

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ПРИЕМА ИНФОРМАЦИИ В УСЛОВИЯХ УЗКОПОЛОСНЫХ ПОМЕХ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ ПРИБЛИЖЕНИЯ К НОРМАЛЬНОМУ ЗАКОНУ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2025-19-4-12-20

Лобов Евгений МихайловичМосковский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, e.m.lobov@mtuci.ru**Лобова Елизавета Олеговна,**Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, e.o.lobova@mtuci.ru**Дагаева Александра Сергеевна,**Московский технический университет связи и информатики,
Москва, Россия, Sasha2010.008@mail.ru**Manuscript received** 25 February 2025;**Accepted** 30 March 2025

Ключевые слова: декаметровый диапазон, приём в условиях негауссовских помех, оценка помехоустойчивости, широкополосный сигнал, спектральная плотность мощности.

В настоящей статье приведено исследование влияния негауссовости распределения смеси помехи и шума на помехоустойчивость приёма сигнала с расширением спектра и двоичной фазовой модуляцией. Используемые модели помех соответствуют помехам, наблюдаемым в эфире в декаметровом диапазоне длин волн - фазоманипулированный сигнал и сигнал с линейной частотной модуляцией. Приведены результаты имитационного моделирования, показывающие, что отклонение распределения от гауссовского влияет на помехоустойчивость приёма в разной степени в зависимости структуры самой помехи. Небольшие отклонения от гауссовости смеси помехи и шума не приводят к существенным потерям помехоустойчивости приёма сигнала с модуляцией ФМ-2. Негауссовское распределение смеси помехи и шума не всегда приводит к существенным потерям в помехоустойчивости. Например, при помехе типа ФМ-4 помехоустойчивость такая же как при гауссовском типе помехи, тогда как помеха в виде ЛЧМ сигнала вызывает существенное увеличение вероятности ошибки. Следовательно, снижение уровня помехоустойчивости приёма зависит не только от распределения помехи, но и от её структуры. Была произведена проверка на соответствие гауссовскому распределению натурной записи смеси помехи шума из реального эфира. Исследование записей эфира с помощью четырех статистических критериев установило несущественное отличие распределения группового сигнала помехи от гауссовского закона. Результаты исследования сонограммы подтвердили необходимость использования механизма адаптации алгоритма приёма сигнала к форме спектральной плотности мощности групповой помехи в силу динамического ее изменения из-за прерывистого характера некоторых узкополосных сигналов.

Информация об авторах:**Лобов Евгений Михайлович**, заведующий лабораторией, доцент, д.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия**Лобова Елизавета Олеговна**, старший научный сотрудник АО "НПК "Криптонит"; доцент кафедры "Радиотехнические системы", к.т.н., Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия**Дагаева Александра Сергеевна**, студент, Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия**Для цитирования:**

Лобов Е.М., Лобова Е.О., Дагаева А.С. Исследование помехоустойчивости приема информации в условиях узкополосных помех с различной степенью приближения к нормальному закону распределения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2025. Том 19. №4. С. 12-20.

For citation:E.M. Lobov, E.O. Lobova, A.S. Dagaeva, "Study of noise immunity of signals subject to narrow-band non-Gaussian interference," *T-Comm*, 2025, vol. 19, no.4, pp. 12-20. (in Russian)

Введение

Декаметровый диапазон длин волн играет важную роль для организации связи с удаленными и труднодоступными регионами различных государств, радиовещания, организации любительской и военной связи, связи с судами и самолетами.

Современная тенденция развития систем связи в декаметровом диапазоне длин волн включает в себя увеличение скорости передачи информации за счет применения многопозиционной квадратурной амплитудной модуляции и расширения полосы частот используемых сигналов [1]. Расширение спектра сигналов также возникает при необходимости вторичного использования частотного ресурса. Переход к широкополосным сигналам приводит к новым вызовам для разработчиков систем связи. Например, в широкой полосе частот начинают оказывать существенное влияние дисперсионные искажения сигналов в плазме ионосферы Земли, в результате воздействия которых снижается достоверность приема информации.

Найти свободный участок спектра для передачи данных широкополосными сигналами является трудной задачей в силу перегруженности декаметрового диапазона длин волн, особенно в ночное время в нижней части диапазона. Поэтому прием и обработка широкополосных сигналов декаметрового диапазона будет неизбежно осуществляться на фоне мешающих узкополосных излучений (помех) от других источников. Узкополосные помехи отличаются друг от друга частотно-временной структурой и, в отличие от эфирного и внутреннего шума радиоприемного устройства, не описываются гауссовским законом распределения.

Существует множество методов приема сигналов в условиях помех, в частности, адаптивная фильтрация с подавлением помехи, оценивание параметров структурно детерминированной помехи с последующим ее вычитанием, формирование нуля диаграммы направленности антенны в направлении помехи, применение режекторных фильтров [2-11].

В случае одиночных антенн с постоянными параметрами, наличия неизвестного количества разнотипных помех и приема сигнала в условиях высокого уровня шума, перечисленные алгоритмы (за исключением режектора) неприменимы. Использование режекторного фильтра помимо подавления помехи приведет к устранению существенной части спектра полезного сигнала и, как результат, к искажению отклика согласованного фильтра, появлению ложных максимумов в отклике фильтра, проблемам синхронизации, энергетическим потерям и ухудшению качества приема информации.

В [12] приведена информация о наблюдаемых помехах декаметровом диапазоне в Московской области, собранная за год. Основным типом помехи являются амплитудно-модулированные сигналы зарубежных вещательных станций. Расположение в диапазоне и время работы указанных вещательных станций стабильно и может быть спрогнозировано с высокой точностью. Кроме сигналов вещательных станций встречаются импульсные помехи, сигналы цифрового вещания (DRM, DRM+), сигналы частотной телеграфии, сигналы исследовательских ионозондов, сигналы радиотелеграфных стандартов связи в полосах от 3 до 24 кГц.

