

УДК 621.391.822.3

О ВЛИЯНИИ КВАНТОВАНИЯ ПО УРОВНЮ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРОЦЕДУРЫ ПОИСКА ШУМОПОДОБНОГО СИГНАЛА ПО ЗАДЕРЖКЕ НА ФОНЕ ШУМА И ГАРМОНИЧЕСКОЙ ПОМЕХИ

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

EFFICIENCY OF THE SPREAD SPECTRUM SIGNAL SEARCHING PROCEDURE IN CASE OF CONTINUOUS WAVE INTERFERENCE AND QUANTIZATION EFFECT

Kuzmin E.V.

This paper deals with the characteristics of the non-threshold spread spectrum signal searching by the delay procedure in case of continuous wave interference influence and quantization effect. This study applied the method of statistical modeling to obtain curves of correct searching probability vs. the reception conditions for various versions of the bit-width of the analog-to-digital conversion. The article presents estimation of possible losses in efficiency of the spread spectrum signal searching procedure occurring due to the quantization effect.

Key words: spread spectrum signal, continuous wave interference, spread spectrum signal searching, correct searching probability, n-bit quantization, quantization noise, discrete Fourier transform.

Ключевые слова: шумоподобный сигнал, гармоническая помеха, поиск шумоподобного сигнала, вероятность правильного поиска, многоуровневое квантование, шум квантования, дискретное преобразование Фурье.

Введение

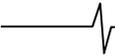
В радиоэлектронных системах широкое применение находят шумоподобные сигналы (ШПС), формируемые на основе псевдослучайных последовательностей (ПСП) [1-5]. Как правило, на начальном этапе приёма ШПС имеется неопределённость относительно времени запаздывания, оценка которого составляет так называемую задачу поиска сигнала по задержке [6]. На эффективность процедуры поиска способны оказывать влияние внешние воздействия, в простейшем случае представляющие собой гармоническую помеху [4; 5; 7-10]. Кроме того, безусловно, влияют особенности реализации цифровой обработки ШПС, и в первую очередь – эффект квантования по уровню из-за ограниченной разрядности аналого-цифрового преобразования (АЦП) [4; 5; 11]. Несмотря на сравнительно хорошую изученность вопросов, касающихся влияния квантования по уровню на качество обработки сигналов, интерес исследователей к этому направлению не ослабевает, о чём свидетельствуют многочисленные и регулярно появляющиеся научные публикации, к примеру [11-15]. Такой интерес объясняется, в частности, развитием направления реализации программных приёмников [16], где важность аналого-цифрового преобразователя переоценить сложно, поскольку он является «интерфейсом» между аппаратной и программной частью приёмника. Кроме того, исследовательский интерес к вопросам влияния АЦП возникает, когда условия приёма могут быть существенно различающимися с точки зрения количества и интенсивности

Исследованы характеристики беспороговой процедуры поиска по задержке шумоподобного сигнала, обрабатываемого в смеси с шумом и гармонической помехой при учёте эффекта квантования по уровню. Методом статистического моделирования получены семейства зависимостей вероятности правильного выполнения поиска от условий приёма для различных вариантов разрядности аналого-цифрового преобразования. Дана оценка возможных потерь в эффективности процедуры поиска шумоподобного сигнала, обусловленных эффектом квантования по уровню.

процессов, наблюдаемых на входе приёмника. В этом случае представляется важным вопрос рационального выбора параметров АЦП, гарантирующих приемлемую работоспособность при существенно отличающихся разумному балансу цены и качества.

В известных публикациях¹ приводятся модели аддитивной смеси входных воздействий, в которых полезный сигнал наблюдается на фоне шума и гармонической помехи (к примеру, [4; 5; 7-10; 17; 18]). При этом изучается влияние последней на качество обнаружения [9], синхронизации [17], демодуляции [18], предлагаются разнообразные методы борьбы с помехой [4; 7; 8; 10], а также приводятся аналитические и вычислительные оценки потерь в помехоустойчивости, связанных с квантованием сигналов по уровню [11; 19; 20]. Однако не демонстрируется влияние эффекта квантования по уровню (влияние АЦП, проявляемое возникновением шума квантования [19; 20]) на вероятность правильного выполнения беспорогового поиска, осуществляемого в условиях оговоренной модели воздействия. Данная ста-

¹ Полный перечень многочисленных известных публикаций по рассматриваемым в статье вопросам не представляется возможным привести в рамках пристатейного списка цитируемой литературы.



