

УДК 550.388.1+621.371.3

МОДЕЛЬ СМЕСИ ФОНОВОГО ШУМА И СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ПОМЕХ ПРИ ПРИЁМЕ КОРОТКОВОЛНОВОГО СИГНАЛА С ЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

*А. Е. Недопёкин **

Марийский госуниверситет, г. Йошкар-Ола, Россия

Представлена статистическая модель смеси фонового шума и сосредоточенных по спектру помех. Такая смесь реализуется при широкополосном приёме коротковолнового сигнала с линейной частотной модуляцией, проходящей весь декаметровый диапазон длин волн. Установлены виды вероятностных распределений, статистически описывающих случайные шум и помехи, а также виды распределений, описывающих их сумму во временной и частотной областях. По параметрам огибающей сигнала получена оценка уровня сосредоточенных помех относительно шумов и предложен способ выделения полезного сигнала в спектре мощности на основе описания суммы шумов и помех с помощью распределения Вейбулла.

ВВЕДЕНИЕ

Основное преимущество широкополосных сигналов с различными видами модуляции заключается в большой величине базы сигнала, что позволяет использовать маломощные передатчики и передавать полезный сигнал на уровне мощности, равном или меньшем уровня фоновых шумов. Такие сигналы находят применение в задачах передачи данных при помощи шумоподобных сигналов [1, 2]. Системы, построенные на основе использования таких сигналов, могут обеспечить их скрытую передачу, а также обладают высокой электромагнитной совместимостью с другими устройствами и малым энергопотреблением. Одним из простых способов создания большой базы сигнала является линейная частотная модуляция (ЛЧМ). В настоящее время существует возможность цифровой генерации ЛЧМ-сигнала с приемлемой точностью во всём декаметровом диапазоне длин волн [3]. При этом широкое распространение получили ЛЧМ-ионозонды, используемые для исследования состояния коротковолнового канала на радиотрассах с большой протяжённостью [4, 5]. Зондирующий ЛЧМ-сигнал содержит в своём спектре весь декаметровый диапазон длин волн и при приёме умножается на когерентный ему сигнал приёмника.

Зондирующий сигнал, меняющий частоту со скоростью $50 \div 1\,000$ кГц/с, проходит множество узкополосных каналов, в которых есть посторонние сигналы с неизвестной частотно-временной структурой. При приёме это проявляется в виде наличия сосредоточенных по спектру помех. При переходе в частотную область помехи создадут значительное зашумление спектра, затрудняющее обработку сигнала или делающее её вообще невозможной. В такой ситуации при малой мощности передатчика в отдельных каналах теряется информация о полезном сигнале. Тогда при обработке принимаемого сигнала прибегают к режекции участка данных, содержащего сосредоточенную помеху [6]. В работе [7] приведена качественная модель смеси сигнала и шума в частотной области для обработки ЛЧМ-сигнала, которая не учитывает соотношение между сигналом и шумом во временной области и не рассматривает наличие сосредоточенных помех. Целью данной работы является создание модели смеси шума и помехи и изучение её свойств во временной и частотной областях. Такая модель позволит разработать более совершенные методы ослабления сосредоточенных помех и выделения мод принятого сигнала.

* agasfer911@yandex.ru

1. ОБРАБОТКА СИГНАЛА ЛЧМ-ИОНОЗОНДА

Ионозонд излучает непрерывный сигнал со скоростью перестройки частоты df , начиная с некоторой начальной частоты f_0 :

$$a(t) = \exp[2\pi j(f_0 t + 0,5 df t^2)], \quad t_0 \leq t \leq t_1. \quad (1)$$

Принятый многолучевый сигнал, прошедший ионосферу, умножается на сигнал гетеродина, комплексно сопряжённый с излучаемым сигналом. Получившийся сигнал проходит через фильтр нижних частот, и его дальнейший анализ проводится в аудиодиапазоне. Сигнал проходит оцифровку и анализируется программными средствами. Внутри записанных данных сеанса зондирования можно выделить элемент с произвольной длительностью, начинающийся с любого момента времени. В случае ЛЧМ-зондирования для анализа модовой структуры, измерения задержек и определения диапазонов распространения зондирующего сигнала используют спектральную плотность мощности, а для визуального представления результатов — ионограмму (спектрограмму).

