

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ЛИНЕЙНО-УСРЕДНЯЮЩЕЙ И МЕДИАННОЙ ФИЛЬТРАЦИЙ ПРИ КОРРЕЛЯЦИОННОМ ПРИЕМЕ В КОРОТКОИМПУЛЬСНЫХ СВЕРХШИРОКОПОЛОСНЫХ СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ

EVALUATION OF LINEAR AVERAGING AND MEDIAN FILTERING WITH CORRELATIONAL RECEPTION IN THE SHORT-PULSE ULTRA-WIDEBAND RADIO SYSTEMS

V. Kalinin
V. Nosov

Annotation

The article discusses the use of linear averaging and median filtering for increasing of noise immunity short-pulse UWB communication systems. It is carried out to compare the efficacy of these types of filtration and quantification of reducing the probability of error.

Keywords: the noise immunity of radio systems, short-pulse UWB radio, line-averaging filtering, median filtering.

Калинин Вячеслав Олегович
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", г. Новосибирск
Носов Владимир Иванович
ФГБОУ ВО "Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики", г. Новосибирск

Аннотация

В работе рассматривается применение линейно-усредняющей и медианной фильтрации для повышения помехоустойчивости короткоимпульсных сверхширокополосных систем связи. Производится сравнение эффективности этих видов фильтрации. Выполнена количественная оценка выигрыша в вероятности ошибки.

Ключевые слова:

Помехоустойчивость систем радиосвязи, короткоимпульсная сверхширокополосная радиосвязь, линейно-усредняющая фильтрация, медианная фильтрация.

1. Введение.

В настоящем исследовании предметом рассмотрения является система связи, использующая короткоимпульсные сверхширокополосные (КСШП) сигналы, с модуляцией BPSK [4] и корреляционным приемом, в условиях работы на открытом пространстве (двухлучевой канал [1,9]). Поскольку КСШП сигналы обладают сверхшироким (более 500 МГц) спектром и очень короткой длительностью (единицы и доли наносекунд), узкополосные помехи оказывают на них слабое влияние, а основной помехой являются шумы, включая и иные сверхширокополосные сигналы, энергия которых распределена во всем рабочем диапазоне частот [10].

Для борьбы с шумами в сверхширокой полосе частот необходимо использовать фильтрацию во временной области. Несложными в алгоритмической реализации являются линейно-усредняющий и медианный фильтры, последний из которых относится к классу нелинейных фильтров [2,3]. Из анализа литературы известно, что данные виды фильтров применяются обычно в много-

мерном режиме, и как правило для фильтрации изображений [2, 11], однако, нет никаких противоречий в применении данных видов фильтрации к двумерным зашумленным сигналам. В работе исследуются методы линейно-усредняющей и медианной фильтрации, применительно к КСШП системе связи, позволяющие ослабить влияние шумов и потенциально улучшить качество корреляционного приема КСШП сигнала. Проведено моделирование работы фильтров, получены количественные оценки улучшения помехоустойчивости системы, выполнено сравнение эффективности линейно-усредняющего (ЛУФ), медианного (МФ) и комплексного каскадного фильтра (последовательное соединение ЛУФ+МФ), при использовании в КСШП системе связи.

2. Модель системы

с двухлучевым каналом связи.

Двухлучевой канал радиосвязи для КСШП системы рассмотрен в [1,5,9]. Основной его особенностью является искажение формы принимаемого импульса в точке приема, которое зависит от взаимного пространственно-

го положения приемника и передатчика и от параметров излучаемого сигнала. На рис.1 представлены формы импульсов в приемной антенне, для двух расстояний между приемником и передатчиком [9]. Корреляционный прием в КСШП системах осуществляется по классическому принципу [6,7], а корреляционный приемник содержит все основные элементы – перемножитель, интегратор, решающее устройство, рис.2.