тья является продолжением работы [11] и посвящена исследованию влияния обозначенных факторов на эффективность беспороговой процедуры поиска ШПС.

Цель статьи: исследование влияния квантования по уровню наблюдаемых реализаций аддитивной смеси шумоподобного сигнала, гармонической помехи и шума на вероятность правильного выполнения поиска по задержке.

Модель наблюдения и процедура поиска сигнала

Полагаем, что на входе приёмника действует аддитивная смесь шумоподобного сигнала $y_s(t)$ [1, стр. 50], гармонической помехи $y_i(t)$ (к примеру, [7; 9; 18]) и шума $y_n(t)$:

$$\begin{aligned} y_{\Sigma}(t) &= A_s y_s(t) + A_i y_i(t) + y_n(t), \\ y_s(t) &= g(t) \sin(2\pi f_s t + \varphi_s), \\ g(t) &= \sum_{l=1}^L g_l \operatorname{rect}(t - (l-1)T_g), \quad g_l = \{\pm 1\}_{l=1}^L, \\ y_i(t) &= \cos(2\pi f_i t + \varphi_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где $A_s = \sqrt{2P_s}$ – амплитуда сигнала, P_s – его мощность, f_s – центральная частота сигнала, φ_s – начальная фаза, $g(t)$ – видеосигнал бинарной ПСП длины L , $\operatorname{rect}(t)$ – одиночный прямоугольный видеоимпульс с единичной амплитудой и длительностью T_g ; $A_i = \sqrt{2P_i}$ – амплитуда гармонической помехи, P_i – её мощность, f_i – частота помехи, φ_i – начальная фаза помехи. Выполнение операций дискретизации по времени аддитивной смеси $y_{\Sigma}(t)$ (1) с шагом T и квантования по уровню с округлением [11; 20] даёт отсчёты

$$y_{\Sigma_{\text{кв}}}(kT) = U \left\{ \left\lfloor \frac{y_{\Sigma}(kT)}{U} + 0.5 + \frac{m}{2} \left[-\frac{m}{2} \right] \right\rfloor \right\}, \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, N,$$

которые при проведении исследования будем считать входными наблюдениями для процедуры поиска. В выражении (2) введены следующие обозначения: $y_{\Sigma}(kT) = A_s y_s(kT) + A_i y_i(kT) + y_n(kT, \sigma_n^2)$ – выборки дискретизированной смеси (1); k – номер выборки; N – объём выборки; $\sigma_n^2 = N_0/2T$ – дисперсия дискретизированного белого шума; N_0 – спектральная плотность мощности; символ $\lfloor \cdot \rfloor$ означает выделение целой части числа; $U = D_{\max}/m$ – шаг квантования по уровню; D_{\max} – максимальный диапазон изменения значений смеси (1); $m = 2^{q_{\text{анн}}}$ – число уровней квантования; $q_{\text{анн}}$ – разрядность АЦП.

Процедура поиска сигнала $y_s(t-\tau)$ предполагает определение априорно неизвестной задержки τ и выполняется на основе оптимального правила различения сигналов, предполагающего вычисление взаимных корреляционных функций (ВКФ) Z_r входных наблюдений $y_{\Sigma}(t)$ и опорных сигналов $s_{0r}(t-\tau_r)$ – копий полезного

сигнала, отличающихся устанавливаемыми задержками τ_r [6]. Максимальное из определённых значений ВКФ является указателем на временную координату r , на основе которой вычисляется оценка задержки $\hat{\tau}$ сигнала, содержащегося в смеси (1) и наблюдениях (2).