Одним из вариантов обработки сигнала в условиях помех является использование фильтра, согласованного с характеристиками сигнала и помехи в условиях того, что смесь помехи и шума подчиняется нормальному закону распределения.

Когда помех множество, то, в соответствии с центральной предельной теоремой, указанную нормальность можно предположить.

С учетом изложенного возникает два вопроса:

– подчиняются ли действительно эфирные помехи в смеси с шумом нормальному закону распределения в некотором приближении (и в каком)?

– если закон распределения смеси помехи и шума имеет отклонение от нормального, то насколько это ухудшает помехоустойчивость и при каких условиях?

Целью настоящей работы является поиск ответов на поставленные вопросы.

Оптимальный прием в условиях гауссовской окрашенной помехи

Полагая наличие множества узкополосных помех различного типа в полосе принимаемого полезного сигнала, а также руководствуясь центральной предельной теоремой, будем считать совокупное аддитивное мешающее воздействие нормальным стационарным случайным процессом с некоторой двусторонней неравномерной спектральной плотностью мощности $G(\omega)$.

Решение задач обнаружения и различения детерминированных сигналов оптимальных по критерию минимума вероятности ошибки известно [13, 14]. Обработка сигнала при этом заключается в фильтрации сигнала фильтром, согласованным с сигналом и аддитивным шумом. Частотная характеристика согласованного фильтра $\dot{H}_{сф}(j\omega)$ определяется выражением:

$$\dot{H}_{сф}(j\omega) = \frac{\dot{S}_x^*(j\omega)}{G(\omega)} e^{-j\omega T_s}, \quad (1)$$

где $\dot{S}_x^*(j\omega)$ – комплексно-сопряженная спектральная плотность мощности обрабатываемого детерминированного сигнала, T_s – длительность обрабатываемого сигнала. Можно показать, что максимальное отношение сигнал/шум (ОСШ) на выходе согласованного фильтра (в момент окончания приема сигнала) составляет:

$$SNR = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\dot{S}_x(j\omega)|^2}{G(\omega)} d\omega. \quad (2)$$

В частном случае белого шума при $G(\omega) = N_0 / 2$ ($N_0 = const$) ОСШ равно:

$$SNR = \frac{2E_s}{N_0}, \quad E_s = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} |\dot{S}_x(j\omega)|^2 d\omega, \quad (3)$$

где E_s – энергия принимаемого сигнала. Отношение сигнал/шум (2) позволяет рассчитать рабочие характеристики обнаружителей детерминированных сигналов и кривые помехоустойчивости для различных видов модуляции и является ключевой количественной характеристикой.

На рисунке 1 приведена схема обработки сигнала, представленная в форме двух последовательно включенных фильтров.

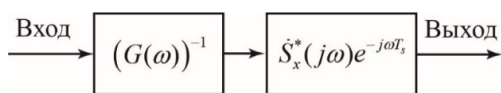


Рис. 1. Двухэтапная согласованная фильтрация

Первый фильтр, предварительный, обеспечивает нормирование спектра наблюдаемого сигнала на величину обратную спектральной плотности мощности мешающего воздействия. Второй фильтр является классическим согласованным фильтром для обработки сигнала в аддитивном белом гауссовском шуме.

Оценка помехоустойчивости приема в условиях помех

Помехоустойчивость приема информации с использованием цифровых видов модуляции может быть вычислена по известным в литературе выражениям [15, 16], если в качестве удвоенного значения отношения энергии сигнала с спектральной плотности мощности шума использовать выражение (2).

В работе [17] показано, что для случая окрашенной гауссовской помехи оптимальный прием по схеме, изображенной на рисунке 1, позволяет достичь энергетического выигрыша порядка 2 дБ по сравнению с приемом в условиях устранения узкополосной помехи вместе с частью спектра сигнала режекторным фильтром. Указанный выигрыш зависит от ширины спектра помехи и уровня помехи над шумом в приближении равномерности спектра помехи (см. рис. 2). Упомянутый выигрыш может быть аналитически рассчитан. Также в работе [17] построено устройство адаптивного подавления помех на основе банка фильтров, которое нашло широкое применение в обработке широкополосных сигналов декаметрового диапазона длин волн [18-24].

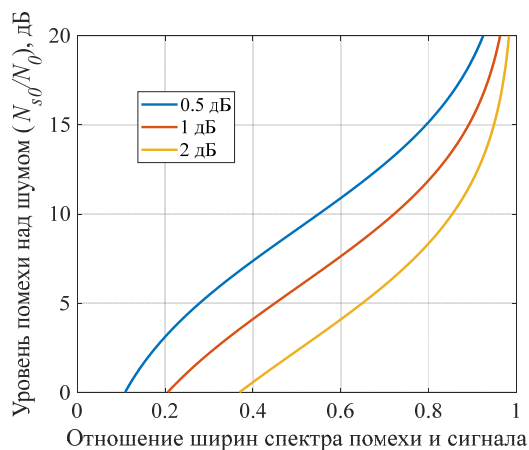


Рис. 2. Выигрыш при оптимальном приеме по сравнению с режекцией помехи

В рамках настоящего исследования было проведено имитационное моделирование, где в смесь сигнала и белого гауссовского шума дополнительно подмешивалась узкополосная помеха. В качестве помехи использовались негауссовские сигналы, имитирующие излучение сторонних радиостанций, или узкополосный гауссовский шум. Спектральные плотности мощности (СПМ) обоих видов помех (гауссовская и

негауссовская помеха) совпадают. Модели помех соответствуют помехам, наблюдаемым в эфире в декаметровом диапазоне длин волн – фазоманипулированный сигнал и сигнал с линейной частотной модуляцией. В процессе эксперимента теоретически и экспериментально оценивалась помехоустойчивость приема широкополосного сигнала с двоичной фазовой модуляцией (ФМ-2) в условиях воздействия указанных помех.