2. АНАЛИЗ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПОДБОР МОДЕЛИ

Были рассмотрены фоновые шумы в анализируемом сигнале, полученном с выхода приёмника ионозонда. Анализ при помощи критерия Пирсона на уровне значимости 95 % для отобранных фоновых шумов в сеансах ЛЧМ-зондирования со скоростями перестройки частоты 100 и 550 кГц/с установил следующее. Распределение фонового шума на длительностях элемента анализа, соответствующих полосе сигнала от 1 с и более, наиболее близко к нормальному распределению вне зависимости от ширины рассматриваемой полосы.

На основе эмпирических данных, полученных по результатам обнаружения сосредоточенных помех при приёме сигнала ЛЧМ-ионозонда и приведённых в работе [6], в данной работе оценены виды вероятностных распределений ширин частотного интервала помехи и количества помех в единицу времени (1 с). Эти распределения являются показательными и аналогичны распределениям, возникающим при описании систем массового обслуживания. Изменяя показатель распределений, можно изменять моделируемую помеховую обстановку. Длительность фиксируемой помехи обратно пропорциональна скорости перестройки частоты зондирующего сигнала.

При приёме ионозонд сканирует частотный диапазон, умножая принятый сигнал на ЛЧМ-сигнал гетеродина. Помеха появляется на частоте f_H в момент времени t_1 , в течение интервала $t_2 - t_1$ приёмник принимает помеху, за это время меняющаяся по линейному закону частота гетеродина и меняется от f_H до $f_H + \Delta f$, где $\Delta f = df(t_2 - t_1)$. Помеха, умноженная на сигнал приёмника, фильтруется вместе со всем принятым сигналом. В результате остаётся только разностный сигнал, в котором помеха представлена ЛЧМ-импульсом, модулированным по амплитуде и фазе, с длительностью $t_2 - t_1$, начальной частотой, равной нулю, и шириной спектра Δf .

В качестве сосредоточенных помех были взяты узкополосные помехи с аналоговой модуляцией [8, 9]. Помеха представляется как сумма из K гармоник со случайными начальными фазами φ_{k0} (величина φ_{k0} равномерно распределена на отрезке $[0, \pi]$), случайными фазовыми сдвигами $\varphi_k(t)$ (с равномерными распределениями на отрезке $[-\pi/2, \pi/2]$), случайными начальными амплитудами A_{k0} и их изменениями $A_k(t)$ (с нормальным распределением с малой дисперсией) и случайными частотными сдвигами $\Delta f_k(t)$ (с нормальным распределением с малой дисперсией). Гармоники заполняют частотный диапазон помехи Δf со случайным шагом Δf_{k0} (с равномерным

распределением на отрезке $[\Delta f/(2K), \Delta f/K]$. Вид помехи следующий:

$$d(t) = \sum_{k=1}^K [A_{k0} + A_k(t)] \cos\{2\pi t[f_H + \Delta f_{k0} + \Delta f_k(t)] + \varphi_{k0} + \varphi_k(t)\}. \quad (2)$$

Для помех с длительностью $0,01 \div 0,1$ с генерировались суммы (2) с одновременным изменением всех указанных параметров. Случайные сдвиги $A_k(t)$ составляли $5 \div 10\%$ от математического ожидания параметров A_{k0} , случайные сдвиги $\Delta f_k(t)$ имели нулевое математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение $0,5 \div 1,0$ Гц. Проводилось умножение на сигнал гетеродина, затем переход в частотную область, фильтрация нижних частот и возврат во временную область. Было построено 10 000 выборок для скоростей частотной модуляции 100 и 500 кГц/с.

Рассмотрим результат моделирования, используя описание через контрэксцесс χ и энтропийный коэффициент k [10]. Контрэксцесс (т. е. величина, обратная корню и эксцесса распределения) характеризует форму распределения, энтропийный коэффициент (т. е. оценка информационной энтропии, отнесённая к среднеквадратическому отклонению) характеризует информационную неопределённость распределения. На рис. 1 на плоскости (χ, k) точками представлены выборки, полученные в результате моделирования. Точка «А» на рисунке соответствует нормальному закону распределения, «В» — равномерному, «С» — арксинусоидальному. Большой разброс точек свидетельствует о принадлежности выборок к разным генеральным совокупностям.