Проводя квадратурное преобразование отсчётов входных наблюдений $\frac{I_{\Sigma}(kT)}{Q_{\Sigma}(kT)} = y_{\Sigma}(kT) \frac{\cos(2\pi f_s kT)}{\sin(2\pi f_s kT)}$ и несмещённого дискретизированного опорного сигнала $\frac{I_0(kT)}{Q_0(kT)} = s_0(kT) \frac{\cos(2\pi f_s kT)}{\sin(2\pi f_s kT)}$, что даёт комплексные векторы $\dot{Y}_{\Sigma} = \{I_{\Sigma}(kT) + jQ_{\Sigma}(kT)\}_{k=1}^N$ и $\dot{S}_0 = \{I_0(kT) + jQ_0(kT)\}_{k=1}^N$, содержащие N отсчётов, а также применяя известный подход к вычислению ВКФ [21], основанный на преобразовании Фурье, выражение для выходного эффекта беспороговой процедуры поиска запишем аналогично [11]:

$$Z = \left| F^{-1} \left\{ F(\dot{Y}_{\Sigma}) \cdot F^*(\dot{S}_0) \right\} \right|, \quad (3)$$

где $F^{-1}\{\cdot\}$ – оператор обратного преобразования Фурье; $F\{\cdot\}$ – оператор прямого преобразования Фурье; символ $|\cdot|$ означает вычисления модуля; звёздочка означает комплексное сопряжение; точка сверху означает комплексную величину. При решении задачи поиска факт присутствия полезного сигнала в смеси (1) полагается известным [6]. Частота сигнала считается известной, либо оценённой с приемлемой точностью.

Результаты исследования

В работе проведено исследование влияния разрядности АЦП $q_{\text{анн}}$ на качество процедуры поиска ШПС по задержке, основанной на выражении (3), при обработке наблюдений, формируемых по смеси (1) согласно (2). Эффективность процедуры поиска аттестовывалась вероятностью правильного выполнения поиска P [6; 10; 11], которая оценивалась на основе методики [10] при числе статистических испытаний 10^5 . Условия приёма полезного сигнала $y_s(t-\tau)$ характеризовались следующими основными параметрами: неизменным энергетическим потенциалом $q_{\text{зн}} = 10 \lg(P_s/N_0) = 45$ дБГц; изменяемым с шагом 1 дБ отношением «гармоническая помеха/сигнал» $q_{\text{пс}} = 10 \lg(P_i/P_s)$; случайными равномерно распределёнными в каждом испытании задержкой ШПС $\tau \in [0; LT_g)$ и фазой помехи $\varphi_i \in [0; 2\pi)$; объёмом выборки $N = 4096$; величиной $(Tf_s)^{-1} = 4$; длиной ПСП $L = 511$. Максимальный диапазон изменения значений смеси (1) $D_{\max} \approx 2A_{i\max}$ выбран таким образом, чтобы значения наблюдаемой реализации оказывались не выходящими за границы «раскрыва» квантователя при максимальном из рассматриваемых отношений «гармоническая помеха/сигнал» $q_{\text{пс max}}$ – при максимальной амплитуде помехи $A_{i\max}$.

На рис. 1 и 2 представлены семейства зависимостей вероятности правильного выполнения поиска P от отношения «гармоническая помеха/сигнал» $q_{\text{пс}}$, полученные при различных значениях разрядности АЦП и для

произвольно выбранных частотных смещений $0 \leq \Delta f < 1/T_g$ гармонической помехи относительно центральной частоты сигнала ($\Delta f = |f_s - f_i|$). Кривые пронумерованы группами, причём для групп 1–6 сплошными линиями показаны зависимости, полученные без ограничения (б / о) разрядности, а примыкающими к ним пунктирными линиями показаны зависимости, соответствующие разрядностям $q_{\text{анп}} = 8, 9, 10$. На рис. 1 примыкающие к сплошным линиям пунктирные линии соответствуют $q_{\text{анп}} = 8$, а на рис. 2 группы кривых 1-3 показаны в укрупнённом масштабе, что позволяет видеть интуитивно-ожидаемое расположение линий, соответствующих случаям квантованной смеси $y_{\Sigma_{\text{кв}}}(kT)$ при $q_{\text{анп}} = 8, 9, 10$, а также смеси $y_{\Sigma}(kT)$ – то есть без квантования по уровню. При $q_{\text{анп}} \geq 10$, кривые $P(q_{\text{ис}})$ становятся практически неразличимыми с кривой, рассчитанной для случая отсутствия квантования по уровню. Штрих-пунктирные кривые, образующие группу 7 на рис. 1, соответствуют знаковому ограничению смеси $\text{sign}(y_{\Sigma}(kT))$, где $\text{sign}(\cdot)$ – функция знака.