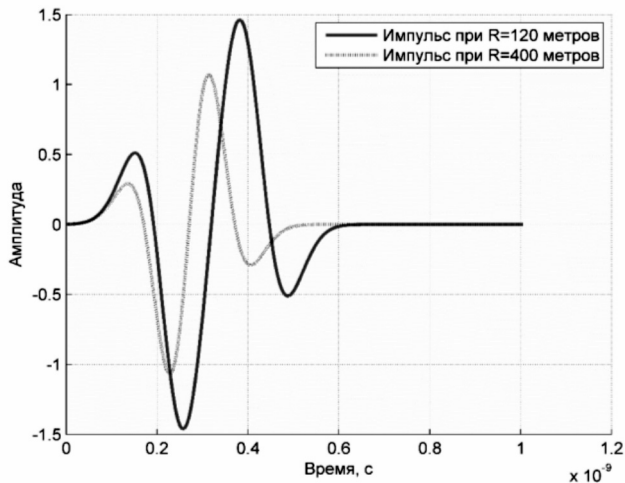


Рисунок 1. Модели импульсных сигналов в приемной антенне для разного расстояния между приемником и передатчиком.

Искажение сигнала в канале происходит вследствие искажения формы импульса при многолучевом распространении и добавления к сигналу аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ) [9]:

$$S_{r+n}(t) = n(t) + S_r(t) = n(t) + [s(t) + s'(t + \Delta t)] \quad (1)$$

где $S_r(t)$ – сигнал на входе приемника, $s(t)$ – образ исходного сигнала на приемной стороне в прямом луче,

$$s'(t + \Delta t) = -s(t + \Delta t)$$

– образ исходного сигнала на приемной стороне в от-

раженном луче с учетом временного сдвига Δt и изменения фазы сигнала на 180° при зеркальном отражении, $n(t)$ – АБГШ [7].

В аналитическом виде работа корреляционного приемника, представленного на рис.2, описывается следующим образом [9]:

$$\begin{aligned} \int_0^{T_{\max}} [S_0(t) \cdot (S_r(t) + n(t))] dt &= \int_0^{T_{\max}} [S_0(t) \cdot S_r(t) + S_0(t) \cdot n(t)] dt = \\ &= \underbrace{\int_0^{T_{\max}} [S_0(t) \cdot S_r(t)] dt}_{q_s} + \underbrace{\int_0^{T_{\max}} [S_0(t) \cdot n(t)] dt}_{q_n} = q_s + q_n = z(T_{\max}) \end{aligned} \quad (2)$$

где q_s – сигнальный компонент (значение сигнальной функции при нулевом сдвиге шаблона и принимаемого импульса), q_n – шумовой компонент (значение шумовой функции при нулевом сдвиге), [8], $S_0(t)$ – шаблон сигнала.

Опытным путем установлено, что сигнал после прохождения двухлучевого канала слабо коррелирует с исходным сигналом и целесообразно использовать корреляцию с шаблоном, образованным на основе второй производной исходного сигнала.

В (2) q_s есть взаимная корреляция между $S_0(t)$ и $S_r(t)$, q_n – взаимная корреляция между шаблоном и шумовой реализацией.

В случае моделирования, сигналы $S_0(t)$, $S_r(t)$ и шумовая реализация $n(t)$, дискретизируются с периодом дискретизации Δ и представляют собой наборы из N значений (векторы): $S_{0\text{dis}}(i)$, $S_{r\text{dis}}(i)$, $n_{\text{dis}}(i)$.

В этом случае корреляцию можно записать так:

$$q_s = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_{0\text{dis}}(i) \cdot S_{r\text{dis}}(i) \quad (3)$$

$$q_n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} S_{0\text{dis}}(i) \cdot n_{\text{dis}}(i) \quad (4)$$



Рисунок 2. Корреляционный приемник для КСШП сигнала.