Из полученных данных установлено, что с уменьшением частотной полосы помехи распределение вероятности стремится к арксинусоидальному ($\Delta f \approx 1$ кГц), а с ростом полосы ($\Delta f \approx 10$ кГц) точки на плоскости концентрируются преимущественно возле отметки нормального распределения. В целом, вероятностное распределение помехи представляет собой смесь нормального, равномерного и арксинусоидального распределений. Для полосы $6 \div 10$ кГц это смесь нормального закона с малой долей равномерного, для $3 \div 6$ кГц — равномерного с малой долей арксинусоидального, для $1 \div 3$ кГц — арксинусоидального и равномерного.

3. РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Считая все преобразования линейными, будем полагать, что смесь шума и помех является суммой $s(t)$ двух выборок. Первая выборка $n(t)$, представляющая фоновый шум, реализуется нормальным случайным процессом с нулевым математическим ожиданием и переменной дисперсией. Вторая выборка $d(t)$ является последовательностью нулей, в которой рассредоточены группы отсчётов помех. Время появления помех в выборке $d(t)$ распределено равномерно. Количество помех в единицу времени и ширина полосы (т. е. длительность) распределены по экспоненциальному закону. Меняя количество и длительность помех, можно добиться ситуации, соответствующей большому числу помех в единицу времени.

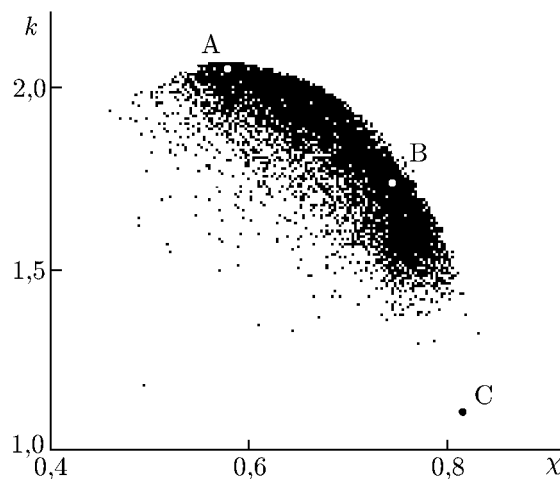


Рис. 1. Распределения помех на плоскости параметров (χ, k)

Всякая выборка помех представляет собой сумму трёх выборок из генеральных совокупностей, соответствующих установленным выше распределениям: нормальному, равномерному и арксинусоидальному с нулевыми математическими ожиданиями. Отрезок, на котором задано равномерное распределение, есть $[-3\sigma, 3\sigma]$, где σ — среднеквадратическое отклонение в нормальном распределении. Весовые коэффициенты слагаемых, распределённых по нормальному и равномерному законам, составляют 1 и $0,02N/N_{\Pi}$ соответственно, где N — число отсчётов выборки $d(t)$, N_{Π} — число отсчётов помехи. Для арксинусоидального закона выбран параметр масштаба, равный $0,01N/N_{\Pi}$. Выбор таких весовых коэффициентов и параметра масштаба обеспечивает соответствие параметров генерируемых выборок области на плоскости (χ, k) , найденной для сосредоточенных помех в предыдущем разделе (см. рис. 1). В результате плотность распределения помехи имеет вид

$$f(x) = p_1(x) + \frac{0,02N}{N_{\Pi}} p_2(x) + p_3(x), \quad (3)$$

где

$$p_1(x) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right); \quad p_2(x) = \frac{1}{6\sigma}, \quad -3\sigma \leq x \leq 3\sigma; \\ p_3(x) = \frac{1}{\pi \sqrt{\lambda^2 - x^2}}, \quad \lambda = \frac{0,01N}{N_{\Pi}}. \quad (4)$$

Для каждой помехи отклонение σ определяет её мощность. Длительность каждой отдельной помехи и число помех в элементе анализа являются случайными величинами с экспоненциальным распределением.

Было проведено 40 500 реализаций выборок с длительностью 1 с и частотой дискретизации 3,5; 5,0; 7,5 и 10 кГц. В выборках $d(t)$ среднее число помех на единицу времени изменялось от нуля до нескольких десятков. При рассмотрении слагаемых $n(t)$ и $d(t)$ определялись среднеквадратическое отклонение шума σ_{Π} , среднеквадратическое отклонение помехи σ_{Π} и их отношение $\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi}$. Были рассмотрены полученные выборки $s(t)$, их огибающие и представление выборок в частотной области. Пример выборки представлен на рис. 2а, эта же выборка в частотной области — на рис. 2б, плотность вероятности $p_f(x)$ для частотной области — на рис. 2в.