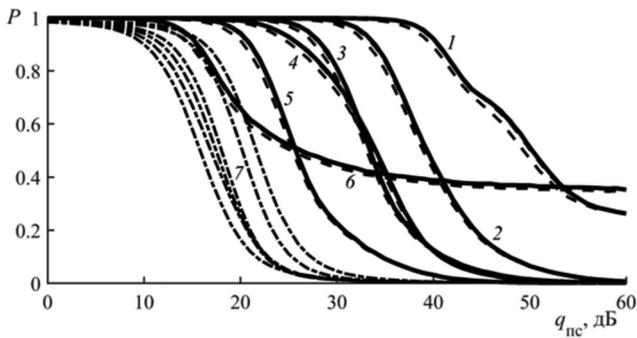


Рис. 1. Зависимости вероятности правильного выполнения поиска от отношения «гармоническая помеха/сигнал»

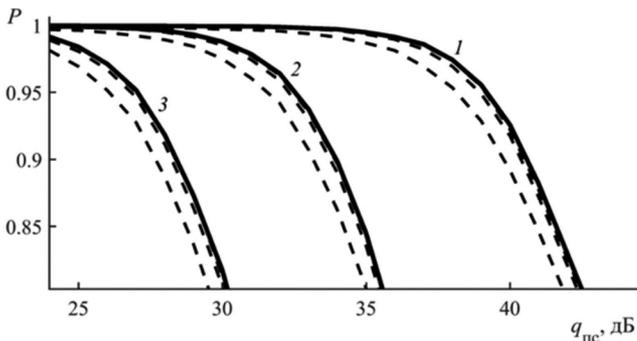


Рис. 2. Зависимости вероятности правильного выполнения поиска от отношения «гармоническая помеха/сигнал»

Представленные на рис. 1 и 2 зависимости свидетельствуют о том, что для принятых условий статистического вычислительного эксперимента, знаковое ограничение наблюдений аддитивной смеси $\text{sign}(y_{\Sigma}(kT))$, а также ограничение разрядности, учитываемое многоуровневым квантованием $y_{\Sigma_{\text{кв}}}(kT)$ наблюдений, оказывают заметное влияние на выбранный показатель качества – на вероятность правильного выполнения поиска ШПС по задержке на основе (3). Так, установлено, что при знаковом ограничении смеси (1) для рассмотренно-

го интервала отношений $q_{\text{ис}}$, вероятность правильного выполнения поиска не превосходит значений $P \leq 0,99$, а при $q_{\text{анп}} \geq 8$ вероятность достигает значений $0,999 \leq P < 1$. Полученные зависимости позволяют определить значения отношений «гармоническая помеха/сигнал» $q_{\text{ис}}$, при которых обеспечивается заданный уровень вероятности правильного выполнения поиска P , и, таким образом, сравнить влияние квантователя (2) при различных значениях $q_{\text{анп}}$.

В табл. 1-4 выборочно представлены разности в значениях отношений «гармоническая помеха/сигнал» $\Delta q_{\text{ис}}$, при которых обеспечивается вероятность правильного выполнения поиска P для случаев отсутствия и наличия квантования по уровню для указанных значений $q_{\text{анп}}$. Данные табл. 1-4 получены соответственно при использовании интерполяции кривых в группах 1–4, показанных на рис. 1.