Параметры сигнала: расширение спектра с помощью M-последовательности длиной 7 символов, скорость передачи символов расширяющей псевдослучайной последовательности 50 кБод, скорость передачи информации 7140 бит/с, формирующий фильтр с амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) типа корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 1.0. Основное лепесток спектра сигнала занимает полосу 100 кГц. Параметры помех приведены в таблице 1.

Уровень помехи и шума фиксированы, тогда как уровень сигнала меняется относительно уровня шума. Объем статистики – один миллион экспериментов.

Таблица 1

Параметры помех

№1	Негауссовская. Сигнал с ФМ-4, символьная скорость 6250 бод, формирующий фильтр с АЧХ типа корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0.1.
№2	Гауссовская. Нормальный шум, отфильтрованный фильтром с АЧХ типа корень квадратный из приподнятого косинуса с коэффициентом сглаживания 0.1.
№3	Негауссовская. Сигнал с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ). Девияция частоты 6250 Гц.
№4	Гауссовская. Нормальный шум, отфильтрованный фильтром с импульсной характеристикой типа сигнала с ЛЧМ. Девияция частоты 6250 Гц.

Параметры помех с ЛЧМ и ФМ-4 были подобраны таким образом, чтобы их спектральные плотности мощности соответствовали друг другу по ширине.

На рисунке 3 приведены полученные кривые помехоустойчивости. На рисунке 4 приведены спектральные плотности мощности смеси шума и помехи. На рисунке 5 приведены гистограммы смеси шума и помехи. Оценки спектральных плотностей мощности получены методом Уэлча. Указанные оценки на дискретном наборе частот использовались для реализации предварительного фильтра нормировщика (см. структурную схему на рисунке 1) методом частотной выборки.

Уровень помехи типа ЛЧМ выше уровня шума на 30 дБ. Энергетические потери по сравнению с приемом на фоне гауссовского белого шума составляют 1,7 дБ. Потери для приема на фоне негауссовской помехи непостоянны и увеличиваются для больших значений отношения сигнал/шум.

Уровень помехи типа ФМ-4 выше уровня шума на 40 дБ. Энергетические потери составляют порядка 1,3 дБ относительно приема в аддитивном белом гауссовском шуме. Помехоустойчивость приема в условиях гауссовской и негауссовской помехи при этом почти не отличаются.

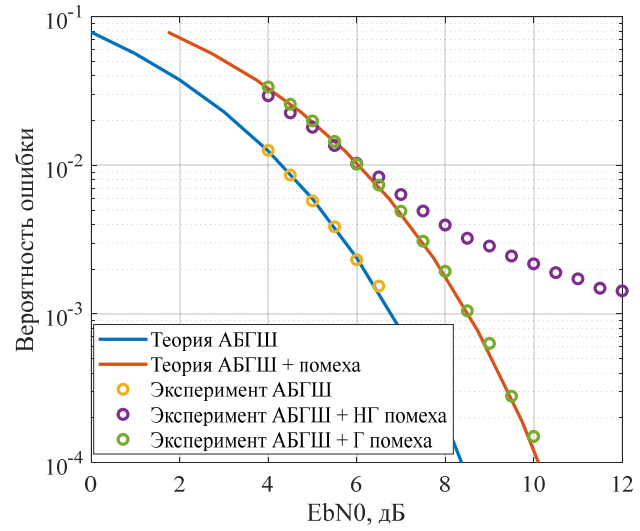
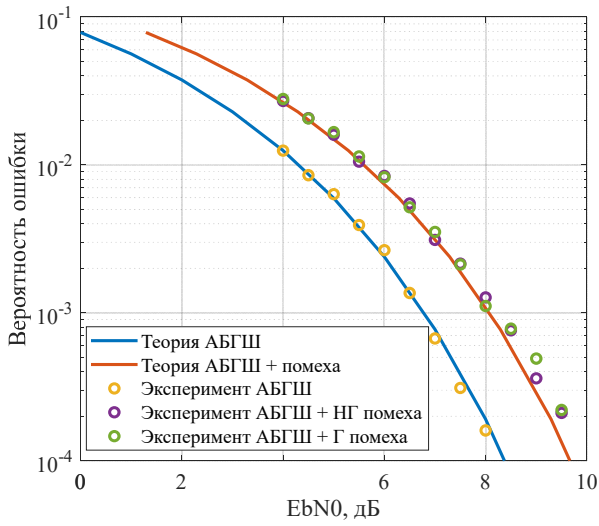


Рис. 3. Кривые помехоустойчивости с учетом помехи типа ФМ-4 (слева) и помехи типа ЛЧМ (справа)

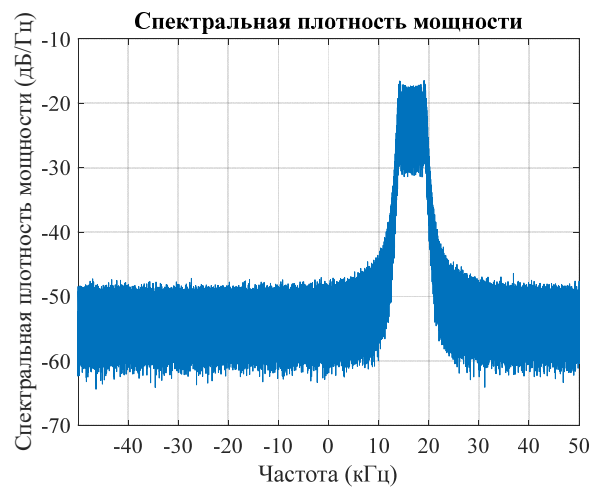
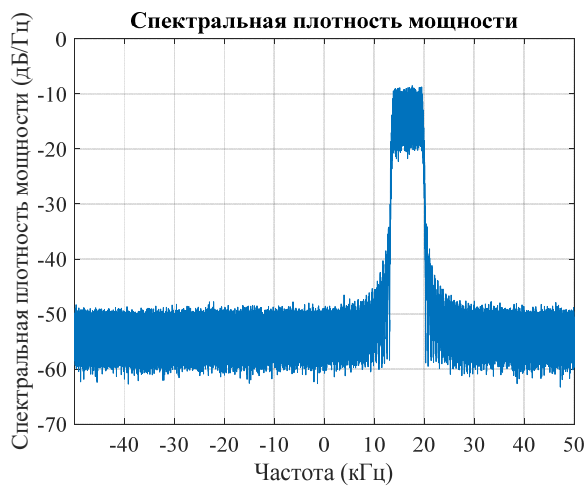