С учетом нормирования коэффициента корреляции к интервалу $[-1;1]$ [12], общее рабочее выражение для коррелятора приемника будет иметь вид:

$$z_{norm}(T_{max}) \Big|_{T_{max}=\Delta(N-1)} = \frac{q_s + q_n}{K_{norm}} = \frac{\sum_{i=0}^{N-1} S_{0dis}(i) \cdot (S_{rdis}(i) + n_{dis}(i))}{\left[\sum_{i=0}^{N-1} S_{0dis}^2(i) \sum_{i=0}^{N-1} (S_{rdis}(i) + n_{dis}(i))^2 \right]^{1/2}} \quad (5)$$

где K_{norm} – нормировочный коэффициент [12].

Выражение (5) является элементом математической модели системы, с его помощью приемник вычисляет коэффициент корреляции, который в решающем устройстве сравнивается с нулевым порогом (рис.2), для определения принятого сигнала.

Искажение сигнала в точке приема за счет интерференции импульсов снижает коэффициент корреляции, а АБГШ канала, добавляемый к сигналу, может привести к неверному решению, что будет обозначать ошибку в приемнике.

3. Линейно-усредняющая и медианная фильтрации

Исследуем два вида фильтров – линейно-усредняющий фильтр со скользящим окном и нелинейный медианный фильтр, применяя алгоритмы фильтрации для обработки принимаемого сигнала с целью минимизации влияния шума на дальнейший корреляционный процесс.

Линейно-усредняющая фильтрация [2] может применяться для первичной обработки оцифрованных сигналов и осуществляет эффект сглаживания, что может благоприятно сказаться на качестве приема КСШП вследствие увеличения коэффициента корреляции.

Линейно-усредняющий фильтр (ЛУФ) со скользящим окном для двумерного сигнала описывается следующим выражением:

$$x_{out}(i) = \sum_{j=i-(A-1)/2}^{i+(A-1)/2} \frac{x(j)}{A}, \quad i \in [1, L] \quad (6)$$

где $x_{out}(i)$ – выходной i -й отсчет фильтра,
 L – число отсчетов на сигнальном интервале

$$t \in [0, T_{max}],$$

A – апертюра (размер окна) фильтра – нечетное число,
 $x(j)$ – рабочий отсчет внутри апертюры (окна фильтрации).

Сигнал на входе приемника $S_r(t)$, без помех, имеет вид, показанный на рис.1. На рис.3 и 5 представлены сигналы на входе приемника с шумом и сигнал на выходе линейно-усредняющего фильтра при величине апертюры равной 15 отсчетам.

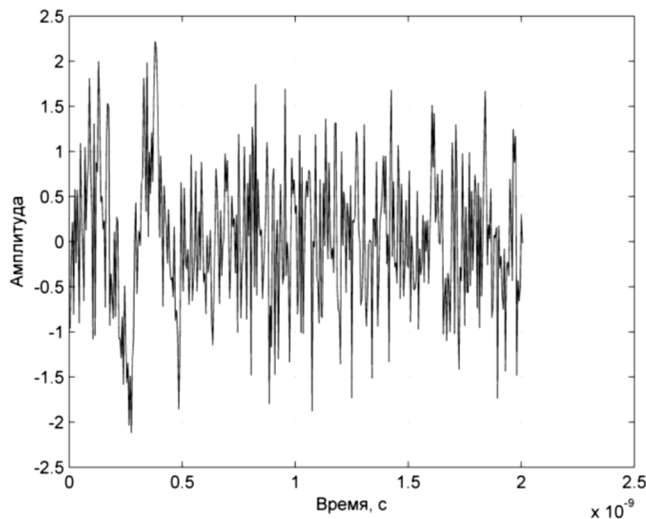


Рисунок 3. Сигнал на входе приемника в присутствии шума.