Для частотной области при помощи χ^2 -критерия с уровнем значимости 95 % установлено, что доли выборок смеси, распределённых по законам Накагами и Вейбулла, примерно совпадают (с разницей 3÷5 %) и, в зависимости от отношения $\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi}$, убывают с ростом уровня помех. Регрессионная кривая имеет вид $P_W = -0,177 \ln(\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi} + 8,017) + 1,297$, она приведена на рис. 2г.

Исследована возможность оценки отношения $\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi}$, характеризующего уровень помех по отношению к шуму, по статистическим параметрам огибающей. В качестве параметра x выбрана медиана выборки, нормированная на среднеквадратическое отклонение: $x = x_{0,5}/\sigma$. В качестве зависящего от него параметра y выбрана величина $\lg(\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi} + 1)$, $1 \leq \sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi} \leq 1000$. На рис. 3а для параметра y представлены медиана (толстая сплошная линия), квантили порядков 25 и 75 % (тонкие сплошные линии) и квантили порядков 5 и 95 % (точки). Регрессионная кривая с индексом корреляции 0,99 имеет для параметра y вид $f(x) = -0,43 \ln(x + 0,002) + 0,43$; поэтому отношение $\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi}$ можно оценить как

$$\sigma_{\Pi}/\sigma_{\Pi} = 10^{f(x)} - 1. \quad (5)$$

4. АПРОБАЦИЯ

Были рассмотрены 8 сеансов зондирования в приёмном пункте г. Йошкар-Ола в диапазонах 5÷30 МГц со скоростью перестройки частоты 100 кГц/с (690 выборок). Для разделения участ-