Таблица 1. Потери в значениях $q_{\text{ис}}$ при различных $q_{\text{анп}}$ (группа кривых 1)

$q_{\text{анп}}$	$\Delta q_{\text{ис}}, \text{дБ}$	
	$P = 0,9$	$P = 0,99$
sign	27	–
8	0,8	2
9	0,3	0,5
10-12	0,1	$\rightarrow 0$

Таблица 2. Потери в значениях $q_{\text{ис}}$ при различных $q_{\text{анп}}$ (группа кривых 2)

$q_{\text{анп}}$	$\Delta q_{\text{ис}}, \text{дБ}$	
	$P = 0,9$	$P = 0,99$
sign	20	–
8	0,7	1,9
9	0,1	0,3
10-12	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$

Таблица 3. Потери в значениях $q_{\text{ис}}$ при различных $q_{\text{анп}}$ (группа кривых 3)

$q_{\text{анп}}$	$\Delta q_{\text{ис}}, \text{дБ}$	
	$P = 0,9$	$P = 0,99$
sign	14,2	–
8	0,8	1,6
9	0,2	0,2
10-12	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$

Таблица 4. Потери в значениях $q_{\text{ис}}$ при различных $q_{\text{анп}}$ (группа кривых 4)

$q_{\text{анп}}$	$\Delta q_{\text{ис}}, \text{дБ}$	
	$P = 0,9$	$P = 0,99$
sign	6,2	–
8	0,6	1,8
9	0,2	0,2
10-12	$\rightarrow 0$	$\rightarrow 0$

Как видно из табл. 1-4, при $q_{\text{анп}} = 8$ и требовании $P = 0,9$ и $P = 0,99$, допустимые значения превышения гармонической помехи над сигналом снижаются на ве-

личины порядка 0,8 дБ и 2 дБ соответственно, в сравнении со случаями отсутствия квантования по уровню. Для случаев $q_{\text{ашп}} > 8$ влияние квантования становится слабозаметным, вплоть до совпадения оценок при $q_{\text{ашп}} \geq 10$. Знаковое ограничение смеси $\text{sign}(y_{\Sigma}(kT))$ приводит к заметному снижению потенциальных возможностей обработки, что наглядно иллюстрируется кривыми группы 7. При этом количественные оценки в снижении допустимых значений превышения гармонической помехи над сигналом характеризуются величинами от единиц до десятков децибел, в зависимости от значения частотного смещения Δf помехи.

Анализ и обсуждение результатов

Продемонстрированное на рис. 1, 2 негативное влияние ограничения разрядности наблюдений объясняется возникновением шума квантования [11; 19; 20], ухудшающего условия приёма, что выражается в снижении значения энергетического потенциала $q'_{\text{ап}} = q_{\text{ап}} - 10 \lg(1 + (D_{\text{max}}^2 / (12 \cdot 2^{2q_{\text{ашп}}} \sigma_n^2)))$ [11]. В рамках принятой в статье модели воздействия (1) проведена дополнительная верификация указанного обстоятельства. На рис. 3 представлены две группы кривых вероятностей $P(q_{\text{пс}})$, полученных при числе статистических испытаний 10^5 , среди которых сплошные кривые соответствуют случаю отсутствия квантования по уровню – $y_{\Sigma}(kT)$; пунктиром показаны кривые для квантованной смеси $y_{\Sigma_{\text{кв}}}(kT)$ при $q_{\text{ашп}} = 8$; а символами «о» показаны кривые, полученные при отсутствии квантования по уровню, но при обеспечении инъекции в аддитивную смесь дополнительного дискретизированного шума $y_{\Sigma}(kT) + y_{n_{\text{доп}}}(kT, \sigma_{n_{\text{доп}}}^2)$ с дисперсией $\sigma_{n_{\text{доп}}}^2 = U^2 / 12$, $U = D_{\text{max}} / 2^8$, что имитирует шум квантования при $q_{\text{ашп}} = 8$.