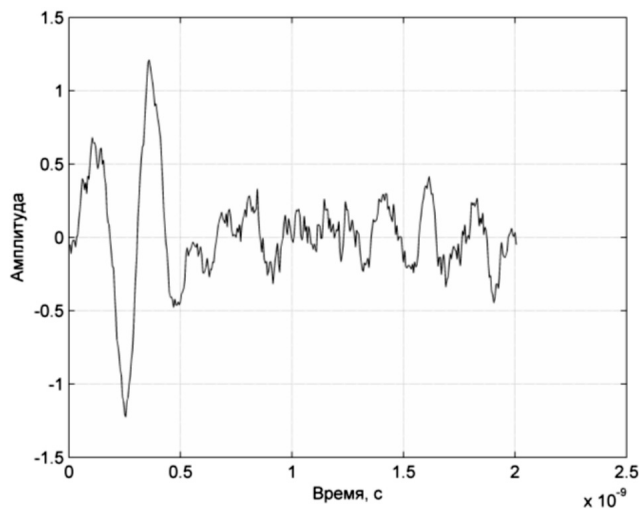


Рисунок 5. Сигнал на выходе линейно-усредняющего фильтра, $A=15$.

Ключевой особенностью линейно-усредняющего фильтра со скользящим окном является то, что свойства фильтра изменяются в зависимости от размера окна. Исходный сигнал, применяемый в исследовании, имеет полную длительность 400 отсчетов ($L=400$). Изменение свойства фильтра при изменении величины окна обуславливает и его различное действие на систему.

На рис.4 показана схема включения фильтров.

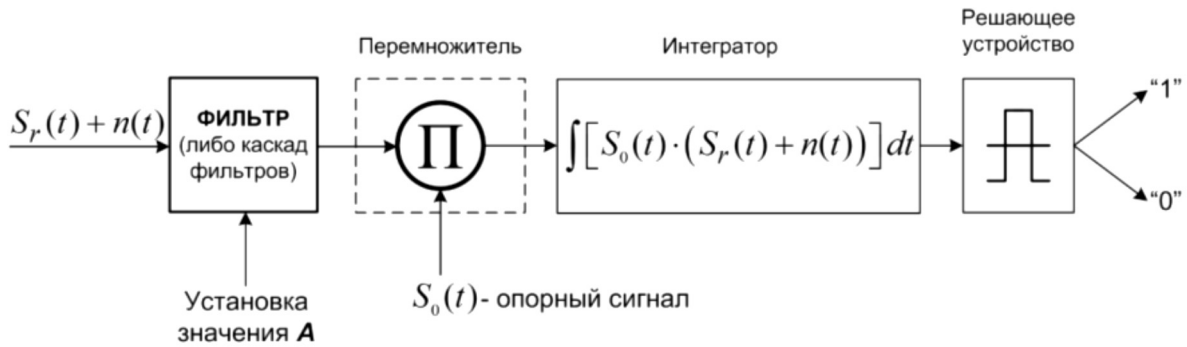


Рисунок 4. Схема включения рассматриваемых фильтров.

Медианный фильтр применяется главным образом для фильтрации изображений [3, 11] и обычно используется в двумерном виде. Он относится к простым нелинейным фильтрам, и так же, как и ЛУФ, имеет скользящее окно (апертуру), состоящее всегда из нечетного числа отсчетов. Выражение, определяющее работу фильтра, для двумерного сигнала может быть записано так [2, 3, 11]:

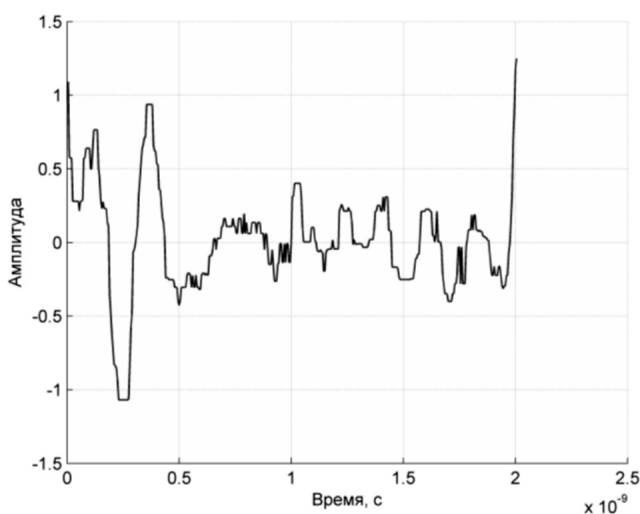
$$x_{out}(i) = med(x_{j=i-(A-1)/2}, \dots, x_{j=i}, \dots, x_{j=i+(A-1)/2}), \quad (7)$$