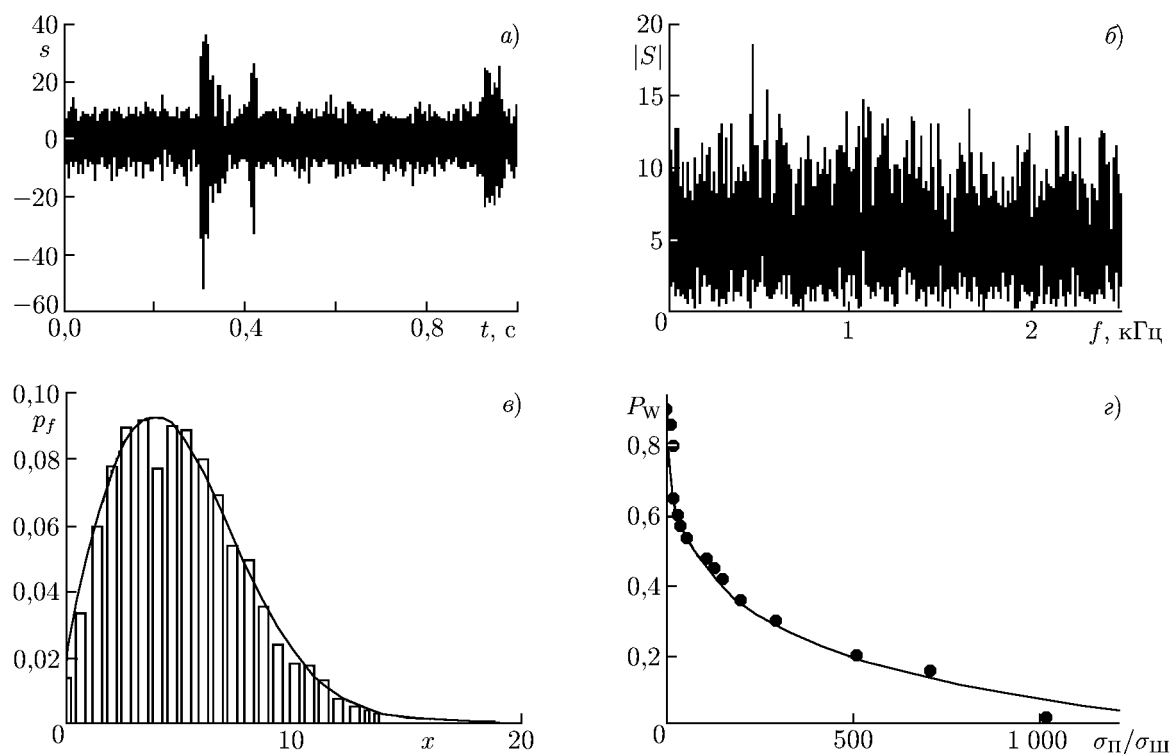


Рис. 2. Пример смеси шума и сосредоточенных помех для $\sigma_n/\sigma_{ш} = 3$ (а), её спектр (б), эмпирическая функция плотности спектра (в) и зависимость доли спектров, распределённых по закону Накагами, от мощности помехи (г)

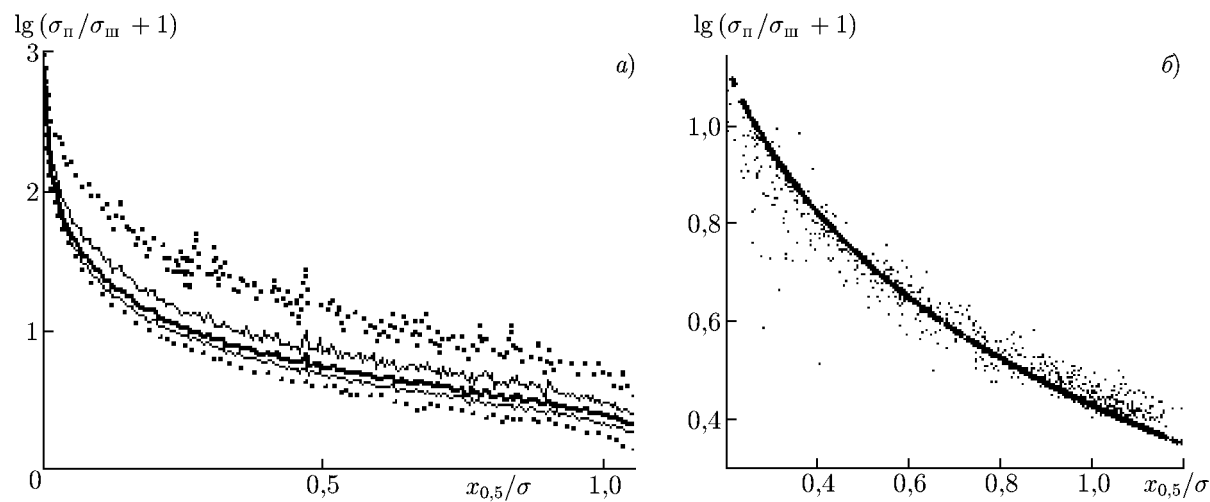


Рис. 3. Зависимость параметра, характеризующего отношение мощностей помеха/шум от параметра выборки (а) и сравнение этой зависимости с экспериментальными данными (б)

ков выборки, соответствующих шуму и сосредоточенным помехам, применялась методика поиска аномальных отсчётов из работы [6]. Средний уровень отношения $\sigma_n/\sigma_{ш}$ составил 3,4, максимальный — 16. Средняя ошибка определения отношения $\sigma_n/\sigma_{ш}$ по формуле (5) составила около 10,9%. Результаты, соответствующие расчётам по формуле (3) (большие точки) и измеренным значениям

