процедур квадратурной корреляционной обработки комплексных сигналов // Цифровая обработка сигналов. 2020. №4. С.13-20.

15. Harris F.J. On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform // Proceedings of the IEEE, Jan. 1978. Vol. 66. pp. 51-83.

16. Марпл.-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения; пер. с англ. М.: Мир, 1990. 584 с.

17. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях: в 2-х томах; пер. с франц. М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с.

18. Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2016. 208 с.

19. Цифровые радиоприемные системы: Справочник / под ред. М.И. Жодзишского. М.: Радио и связь, 1990. 208 с.

20. Кузьмин Е.В. Исследование эффективности беспороговой процедуры поиска псевдослучайного сигнала при ограничении разрядности входных наблюдений // Цифровая обработка сигналов. 2020. № 1. С. 9-12.