$$i \in [1, L]$$

где med – операция медианы, $x_{j=i-(A-1)/2}$ – левый отсчет апертуры, $x_{j=i}$ – центральный отсчет апертуры, $x_{j=i+(A-1)/2}$ – правый отсчет апертуры, A – апертура – окно фильтра (нечетное число отсчетов), L – число отсчетов на сигнальном интервале

$$t \in [0, T_{max}]$$

Сигнал на выходе медианного фильтра (для значения апертуры $A=15$), полученный в результате обработки зашумленного сигнала, показанного на рис.3, представлен на рис.6.

Рисунок 6. Сигнал на выходе медианного фильтра, $A=15$.

В исследовании также применялось каскадное включение фильтров – первая ступень – ЛУФ, вторая ступень – медианный фильтр, который обрабатывал сигнал уже предварительно очищенный от шума, с целью обеспечить сглаживание и как следствие более высокую корреляцию с шаблоном. Данный вид фильтрации назовем двойной или комплексной фильтрацией.

Для исследования влияния фильтров на процесс корреляции при разном значении апертуры, в процессе моделирования работы системы величина апертуры изменялась от 3 до 51 отсчета, принимая нечетные значения. Для каждого значения апертуры производилось вычисление коэффициента корреляции (в качестве шаблона применялся импульс Гаусса 2-го порядка – образ сигнала на входе приемника при однолучевом приеме [9]).

Результат вычисления зависимости коэффициента корреляции от величины апертуры, для трех случаев фильтрации и контрольного эксперимента с "чистой" корреляцией без предварительной обработки сигнала, показан на рис. 7. Следует обратить внимание на то, что данный результат получен для низкого уровня мешающего шума, или другими словами – при относительно высоком отношении сигнал/шум (Signal-to-Noise Rate – SNR), поскольку "чистая" корреляция дает величину более 0,3 что соответствует большому SNR.

Из анализа полученных результатов видно, что медианная фильтрация обеспечивает наименьший выигрыш, относительно простой корреляции, уступая ~25% линейно-усредняющей фильтрации.

При этом, наблюдается достаточно выраженное значение максимума коэффициента корреляции, что дает основание для определения оптимальной величины апертуры (для данного случая $A_{opt}=15$), обеспечивающей максимум коэффициента корреляции. Комплексная фильтрация ЛУФ+МФ не дает сколь-нибудь существенного преимущества относительно ЛУФ, за исключением той особенности, что имеет практически максимальный