Рис. 4. Спектральная плотность мощности мешающего воздействия с учетом помехи типа ФМ-4 (слева) и помехи типа ЛЧМ (справа)

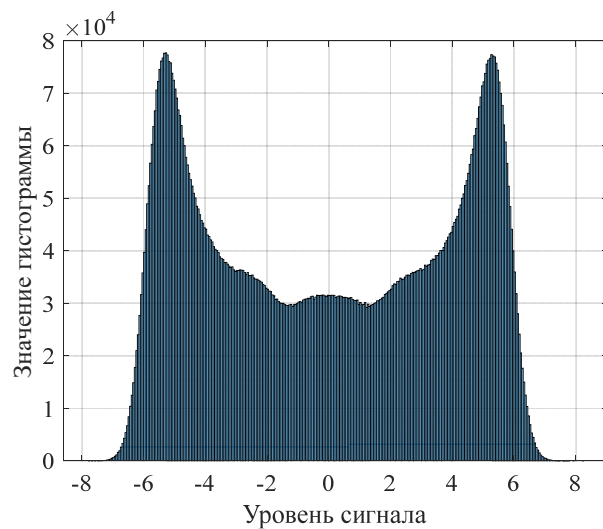
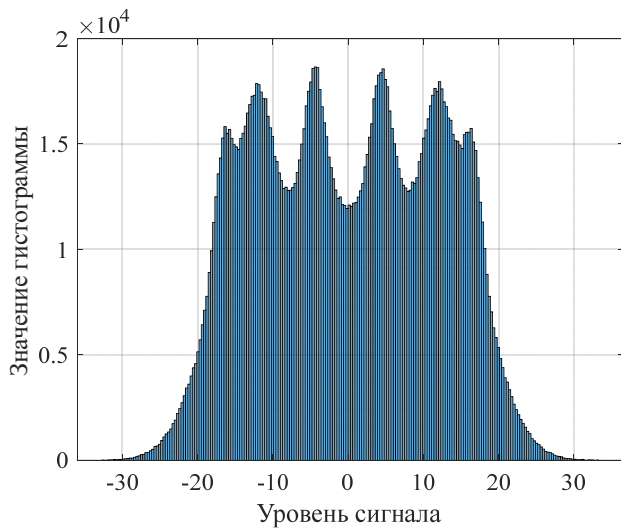


Рис. 5. Гистограммы мешающего воздействия с учетом помехи типа ФМ-4 (слева) и помехи типа ЛЧМ (справа)

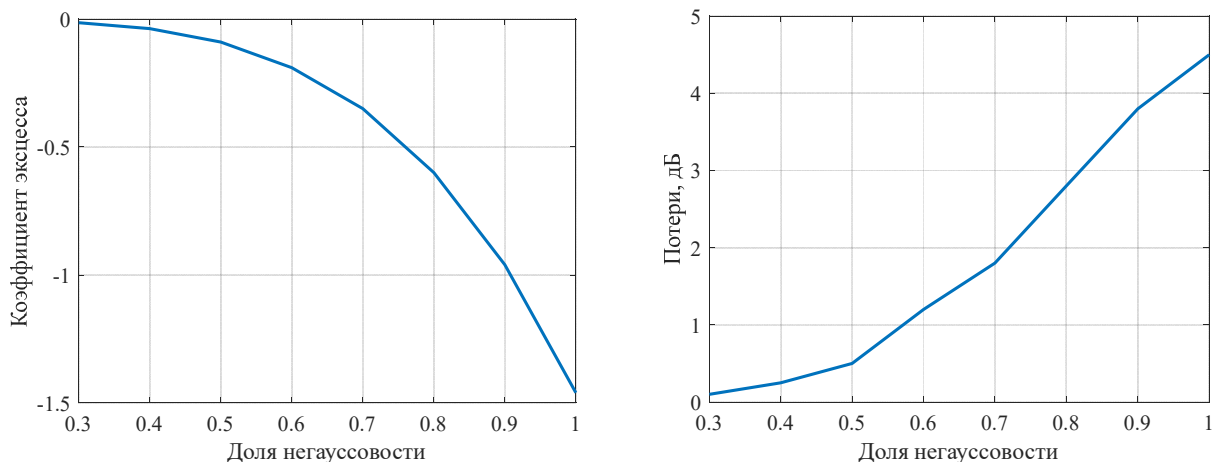


Рис. 6. Зависимость коэффициента эксцесса и энергетических потерь в зависимости от доли негауссовости α

Законы распределения смеси шума и помех при этом существенно отличается от нормального. Значения коэффициентов эксцесса для смеси шума и помех типа ФМ-4 и ЛЧМ соответственно равны -1.08 и -1.46. Таким образом, негауссовость помехи еще не означает увеличение потерь и снижение помехоустойчивости при применении схемы оптимального приема в условиях нормальных окрашенных шумов.