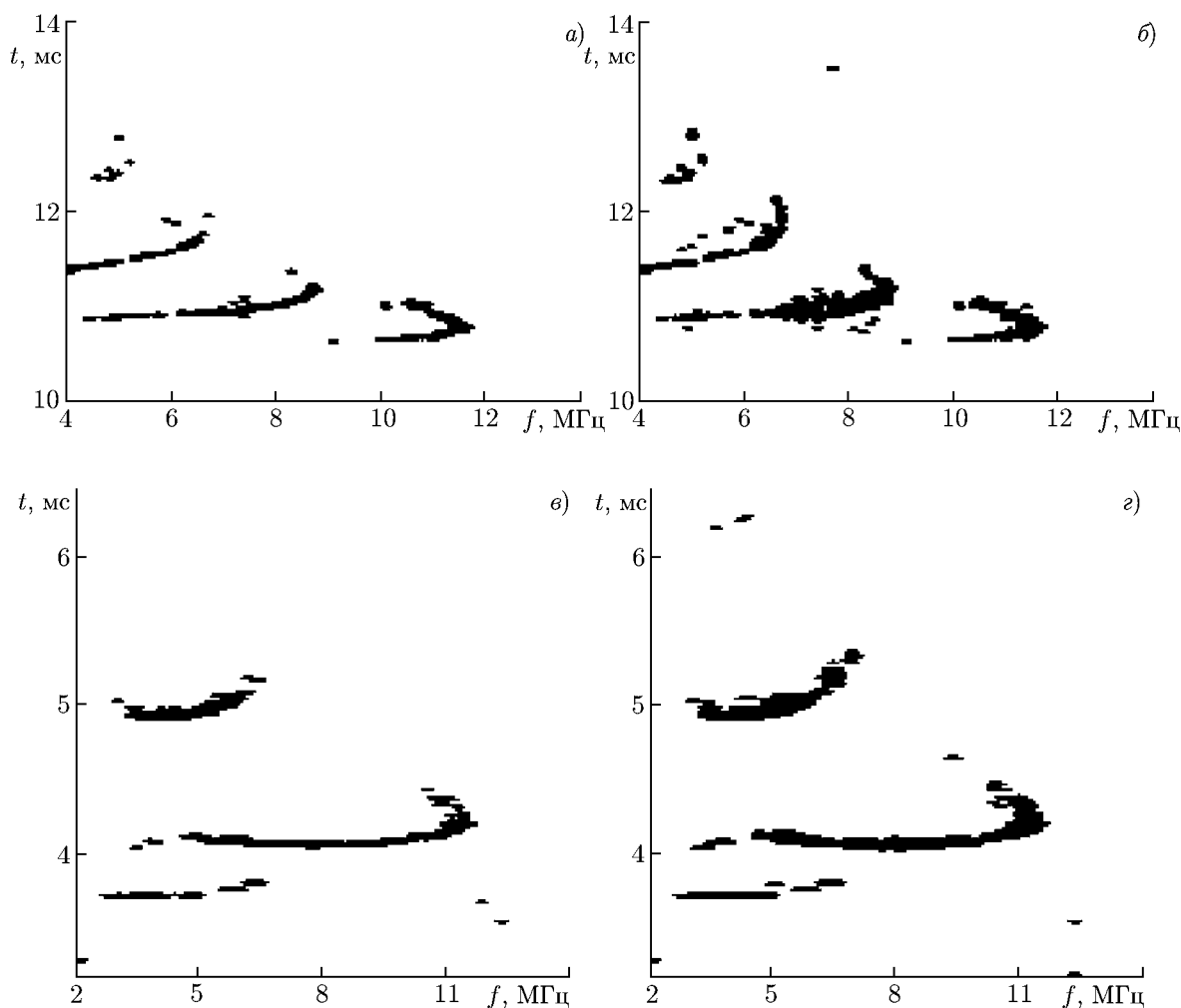


Рис. 4. Примеры спектрограмм с выделенным сигналом

ям (малые точки), представлены на рис. 36. Ряд ошибок связан с несовершенством применённой методики разделения шума и помех в случае большой длительности помехи, сопоставимой с длительностью выборки (1 с). В этом случае в рамках модели помехи идентифицировались, но не отделялись от шумов режекцией. Эта ситуация соответствует завышенному прогнозу уровня $\sigma_{\text{п}}/\sigma_{\text{ш}}$ по сравнению с эмпирическими точками в области значений $x_{0,5}/\sigma = 0,2 \div 0,4$ и заниженному прогнозу в области $x_{0,5}/\sigma = 1,0 \div 1,2$. К распределению Вейбулла для значений $\sigma_{\text{п}}/\sigma_{\text{ш}} = 1 \div 2$ принадлежали 90,2% выборок, для $\sigma_{\text{п}}/\sigma_{\text{ш}} = 3 \div 7$ — 80,2%. Использование выражения (5) позволит на практике оценивать уровень сосредоточенных помех относительно фоновых шумов, не прибегая к явному отделению помех режекцией.

Было также рассмотрено выделение полезного сигнала в спектре мощности.