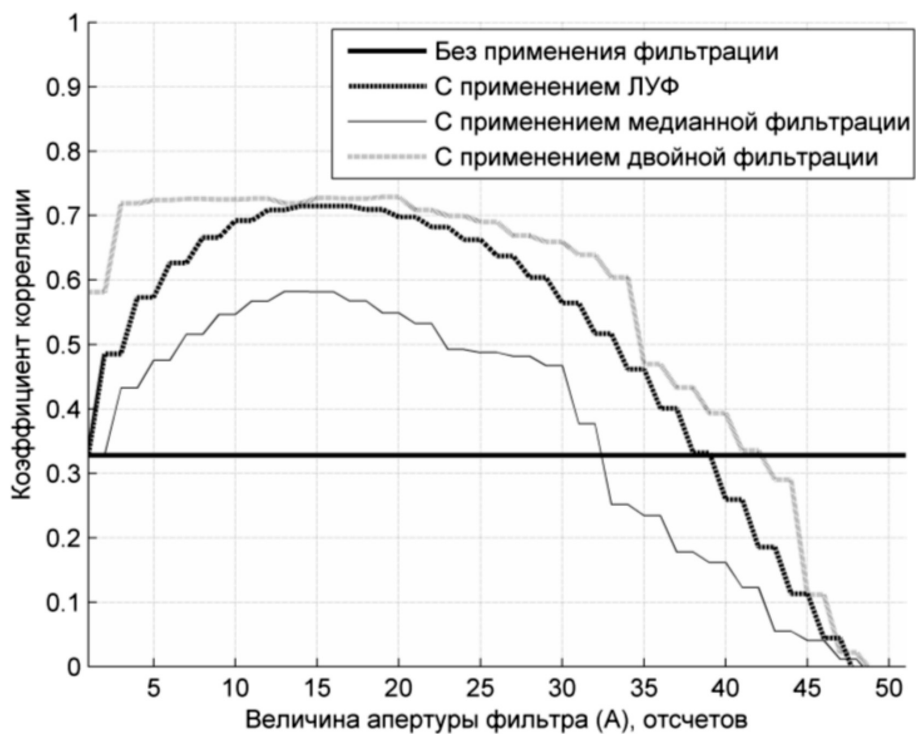


Рисунок 7. Зависимость коэффициента корреляции от апертуры фильтра.

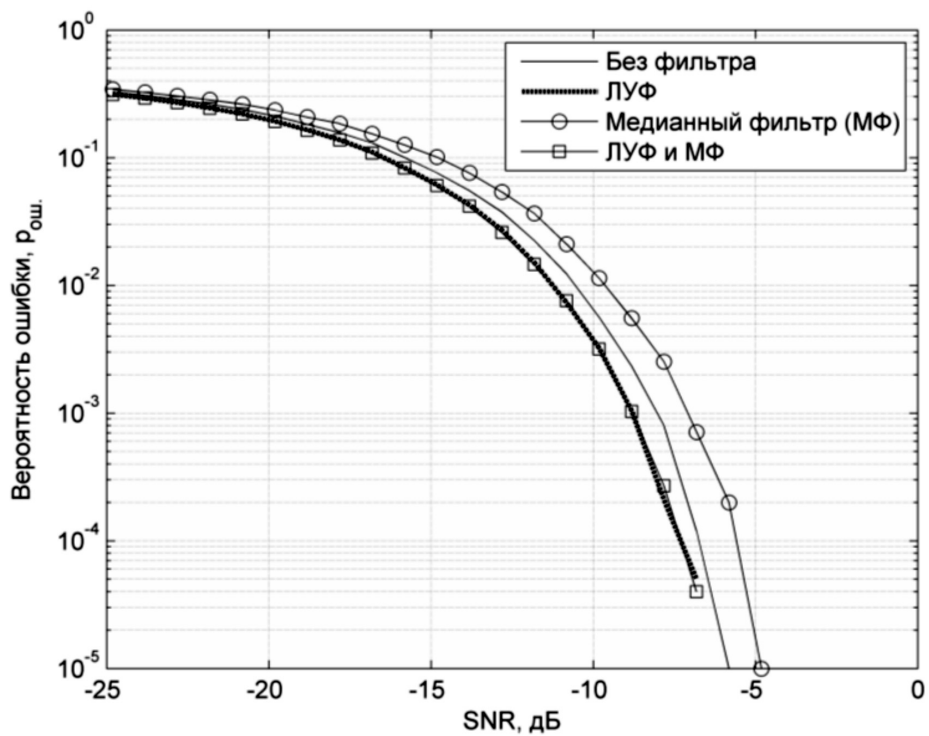


Рисунок 8. Вероятность ошибки при различном отношении сигнал/шум для системы с рассматриваемыми типами фильтрации.

выигрыш по корреляции уже при малых значениях апертуры, что может быть использовано для снижения вычислительной сложности алгоритма фильтра, однако, требуют дополнительных исследований.