Исследуем влияние степени негауссовости помехи на помехоустойчивость приема на примере помехи с ЛЧМ. Для этого сформируем помеху в форме:

$$\dot{p}(t) = \alpha \dot{p}_{ng}(t) + \sqrt{1 - \alpha^2} \dot{p}_g(t), \quad (4)$$

где $\dot{p}_{ng}(t)$ – негауссовская помеха, $\dot{p}_g(t)$ – гауссовская помеха, $\alpha \in [0.0, 1.0]$ – коэффициент определяющий долю негауссовской помехи в сумме (4). Если $\alpha = 1.0$, то помеха чисто негауссовская, если $\alpha = 0.0$ – помеха чисто гауссовская. Оценим энергетические потери, возникающие при приеме на фоне негауссовской помехи относительно приема относительно на фоне чисто гауссовской помехи в зависимости от степени негауссовости. Потери будем рассматривать по уровню вероятности ошибки, равной $1.0 \cdot 10^{-3}$. Зависимости коэффициента эксцесса и потерь от коэффициента α приведены на рисунке 6.

Из приведённых зависимостей очевидно, что уровень потерь, как и отклонение коэффициента эксцесса от нуля, растёт от степени негауссовости помехи. Отклонение закона распределения от гауссового ожидаемо негативно влияет на помехоустойчивость приема. Однако, этот эффект может быть не выражен существенно, как для помехи в форме сигнала с ФМ-4.

Исследование закона распределения эфирных помех

Исследование закона распределения эфирных помех выполнено для набора записей смеси помех и шума из эфира. На рисунке 7 приведен графи спектральной плотности мощности сигнала помехи одной из исследуемой записи сигнала в полосе 110 кГц на частоте 16148 кГц на среднеширотной трассе протяженностью 3000 км. Длительность записи составляет 90 секунд.

Кроме множества ярко выраженных узкополосных помех в виде отдельных гармоник в групповом сигнале можно видеть модулированные по амплитуде сигналы с несущей и двумя боковыми лепестками от двух мощных вещательных станций, узкополосный сигнал передачи цифровых данных в полосе 3 кГц и мощный ЛЧМ-сигнал в полосе 10 кГц в правой части спектра.

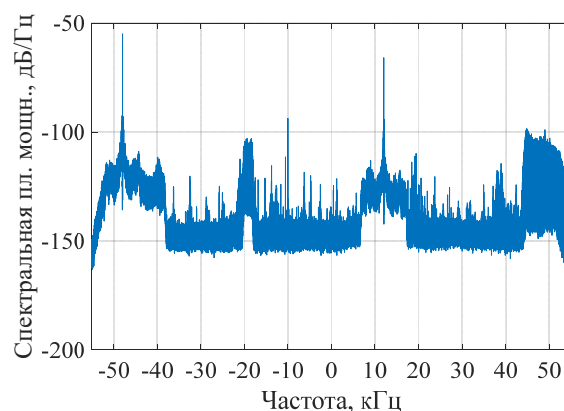


Рис. 7. Спектральная плотность мощности исследуемой помехи

Проверка на соответствие распределения смеси шума и помех гауссовскому распределению осуществлялась с помощью следующих четырех критериев:

1. Вычисление коэффициента эксцесса и асимметрии. Проверка их на равенство нулю.
2. Вычисление кумулянтов третьего, четвертого и пятого порядка. Проверка их на равенство нулю.
3. Проверка процента выборки укладывающегося в диапазон $(\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma)$, где μ – математическое ожидание, σ – среднеквадратическое отклонение (СКО).
4. Проверка на соответствие распределения гауссовскому по критерию Колмогорова-Смирнова и Лиллиефорса.

В результате, все 4 метода показали отклонение распределения всех исследуемых выборок от гауссовского. Как и критерий Лиллиефорса, так и Колмогорова-Смирнова отверг гипотезу о гауссовости. Заметим, что критерий Лиллиефорса в общем случае является более достоверным, так как в отличие

от критерия Колмогорова-Смирнова он предполагает использование не истинных параметров распределения (математического ожидания и дисперсии), а выборочных. Однако, в данном случае оба критерия дали отрицательный результат. Примечательно, что более слабые критерии тоже показали отклонение от гауссовости. Отклонение коэффициент асимметрии от нуля для всех записей составило порядка $1.5 \cdot 10^{-4}$, а коэффициента эксцесса $1.5 \cdot 10^{-2}$. Значения кумулянтов 3-4 порядка около $k_3 \approx 10^{-15}$, $k_3 \approx 10^{-17}$, $k_3 \approx 10^{-22}$ соответственно, то есть их отклонение от нуля близко к уровню погрешности вычисления. В диапазон $(\mu - 3\sigma; \mu + 3\sigma)$ попадает не 99,73% выборки, а около 99,69%. Из всего вышеупомянутого можно сделать вывод, что хоть исследуемые выборки не являются строго гауссовскими, но отклонения от гауссовости не так высоки. Гистограммы вещественной и мнимой квадратурной составляющих исследуемых записей приведены на рисунках 8, 9.

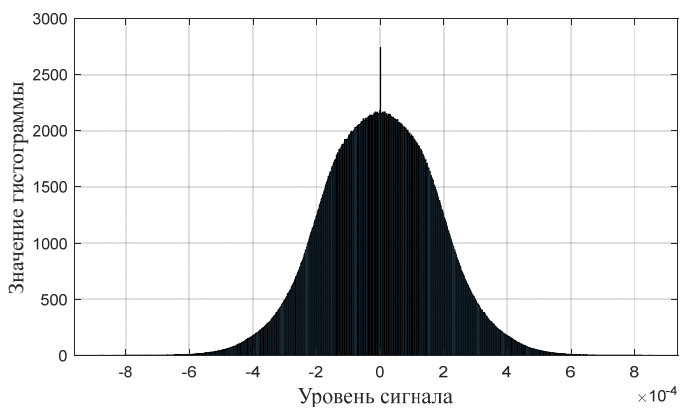


Рис. 8. Гистограмма исследуемой смеси помехи и АБГШ (вещественная квадратура)