Отсчёты в спектре мощности, соответствующие каналам, в которых сигнал превосходит шум и помехи, будем считать целевыми, а остальные отсчёты — фоновыми. Согласно модели из работы [7], для элемента анализа, содержащего полезный сигнал, спектр мощности может быть представлен как сумма выборок фоновых и целевых отсчётов с сильно отличающимися средними значениями. Среднее значение целевых отсчётов превышает среднее значение фоновых, а количество целевых отсчётов при этом много меньше количества фоновых. Задача выделе-

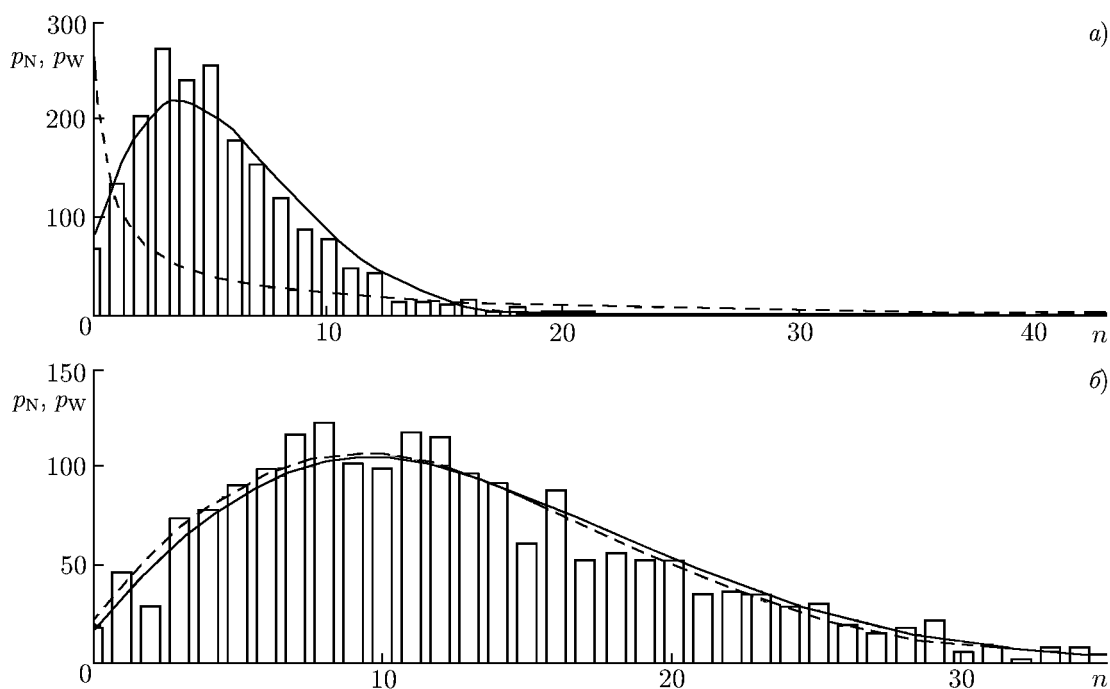


Рис. 5. Плотность вероятности и гистограмма спектра мощности при наличии (а) и отсутствии (б) полезного сигнала. Штриховая линия соответствует распределению Накагами, сплошная — распределению Вейбулла

ния сигнала формулируется как задача отделения целевых отсчётов, находящихся на правом конце гистограммы суммарной выборки, от фоновых отсчётов. Если фоновые отсчёты описываются теоретическими кривыми Накагами или Вейбулла, то целевыми можно считать все отсчёты в столбцах гистограммы выборки, находящиеся вне области, где эти зависимости положительны. Подразумевается, что, поскольку целевых отсчётов мало по сравнению с фоновыми отсчётами, они слабо влияют на результаты вычисления параметров теоретических кривых.

На основе данных предположений было проведено выделение сигнала в спектрах мощности. По статистическим параметрам всей выборки определялся вид каждой теоретической кривой плотности вероятности [11]. На рис. 4 показаны спектрограммы с сигналом, выделенным в предположении, что фоновые отсчёты распределены по законам Накагами (а, в) и Вейбулла (б, г) для сеансов зондирования Инскип—Йошкар-Ола (23:21 MSK, 20.10.2009, $df = 100$ кГц/с) и станция «Горьковская»—Йошкар-Ола (18:03 MSK, 24.03.2011, $df = 550$ кГц/с).