4. Влияние линейно-усредняющей и медианной фильтрации на помехоустойчивость КСШП систем радиосвязи

Для проверки влияния фильтров на помехоустойчивость КСШП системы, использовалась модель системы с двухлучевым каналом связи [1,5,9].

Фильтры устанавливались в соответствии со схемой, представленной на рис.4. Численное моделирование работы системы выполнялось при количестве импульсов за один проход 105, что обеспечило измерение вероятности ошибки до 10^{-5} . Величина апертуры фильтра соответствовала середине диапазона для максимальной корреляции – 15 отсчетов (рис.7).

Результат моделирования показан на рис.8.

Эффективность медианной фильтрации оказалась отрицательной – вероятность ошибки после медианной фильтрации выросла, относительно "чистой" корреляции.

Однако, линейно-усредняющая фильтрация показала улучшение качества корреляционного процесса, что выразилось в уменьшении вероятности ошибки при фиксированном отношении сигнал/шум. Комплексная фильтрация показала практически идентичную эффективность с ЛУФ, что позволяет сделать вывод об основном вкладе ЛУФ в борьбу с шумами при комплексной (ЛУФ+МФ) фильтрации КСШП сигнала.

Обратная последовательность каскадного включения фильтров (МФ+ЛУФ) не рассматривалась из-за предполагаемой низкой эффективности.

Выигрыш в помехоустойчивости при применении ЛУФ и комплексной фильтрации изменяется в зависимости от отношения сигнал/шум и становится особенно заметен на малых вероятностях ошибки. График зависимости величины выигрыша (в раз) по вероятности ошибки от отношения сигнал/шум для ЛУФ и комплексной фильтрации показан на рис.9.

При отношении сигнал/шум –8 дБ, выигрыш по вероятности ошибки для ЛУФ составляет 3,5 раза. Для комплексной фильтрации эта величина ниже – около 2,9 раз, при том, что сложность реализации комплексного алгоритма выше. Медианная фильтрация выигрыша помехоустойчивости не дает и графические результаты для нее не представлены.

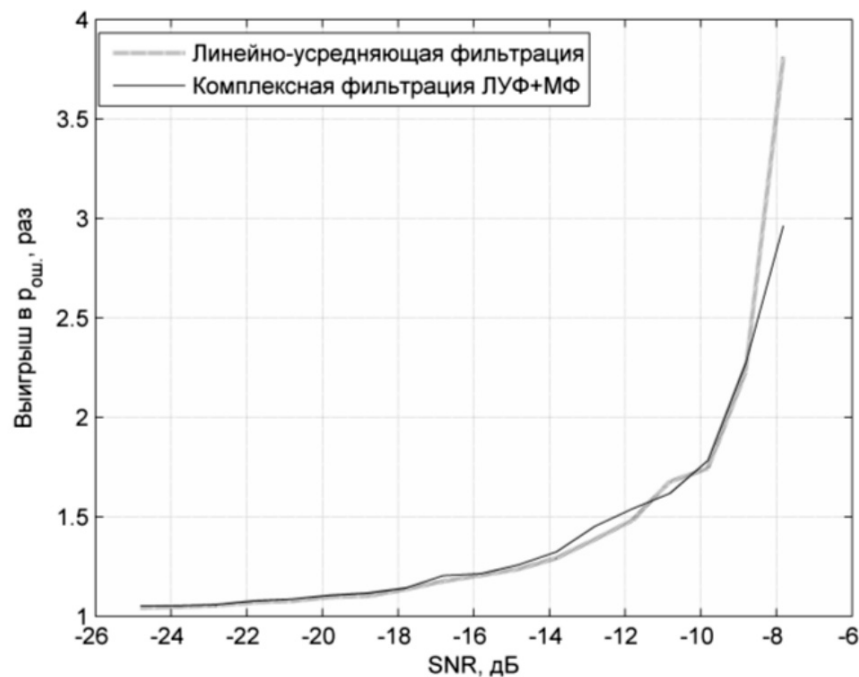


Рисунок 9. Зависимость величины выигрыша по вероятности ошибки от отношения сигнал/шум.