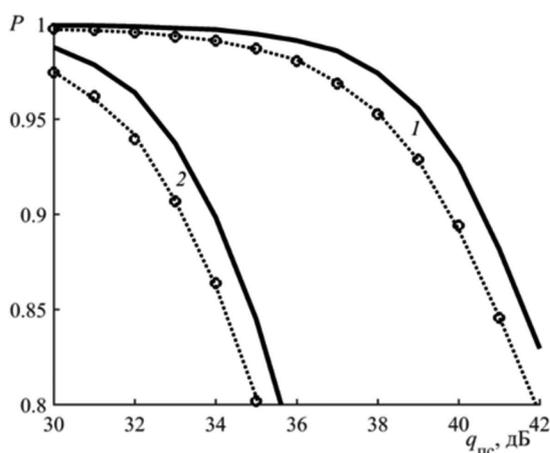


Рис. 3. Зависимости вероятности правильного выполнения поиска от отношения «гармоническая помеха/сигнал»

Как видно из рис. 3, в каждой конкретной группе кривых разброс в значениях $\Delta q_{\text{пс}}$ для различных $q_{\text{ашп}}$ объясняется возникновением шума квантования при аналого-цифровом преобразовании. Наблюдаемый существенный разброс положения указанных групп кривых

вероятностей относительно друг друга объясняется, по-видимому, зависимостью мощности гармонической помехи на выходе процедуры (3) от значения частотного смещения Δf помехи, что согласуется с [9; 18].

Заключение

Проведено исследование влияния квантования по уровню дискретизированной аддитивной смеси шумоподобного сигнала, гармонической помехи и шума на вероятность P правильного выполнения поиска по задержке. Методом статистического моделирования получены семейства зависимостей вероятности P от отношения «гармоническая помеха/сигнал» $q_{\text{пс}}$ при различных вариантах разрядности АЦП $q_{\text{ашп}}$ и произвольных частотных смещениях помехи Δf относительно частоты сигнала. Полученные зависимости $P(q_{\text{пс}})$ имеют монотонно-убывающий характер (рис. 1-3) и напоминают передаточные амплитудно-частотные характеристики фильтров нижних частот, причём «частоты среза» таких «фильтров» существенно зависят от величины частотного смещения Δf .

Квантование аддитивной смеси (1) по уровню на основе выражения (2) дополнительно ухудшает условия приёма полезного сигнала, поскольку образует шум квантования. Это обстоятельство снижает эффективность процедуры поиска ШПС по задержке на основе (3), что выражается в уменьшении величины отношения $q_{\text{пс}}$, при котором обеспечивается фиксированный уровень вероятности P правильного выполнения поиска.

Полученные количественные оценки возможных потерь $\Delta q_{\text{пс}}$ в отношении «гармоническая помеха/сигнал» при предварительной обработке смеси (1) на основе (2) имеют следующие значения. Установлено, что при рассмотренных условиях приёма знаковое ограничение аддитивной смеси $\text{sign}(y_{\Sigma}(kT))$ приводит к наибольшим потерям в допустимом отношении $q_{\text{пс}}$, выражаемым значениями $\Delta q_{\text{пс}}$ от единиц до десятков децибел в зависимости от частотного смещения помехи Δf относительно частоты сигнала. Многоуровневое квантование смеси $y_{\Sigma_{\text{кв}}}(kT)$ при разрядности АЦП $q_{\text{ашп}} \geq 8$ оказывает существенно меньшее влияние, исчисляемое значениями $\Delta q_{\text{пс}} < 1$ дБ ($P = 0,9$) и $\Delta q_{\text{пс}} < 2$ дБ ($P = 0,99$).

Таким образом, при высоких требованиях к достоверности поиска ШПС по задержке ($0,999 \leq P < 1$) в условиях (1), (2), необходимо применение многоуровневого квантования при разрядности АЦП $q_{\text{ашп}} \geq 8$, поскольку для рассмотренного интервала отношений $q_{\text{пс}}$, при знаковом ограничении смеси (1) вероятность $P \leq 0,99$.

Литература

1. Тузов Г.И. Статистическая теория приёма сложных сигналов / Г.И. Тузов. – М.: Сов. радио, 1977. – 400 с.
2. Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л.Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985. – 384 с.

3. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – 2-е изд., испр.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. – 1104 с.
4. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / под ред. А.И. Перова, В.Н. Харисова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Радиотехника, 2010. – 800 с.
5. Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems / Eds. Peter J.G. Teunissen, Oliver Montenbruck. – Springer International Publishing AG, 2017. – 1327 с.
6. Поиск, обнаружение и измерение параметров сигналов в радионавигационных системах / В.П. Ипатов, Ю.М. Казаринов, Ю.А. Коломенский, Ю.Д. Ульяницкий; под ред. Ю.М. Казаринова. – М.: Сов. радио, 1975. – 296 с.
7. Перов А.И. Синтез оптимального алгоритма обработки сигналов в приёмнике спутниковой навигации при воздействии гармонической помехи / А.И. Перов // Радиотехника. – 2005. – № 7. – С. 36-42. (Радиосистемы (вып. 89)).
8. Перов А.И. Исследование адаптивных трансверсальных фильтров для приёмников спутниковой навигации при воздействии узкополосных помех / А.И. Перов, Е.Н. Болденков // Радиотехника. 2006. №7. С. 98-105. (Радиосистемы (вып. 101)).
9. Неровный В.В. Эффективность поиска и обнаружения сигналов ГНСС в условиях гармонических помех / В.В. Неровный, П.Д. Коратаев, А.В. Коровин, М.В. Авдеев // Сб. трудов XX Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация и связь». – 2014. – С. 1030-1034.
10. Кузьмин Е.В. Повышение вероятности правильного поиска шумоподобного сигнала по времени запаздывания на фоне тональной помехи / Е.В. Кузьмин, Ф.Г. Зограф // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – №11. – С. 137-140.
11. Кузьмин Е.В. Исследование эффективности беспроговой процедуры поиска псевдослучайного сигнала при ограничении разрядности входных наблюдений / Е.В. Кузьмин // Цифровая обработка сигналов. – 2020. – № 1. – С. 9-12.
12. Беляков А.В. Влияние аналого-цифрового преобразователя на вероятностные характеристики гауссова шума / А.В. Беляков, А.В. Якимов // Известия вузов. Радиофизика. – 2002. – Т. XLV. – № 6. – С. 533-537.
13. Брюханов Ю.А. Метод исследования периодических процессов в неавтономных системах дискретного времени с квантованием / Ю.А. Брюханов // Радиотехника и электроника. – 2008. – Т. 53. – № 7. – С. 851-857.
14. Брюханов Ю.А. Нелинейные процессы в цифровых фильтрах с квантованием и переполнением / Ю.А. Брюханов, Ю.А. Лукашевич // Радиотехника и электроника. – 2015. – Т. 60. – № 2. – С. 179-185.
15. Брюханов Ю.А. Нелинейные искажения при сигнала-дельта аналого-цифровом преобразовании сигналов / Ю.А. Брюханов, Ю.А. Лукашевич // Радиотехника и электроника. – 2017. – Т. 62. – № 3. – С. 224-233.
16. Галкин В.А. Основы программно-конфигурируемого радио / В.А. Галкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2015. – 372 с.
17. Сидоркина Ю.А. Схема Костаса при воздействии аддитивных гармонических помех и широкополосного шума / Ю.А. Сидоркина, В.В. Сизых, Б.И. Шахтарин, В.А. Шевцев // Радиотехника и электроника. – 2016. – Т. 61. – № 7. – С. 671-680.
18. Куликов Г.В. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи / Г.В. Куликов, А.В. Нестеров, А.А. Лелюх // Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. – 2018. – № 11. – Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/nov18/9/text.pdf>.
19. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов / А.Б. Сергиенко – СПб.: Питер, 2003. – 604 с.
20. Глинченко А.С. Цифровая обработка сигналов: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. / А.С. Глинченко. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2005. – 482 с.
21. Daigle J.N. A specialized fast cross-correlation for acoustical measurements using coded sequences / J.N. Daigle, N. Xiang // J. Acoust. Soc. Am., Vol. 119, № 1, January 2006. Pp.330-335.