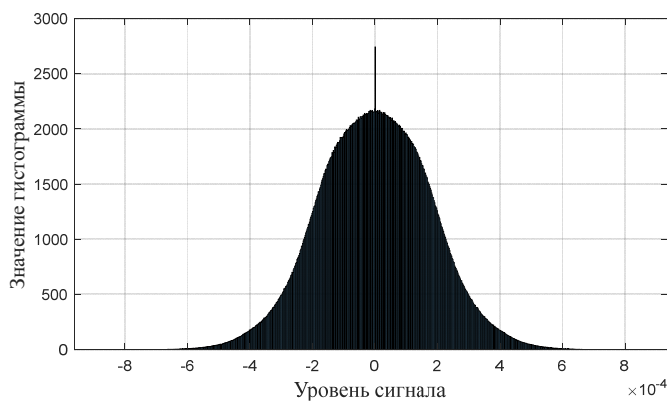


Рис. 9. Гистограмма исследуемой смеси помехи и АБГШ (мнимая квадратура)

Следовательно, необходимо проверить является ли такое отклонение препятствием к применению методов обработки сигналов, рассчитанных на алгоритмы обработки в условиях гауссовского окрашенного шума. Пользуясь результатами вышеприведённого исследования, можно сделать вывод, что такое отклонение от негауссовости не должно существенно повлиять на помехоустойчивость приёма (см. рис. 3, 6).

В заключении следует отметить, что исследование проведено в предположении стационарности свойств шума и помех. Это означает также неизменность формы спектральной плотности мощности в процессе приема и обработки сигнала, что на практике не всегда выполняется.

На рисунке 10 приведен график сонограммы (водопад, развертка частота-время) исследуемой записи эфира. Из рисунка видно, что спектральная плотность помех от вещательных станций и узкополосной помехи в полосе 3 кГц можно считать постоянными с точностью до плавного изменения общего уровня. Однако, помеха в форме сигнала с ЛЧМ является прерывистой во времени. Поэтому реализации групповой помехи в зависимости от наличия или отсутствия сигнала с ЛЧМ могут обладать двумя различными вариантами спектральной плотности мощности (по определению при усреднении по рассматриваемым реализациям и условию стационарности всех узкополосных помех).

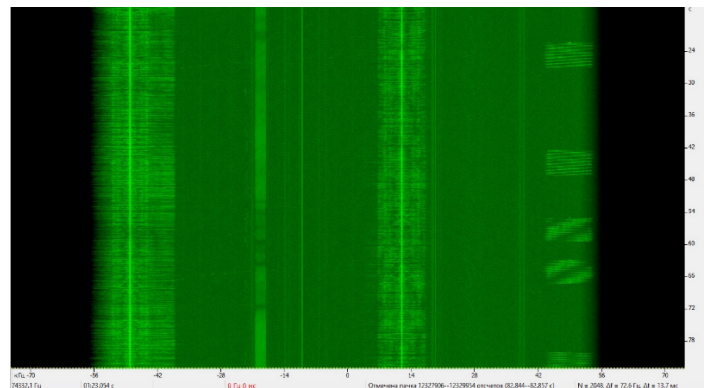


Рис. 10. Сонограмма (водопад) исследуемой помехи

Таким образом, фильтр предварительной обработки должен настраиваться с учетом актуальной спектральной плотности мощности мешающего воздействия. На практике это решается путем включения алгоритма измерения спектральной плотности мощности помехи в общий алгоритм обработки сигнала (см. как это сделано в [17]).

Заключение

Направление развития систем декаметровой радиосвязи связано с увеличением ширины спектра используемых сигналов. Прием и обработка широкополосных сигналов в декаметровом диапазоне неизбежно будет осуществляться на фоне множества узкополосных помех различного типа.

Известные методы приема сигналов на фоне узкополосных помех учитывают их негауссовость и требуют либо сведений об их структуре, либо наличие антенной решетки, что в декаметровом диапазоне не всегда возможно.

В силу большого числа наблюдаемых помех и их статистической независимости на основе центральной предельной теоремы можно предположить, что закон распределения группового сигнала мешающего воздействия, т.е. суммы помех и шума, является гауссовским с некоторой точностью. Методы приема сигналов в условиях мешающего воздействия с гауссовским законом распределения и неравномерной спектральной плотностью мощности (гауссовский окрашенный шум) известны.

В связи с изложенным представляет интерес оценки влияния степени негауссовости совокупного мешающего сигнала на качество работы приемника, оптимального при обработке полезного сигнала на фоне упомянутого гауссовского окрашенного шума.

В статье исследовано влияние негауссовости смеси помехи и белого гауссовского шума на помехоустойчивость обработки сигнала. В результате проведенного исследования получены следующие результаты:

1. Небольшие отклонения от гауссовости смеси помехи и шума не приводят к существенным потерям помехоустойчивости приёма сигнала с модуляцией ФМ-2. Например, при отклонении от гауссовости на 50% и менее, уровень потерь составил меньше 0.5 дБ для вероятности ошибки $1.0e-03$.

2. Негауссовское распределение смеси помехи и шума не всегда приводит к существенным потерям в помехоустойчивости. Например, при помехе типа ФМ-4 помехоустойчивость такая же как при гауссовском типе помехи, тогда как помеха в виде ЛЧМ сигнала вызывает существенное увеличение вероятности ошибки. Следовательно, снижение уровня помехоустойчивости приёма зависит не только от распределения помехи, но и от её структуры.

Исследование записей эфира с помощью четырех статистических критериев установило несущественное отличие распределения группового сигнала помехи от гауссовского закона.

Результаты исследования сонограммы подтвердили необходимость использования механизма адаптации алгоритма приема сигнала к форме спектральной плотности мощности групповой помехи.

В качестве направления дальнейших исследований можно отметить исследование влияния динамики спектральной плотности мощности помехи и соответствующей инертности адаптации алгоритма приема к указанной характеристике помехи на помехоустойчивость приема сигнала.