5. Выводы

Из трех исследованных методов фильтрации шумов, для КСШП сигналов наилучшим является метод линейно-усредняющей фильтрации со скользящим окном, при фиксированной величине апертуры. Метод линейно-усредняющей фильтрации способен более чем в три раза, относительно обычного корреляционного приема, снизить вероятность ошибки при работе КСШП системы радиосвязи в условиях двухлучевого распространения.

В качестве модели шума использовался АБГШ, перекрывающий весь рабочий диапазон частот системы связи.

Фильтрация и анализ производились во временной области.

В процессе исследования разработан простой алгоритм линейно-усредняющей фильтрации и методика поиска оптимального значения апертуры фильтра, включающая в себя вычислитель выигрыша помехоустойчивости системы по вероятности ошибки при применении фильтрации. Установлено, что применение комплексного каскадного фильтра (ЛУФ+МФ) не приводит к сколь-нибудь значимому выигрышу в помехоустойчивости, и в обычном виде его применение не эффективно вследствие повышения вычислительной сложности алгоритма фильтра.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин В. О., Носов В. И. Модель двухлучевого канала короткоимпульсной сверхширокополосной системы радиосвязи // Информатика и проблемы телекоммуникаций : Рос. науч.-техн. конф. / Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. Новосибирск, 2015. – С. 174–177.
2. Обработка изображений линейными и усредняющими фильтрами: Метод. указания / Сост. А.Л.Приоров, В.В.Хрящев; Яросл. Гос. Ун-т. Ярославль, 2006. 52 с.
3. Т. С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г. Дж. Нуссбаумер, Ш. Зохар, Б. И. Юстуссон, Ш.-Г. Тянь. Быстрые алгоритмы в цифровой обработке изображений / Т. С. Хуанг, Дж.-О. Эклунд, Г. Дж. Нуссбаумер и др.; Под ред. Т. С. Хуанга: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1984. – 224 с.
4. Оценка параметров короткоимпульсной сверхширокополосной системы связи. / Калинин В.О., Носов В.И. // Вестник СибГУТИ, – 2011. – №3, с.73–85.
5. Kalinin V.O., Nosov V.I. Assessment of Effect of Influences on Pulse-Based UWB Radio Communication Systems / 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). Proceedings. National Research University Higher School of Economics. Russia, Moscow, May 12–14, 2016. IEEE Catalog Number: CFP13794-CDR. ISBN: 978-1-4799-1060-1.
6. Прокис Джон. Цифровая связь. Пер. с англ. / Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь. 2000. – 800 с.
7. Скляр Бернанд. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд.2-е, испр.: Пер.с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2003.– 1104 с.
8. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320 с.
9. Исследование характеристик двухлучевого радиоканала короткоимпульсной сверхширокополосной системы связи. / Калинин В.О., Носов В.И. // Телекоммуникации, –2016. –№6, С.28–35
10. Радзиевский В.Г., Трифонов П.А. Обработка сверхширокополосных сигналов и помех. // –М.: Радиотехника, 2009. –286 с.
11. Прэтт У. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. – М.: Мир, 1982. – Кн. 2 – 480 с.
12. Эммануил С. Айфичер, Барри У.Джервис. Цифровая обработка сигналов: практический подход. Изд.2-е.: Пер.с англ. М.: Издательский дом "Вильямс", 2008. –992 с.

© В.О. Калинин, В.И. Носов, (v.kalinin2@gmail.com), Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»,

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ИНСТИТУТ БИЗНЕС-ОБРАЗОВАНИЯ

негосударственное образовательное учреждение высшего профессионального образования

Реклама

Традиции. Инновации. Успех!

И ИБ **МИБО**