Из рис. 4 видно, что предположение о распределении Вейбулла для спектрального представления шума и помех позволяет выделять моды подробнее (включая их уширение и лучи Педерсена), чем предположение о распределении Накагами. Это объясняется тем, что, когда параметры теоретического распределения определяются по выборке, содержащей полезный сигнал, отсчёты сигнала начинают играть роль статистических выбросов. В этом случае распределение Вейбулла $p_W(x)$ при описании суммы шума и помех в частотной области оказывается более устойчивым, чем распределение Накагами $p_N(x)$ (см. рис. 5а), хотя при отсутствии полезного сигнала они одинаково адекватны для описания данных (см. рис. 5б). Значения центральных моментов (дисперсия, асимметрия, эксцесс), определённые из теоретических функций плотности вероятности, для распределения Накагами ближе к эмпирическим значениям. При этом потери информации при переходе от относительных частот выборки к теоретической функции плотности, вычисленные

через меру Кульбака—Лейблера [12], для распределения Накагами выше в среднем в 2,1 раза, чем при использовании распределения Вейбулла (оценено по 2000 спектрам мощности, из которых выделялся полезный сигнал).

ВЫВОДЫ

Представлена статистическая модель смеси фоновых шума и сосредоточенных помех с аналоговой модуляцией при приёме ЛЧМ-сигнала в декаметровом диапазоне длин волн. Получены оценки видов вероятностных распределений для сосредоточенных помех во временной области. Показано, что они представляют собой сумму нормального, арксинусоидального и равномерного распределений. Получено выражение для оценки отношения мощности помехи к мощности шума по статистическим параметрам огибающей.

Установлено, что смесь шума и помех в частотной области может быть описана не только распределением Накагами, но и распределением Вейбулла. Установлен вид зависимости доли выборок, распределённых по законам Накагами и Вейбулла, от уровня сосредоточенных помех. Выяснено, что для описания смеси в частотной области при отсутствии полезного сигнала распределения Накагами и Вейбулла являются одинаково адекватными. Однако распределение Вейбулла менее чувствительно к наличию полезного сигнала, чем распределение Накагами, поэтому использование распределения Вейбулла позволяет выделять сигнал как совокупность статистических выбросов в спектре мощности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. Гантмахер В. Е., Быстров Н. Е., Чеботарёв Д. В. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка. М.: Наука и техника, 2005. 400 с.
3. Рябов И. В. // Приборы и техника эксперимента. 2001. № 2. С. 62.
4. Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Вертоградов В. Г. и др. // Журн. радиоэлектроники. 2010. № 12. С. 3.
5. Подлесный А. В., Брынько И. Г., Куркин В. И. и др. // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 2 (4). С. 24.
6. Колчев А. А., Щирий А. О. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 9. С. 751.
7. Колчев А. Е., Недопёкин А. Е. // Компьютерные исследования и моделирование. 2012. Т. 4, № 3. С. 563.
8. Данилов В. А. // Радиотехника и электроника. 1990. Т. 35, № 1. С. 208.
9. Антипенский Р. В. // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 118.
10. Новицкий П. В., Зюграф И. А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л: Энергоатомиздат, 1991. 304 с.
11. Вадзинский Р. Н. Справочник по вероятностным распределениям. СПб.: Наука, 2001. 295 с.
12. Kullback S., Leibler R. A. // Ann. Math. Stat. 1951. V. 22, No. 1. P. 79.

Поступила в редакцию 28 июля 2014 г.; принята в печать 12 февраля 2015 г.

A MODEL OF THE MIXTURE OF BACKGROUND NOISE AND CONCENTRATED INTERFERENCE WHEN RECEIVING A SHORTWAVE CHIRP SIGNAL*A. E. Nedopekin*

We present a statistical model of the mixture of background noise and interference concentrated over the spectrum. Such a mixture is realized for the case of broadband reception of a shortwave signal with linear frequency modulation over the entire decameter-wavelength range. The types of the probability distributions statistically describing the random noise and interference, as well as the distributions, which describe their sum in the time and frequency domains, are established. The level of concentrated interference with respect to noise is estimated using the signal-envelope parameters and the method of the useful-signal isolation in the power spectrum on the basis of describing the noise and interference sum using the Weibull distribution is proposed.