Литература

1. Interface Standard MIL-STD-188-110D, 2017, 270 с.
2. *Афанасьевский В.Б.* и др. Помехозащищенность приема дискретных сигналов; Савватеев Ю.И., Назаров О.В. (ред.). М.: Радиотехника, 2015. 580 с.
3. *Сосулин Ю.Г., Костров В.В., Паришин Ю.Н.* Оценочно-корреляционная обработка сигналов и компенсация помех. М: Радиотехника, 2014. 626 с.
4. *Паришин Ю.Н.* Пространственно-временная обработка сигналов и компенсация помех. М: Общество с ограниченной ответственностью Издательство "КУРС", 2021. 200 с.
5. *Джиган В.И.* Адаптивная фильтрация сигналов: теория и алгоритмы. М.: Техносфера, 2013. 528 с.
6. *Джиган В.И.* Адаптивная антенная решетка для приема сигналов в условиях помех и многолучевости // Цифровая обработка сигналов. 2019. № 4. С. 20-27.
7. *Джиган В.И.* Совмещенная адаптивная антенная решетка и адаптивный эквалайзер канала связи на базе быстрых многоканальных рекурсивных алгоритмов по критерию наименьших квадратов // Антенны. 2021. № 1(269). С. 30-44.
8. *Григорьев Л.Н.* Цифровое формирование диаграммы направленности в фазированных антенных решетках. М: Радиотехника, 2010. 144 с.

9. *Дементьев А.Н., Клюев Д.С., Новиков А.Н.* и др. Развитие методов пространственно-временной обработки широкополосных сигналов в адаптивной антенной решетке // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI 10.34759/trd-2022-124-25.

10. *Витязев В.В.* Многоскоростная обработка сигналов: монография. М.: Горячая линия - Телеком, 2018. 336 с.

11. *Витязев В.В., Никушкин П.Б.* Многоскоростная обработка сигналов в задачах режекции узкополосных помех // Цифровая обработка сигналов. 2017. № 2. С. 31-36.

12. *Kandaurov N.A., Lobova E.O., Varlamov V.O.* Analysis of Interference HF Range // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.

13. *Левин Б.П.* Теоретические основы статистической радиотехники. В трех томах. Книга вторая. Изд. 2-е, перераб. и дополнен. М.: Сов. Радио, 1975. 392 с.

14. *Лупкин И.А.* Статистическая радиотехника. Теория информации и кодирования. М.: Вузовская книга, 2002. 216 с.

15. *Прокус Дж.* Цифровая связь. Пер. с англ. / Под. ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 2000, 800 с.

16. *Скляр Б.* Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение: пер. с англ. Изд. 2-е, испр. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

17. *Lobov E.M., Shubin D.N.* A Narrow-Band Interference Compensation Device Based on a Digital Filter Bank for Broadband Low-Energy HF Radio Lines // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SOSG.2019.8706791

18. *Lobov E.M., Lobova E.O., Kurochkin A.A.* Computationally simplified realization of the compensator of dispersion distortions on the basis of the filter bank // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2018, Minsk, 04-05 июля 2018 г. Minsk: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2018. P. 8457058. DOI 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457058.

19. *Sattarova A.I., Varlamov V.O., Lobov E.M.* Design and Simulation of a Hybrid Filter Bank for Processing Wideband Signals with Low-Speed ADCs // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019, Moscow, 20-21 марта 2019 г. Moscow, 2019. P. 8706822. DOI 10.1109/SOSG.2019.8706822.

20. *Lobov E.M., Varlamov V.O., Sokolov K.Y.* Methods for Increasing the Computational Efficiency of the Algorithm for Calculating the Compensator for Non-Uniformity of the Frequency Response of Analog Filters in a Hybrid Filter Bank // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, 19-20 марта 2020 г. Moscow: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2020. P. 9078558. DOI 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078558.

21. *Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И.* Численное моделирование распространения пространственно-временных частотно-модулированных радиоволн в анизотропной среде // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2015. Том 9. №9. С. 40-47.

22. *Аджемов С.С., Лобов Е.М., Кандауров Н.А., Лобова Е.О., Лупаткин В.И.* Алгоритмы оценки и компенсации дисперсионных искажений широкополосных сигналов ионосферных радиолоний связи // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2021. Т. 13. № 5. С. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74.

23. *Kudryashova A.Y.* A method of efficient coding of color images under the condition of permissible and forbidden values of color gamut // Т-Comm. 2019. Т. 13. № 6. С. 65-70.

24. *Lobov E.M., Varlamov V.O.* Experimental Testing of Correction Algorithms for Hybrid Filter Banks // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO 2020, Svetlogorsk, 01-03 июля 2020 г. Svetlogorsk, 2020. P. 9166050. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166050.

STUDY OF NOISE IMMUNITY OF SIGNALS SUBJECT TO NARROW-BAND NON-GAUSSIAN INTERFERENCE

Evgeny M. Lobov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, e.m.lobov@mtuci.ru

Elizaveta O. Lobova, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, e.o.lobova@mtuci.ru

Alexandra S. Dagaeva, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, Sasha2010.008@mail.ru

Abstract

This article presents a study of the effect of non-Gaussian distribution of the interference and noise mixture on the noise immunity of signal reception with spread spectrum and binary phase modulation. The interference models used correspond to interference observed on the air in the decimeter wavelength range – a phase-shift keyed signal and a signal with linear frequency modulation. The results of simulation modeling are presented, showing that the deviation of the distribution from the Gaussian affects the noise immunity of reception to varying degrees depending on the structure of the interference itself. Small deviations from the Gaussian nature of the interference and noise mixture do not lead to significant losses in noise immunity of signal reception with BPSK. Non-Gaussian distribution of the interference and noise mixture does not always lead to significant losses in noise immunity. For example, with QPSK interference, the noise immunity is the same as with a Gaussian type of interference, while interference in the form of a chirp signal causes a significant increase in the error probability. Consequently, the reduction of the level of noise immunity of reception depends not only on the distribution of the interference, but also on its structure. A check was made for compliance with the Gaussian distribution of a natural recording of a mixture of interference noise from real air. The study of the air recordings using four statistical criteria established an insignificant difference in the distribution of the group interference signal from the Gaussian law. The results of the sonogram study confirmed the need to use a mechanism for adapting the signal reception algorithm to the shape of the spectral power density of the group interference due to its dynamic change due to the intermittent nature of some narrowband signals.

Keywords: high frequency channel, non-Gaussian interference, estimation of noise immunity, broadband signal, power spectral density

References

- [1] Interface Standard MIL-STD-188-110D, 2017, 270 p.
- [2] V.B. Afanasyevsky et al., "Noise immunity of discrete signal reception," Savvateev Yu.I., Nazarov O.V. (ed.). Moscow: Radioengineering, 2015. 580 p.
- [3] Yu.G. Sosulin, V.V. Kostrov, Yu.N. Parshin, "Estimation-correlation processing of signals and interference compensation," Moscow: Radioengineering, 2014. 626 p.
- [4] Yu. N. Parshin, "Space-time signal processing and interference compensation," Moscow: Publishing House "KURS", 2021. 200 p.
- [5] V.I. Dzhigan, "Adaptive signal filtering: theory and algorithms," Moscow.: Tekhnosfera, 2013. 528 p.
- [6] V.I. Dzhigan, "Adaptive antenna array for receiving signals in conditions of interference and multipath," *Digital signal processing*. 2019. No. 4, pp. 20-27.
- [7] V.I. Dzhigan, "Combined adaptive antenna array and adaptive equalizer of the communication channel based on fast multichannel recursive algorithms according to the least squares criterion," *Antennas*. 2021. No. 1(269), pp. 30-44.
- [8] L.N. Grigoriev, "Digital formation of the directional pattern in phased antenna arrays," Moscow: Radioengineering, 2010. 144 p.
- [9] A.N. Demytyev, D.S. Klyuev, A.N. Novikov et al., "Development of methods for space-time processing of broadband signals in an adaptive antenna array," *Proceedings of MAI*. 2022. No. 124. DOI 10.34759/trd-2022-124-25.
- [10] V.V. Vityazev, "Multi-rate signal processing: monograph," Moscow: Goryachaya Liniya – Telecom, 2018. 336 p.
- [11] V.V. Vityazev, P.B. Nikishkin, "Multi-rate signal processing in narrow-band interference rejection problems," *Digital signal processing*. 2017. No. 2, pp. 31-36.
- [12] N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.O. Varlamov, "Analysis of Interference HF Range," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF53456.2022.9744307.
- [13] B.R. Levin, "Theoretical foundations of statistical radio engineering," In three volumes. Book two. 2nd edition, revised and supplemented. Moscow: Sov. Radio, 1975, 392 p.
- [14] I.A. Lipkin, "Statistical radio engineering. Theory of information and coding," Moscow: Vuzovskaya kniga, 2002. 216 p.
- [15] J. Proakis, "Digital communications," Translated from English / Ed. by D.D. Klovsky. Moscow: Radio and communications, 2000, 800 p.
- [16] B. Sklyar, "Digital communications. Theoretical foundations and practical application," 2nd ed., corrected. Moscow: Williams Publishing House, 2003. 1104 p.
- [17] E.M. Lobov, D.N. Shubin, "A Narrow-Band Interference Compensation Device Based on a Digital Filter Bank for Broadband Low-Energy HF Radio Lines," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/SOSG.2019.8706791
- [18] E.M. Lobov, E.O. Lobova, A.A. Kurochkin, "Computationally simplified realization of the compensator of dispersion distortions on the basis of the filter bank," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO*, Minsk, 2018. P. 8457058. DOI 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8457058.

- [19] A.I. Sattarova, V.O. Varlamov, E.M. Lobov, "Design and Simulation of a Hybrid Filter Bank for Processing Wideband Signals with Low-Speed ADCs," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2019*, Moscow, 2019. P. 8706822. DOI 10.1109/SOSG.2019.8706822.
- [20] E.M. Lobov, V.O. Varlamov, K.Y. Sokolov, "Methods for Increasing the Computational Efficiency of the Algorithm for Calculating the Compensator for Non-Uniformity of the Frequency Response of Analog Filters in a Hybrid Filter Bank," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, 2020. P. 9078558. DOI 10.1109/IEECONF48371.2020.9078558.
- [21] A.S. Kryukovsky, D.S. Lukin, D.V. Rastyagaev, Yu.I. Skvortsova, "The numerical modeling of propagation of space-time frequency-modulated radiowaves in ionospheric to medium," *T-Comm*. 2015. Vol 9. No. 9, pp. 40-47.
- [22] S.S. Adjemov, E.M. Lobov, N.A. Kandaurov, E.O. Lobova, V.I. Lipatkin, "Algorithms of estimating and compensating the dispersion distortions of wideband signals in the HF channel," *H&ES Research*. 2021. Vol. 13. No. 5, pp. 57-74. doi: 10.36724/2409-5419-2021-13-5-57-74.
- [23] A.Y. Kudryashova, "A method of efficient coding of color images under the condition of permissible and forbidden values of color gamut," *T-Comm*. 2019. Vol. 13. No. 6, pp. 65-70.
- [24] E.M. Lobov, V.O. Varlamov, "Experimental Testing of Correction Algorithms for Hybrid Filter Banks," *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications, SYNCHROINFO*, Svetlogorsk, 2020. P. 9166050. DOI 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166050.

Information about authors:

Evgeny M. Lobov, head of the laboratory, associate professor, D.Sc., Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Elizaveta O. Lobova, senior researcher of JSC NPK Kryptonit; associate professor of the Department of Radio Engineering Systems, Ph.D., Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

Alexandra S. Dagaeva, student, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia