

УДК 621.391

Ю.Д. Украинцев, В.В. Кальников

АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ БАЙЕСОВСКИЙ ПОДХОД К ОПРЕДЕЛЕНИЮ АДАПТИВНОГО ПОРОГА РЕШАЮЩЕЙ СХЕМЫ ПРИЕМНИКА НА РАДИОЛИНИЯХ ДЕКАМЕТРОВОГО ДИАПАЗОНА

Украинцев Юрий Дмитриевич, кандидат технических наук, окончил факультет радиосвязи военной академии связи (г. Ленинград). Доцент кафедры «Телекоммуникационные технологии и сети» Ульяновского государственного университета. Имеет статьи, монографии, изобретения в области статистического анализа и синтеза телекоммуникационных систем. [e-mail: 9019471930@mail.ru].

Кальников Владимир Викторович, кандидат технических наук, доцент, окончил радиоинженерный факультет Киевского высшего военного инженерного училища связи. Главный специалист ФНПЦ АО «НПО «Марс». Специализируется в области проектирования систем управления специального назначения, построения систем связи и обмена данными. Имеет статьи, изобретения в области проектирования распределенных систем управления специального назначения, систем связи и обмена данными. [e-mail: mars@mv.ru].

Аннотация

Представлен подход к определению порога решающей схемы приемного устройства на радиолиниях декаметрового диапазона, реализующий альтернативный метод Байеса. При этом в отличие от классического подхода, когда порог решающей схемы определяется в предположении, что плотность распределения вероятностей (ПРВ) принимаемого сигнала подчиняется нормальному закону распределения, предлагается подход, основанный на текущем восстановлении ПРВ мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала в каждой ветви разнесения. Алгоритм работы восстановления ПРВ основан на непараметрической оценке ПРВ Парзена-Розенблатта в ходе конкретного сеанса связи. При этом в ходе сеанса связи определяются наиболее вероятные значения сигнала (мода) при отсутствии и наличии помех, устанавливается в соответствии с реальной обстановкой на линии связи порог решающей схемы, а затем на основе сдвига мод принимается решение о вероятности ошибочного приема. На основе имитационного моделирования показана эффективность подхода при работе на декаметровых радиолиниях, функционирующих в условиях непараметрической априорной неопределенности относительно сигналов и помех.

Ключевые слова: замирания сигнала, мгновенные значения огибающей принимаемого сигнала, парзеновская процедура оценки плотности распределения вероятностей, мода, порог решающей схемы приемника, вероятность ошибочного приема.

AN ALTERNATE BAYESIAN APPROACH TO THE DETECTION OF AN ADAPTIVE DECISION THRESHOLD SCHEME FOR THE RECEIVER AT DECAMETER RADIO LINKS

Iurii Dmitrievich Ukraintsev, Candidate of Engineering; graduated from the Faculty of Radiocommunications of the Leningrad Military Academy of Communications; Associate Professor of the Department of Telecommunication Technologies and Networks at Ulyanovsk State University; an author of articles, monographs inventions in the field of statistical analysis and synthesis of telecommunication systems. e-mail: 9019471930@mail.ru.

Vladimir Viktorovich Kalnikov, Candidate of Engineering, Associate Professor; graduated from Radioengineering Faculty of Kiev Higher Military Engineering College of Communications; Chief Specialist at FRPC JSC 'RPA 'Mars'; specializes in the field of special-purpose control system design, creation of communication and data exchange systems; an author of articles and inventions in the field of designing the distributed control systems of special-purpose, communication and data exchange systems. e-mail: mars@mv.ru.

Abstract

The article deals with an approach to the determination of the decision threshold scheme of a receiving device in decameter radio link, which implements the alternative Bayesian method. In contrast to the classical approach when the decision threshold scheme is determined with the assumption that the probability density function (PDF) of the received signal is subject to the Gaussian law, an approach based on the current recovery of instantaneous values of the received signal envelope in each distribution path is proposed. The PDF recovery algorithm is based on the nonparametric Parzen-Rosenblatt density estimation method. The estimating is carried out during a specified communication session. In this case, the most probable values of the signal (mode) are determined if the noise interference is absent and present, the decision threshold scheme is established in accordance with the real situation on the communication line. Then, on the basis of the mode shift, a decision is made about the signal-error probability. On the basis of simulation modeling, the efficiency of the approach is shown when operating at decameter radio links working under nonparametric prior uncertainty relative to signals and interference.

Key words: signal depression, instantaneous values of the received signal envelope, Parzen method of the probability density estimation, mode, decision threshold scheme of a receiving device, error probability.

ВВЕДЕНИЕ

Активное проникновение беспроводных систем связи связано с освоением новых, более перспективных по пропускной способности диапазонов волн. В этих условиях возникает желание об отказе от проверенного временем и хорошо изученного декаметрового диапазона. Однако именно этот диапазон, несмотря на проблемы распространения радиоволн и свою колоссальную загруженность, обладает неоспоримыми преимуществами, позволяющими передать небольшие объемы информации на значительные расстояния в наиболее неблагоприятных условиях ведения связи. Последнее обуславливает целесообразность дальнейших работ в области повышения эффективности систем коротковолновой (КВ) связи. В чем проблемы КВ-радиосвязи?

Прием декаметровых (коротких) радиоволн всегда сопровождается изменением во времени уровня принимаемого сигнала, причем это изменение носит случайный характер. Такое явление называют замираниями сигнала, которые бывают быстрыми и медленными. Очевидно, что при наличии замираний можно судить только о вероятности появления того или иного уровня сигнала на входе приемного устройства.

Основной причиной быстрых замираний сигнала является многолучевое распространение радиоволн. Это явление проявляется в приходе в точку приема двух лучей, которые распространяются путем одного и двух отражений от ионосферы. Изменения электронной плотности, непрерывно происходящие в ионосфере, приводят к изменению длины пути каждого из лучей, следовательно, и к изменению разности фаз между лучами. Для изменения фазы волны на 180 градусов

достаточно, чтобы длина пути изменилась на π , т. е. на 5–50 м. [1]. Такие незначительные изменения длины пути происходят практически непрерывно, поэтому колебания напряженности электрического поля в диапазоне коротких волн являются частыми и глубокими.

Кроме того, замирания сигнала вызываются рассеянием радиоволн на неоднородностях ионосферы и интерференцией рассеянных волн. Интерференция обыкновенной и необыкновенной составляющих расщепленной волны также приводит к замираниям. Помимо интерференционных замираний сигнала, на коротких волнах наблюдаются и поляризационные замирания. Причиной этих замираний является поворот плоскости поляризации волны при распространении ее в направлении силовых линий магнитного поля Земли [2].

На практике все указанные причины замираний сигнала действуют одновременно. Наблюдения показали, что при быстрых замираниях для уровней напряженности поля, превышающих средние значения в 90% времени, средняя величина замираний может достигать 12 раз в минуту [3]. Все это свидетельствует о необходимости описания мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала с позиций статистической радиотехники. Принцип работы декаметровых линий связи представлен на рисунке 1.

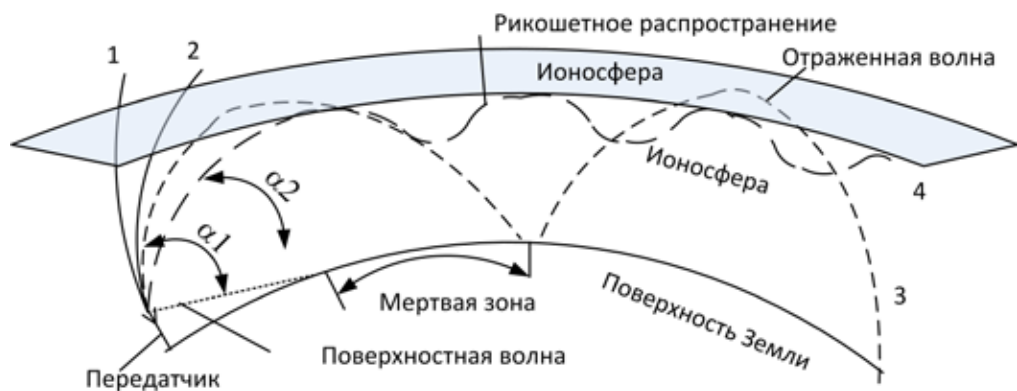


Рис. 1. Принцип работы декаметровых линий связи

Для приема дискретных сигналов, применяемых в КВ-связи, используются различные критерии определения порога решающей схемы. Данная задача проще всего решается с помощью «отношения правдоподобия». Для рассмотрения этого вопроса обратимся к рисунку 2.

Если бы на входе приемника отсутствовали помехи, то имели бы дело с «чистыми» сигналами S_1 (бестоковая) и S_2 (токовая) посылки. Тогда задача разделения сигналов решается очень просто. При наличии же помех различного происхождения сигналы искажаются, для их описания приходится использовать вероятностные подходы. В этой ситуации сигналы вместе с помехами описываются функциями плотности распределения вероятности (ПРВ): $w(x/S_1)$ и $w(x/S_2)$. На рисунке 3 изображены эти функции. При этом они умножены на весовые коэффициенты: $H_{12}P(S_1)$ и $H_{21}P(S_2)$ [4]. На этом же рисунке представлен порог решающей схемы $x_{пор}$, который определяется из выражения:

$$\frac{W(x/S_1)}{W(x/S_2)} = \frac{H_{21}P(S_2)}{H_{12}P(S_1)}, \quad (1)$$

левая часть которого называется отношением правдоподобия.

При всех неоспоримых достоинствах представленного подхода использование формулы Байеса требует априорного знания плотности распределения случайной величины и условных вероятностей для оценки конкретных параметров (в конкретном случае наиболее вероятного значения принимаемого сигнала). Более того, эта задача определения не только порога решающей схемы, но и качества приема сигнала сравнительно просто решается, если ПРВ огибающей принимаемого сигнала подчиняется симметричному, нормальному закону распределения, что было характерно для проводных аналоговых систем связи.

Выше было показано, что на линиях КВ-радиосвязи наблюдаются быстрые замирания, которые хорошо описываются законом распределения Релея (при интервалах наблюдения 3–7 мин) [1]. Помимо быстрых замираний, наблюдаются медленные замирания, для выявления которых наблюдения ведутся в течение 40–60 мин. Причиной этих замираний является изменение

поглощения радиоволн в ионосфере. Распределение огибающей амплитуды сигнала при медленных замираниях подчиняется логарифмически-нормальному закону со стандартным отклонением порядка 8 дБ. Это свидетельствует о нецелесообразности использования классического байесовского подхода, опирающегося на нормальный закон распределения [2].

Дополнительно следует отметить, что в условиях сильных замираний принимаемого сигнала, характерных для КВ-радиоканала, ошибки перестают быть независимыми и группируются в пакеты ошибок. Поэтому вероятность $P_{ош}$ не дает полной характеристики состояния канала, поскольку не отражает временного распределения ошибок за период измерения. Многочисленные исследования статистики ошибок привели к тому, что в настоящее время насчитывается несколько десятков моделей, более или менее удовлетворительно описывающих потоки ошибок в реальных каналах [1–3, 5].

В настоящее время разработаны математические модели КВ-каналов, в которых эффект группирования ошибок рассматривается как следствие появления в аналоговом канале соответствующих искажающих факторов. Такая модель была рассмотрена в [1] применительно к релейским замираниям для некогерентного приема сигналов, ортогональных в усиленном смысле. В этой модели основными оцениваемыми параметрами являются: отношение сигнал–шум, дисперсия шума, синфазная и квадратурная составляющие модуля передаточной функции. Разработанные математические модели КВ-канала при практической реализации требуют дополнительных ресурсов, тем самым за счет удорожания оборудования значительно снижают такие характеристики, как эффективность/пропускная способность и эффективность/стоимость.

Поставленная проблема может быть сравнительно просто решена с помощью современных быстродействующих вычислительных систем, позволяющих в реальном масштабе времени (в ходе сеанса связи) вычислять плотность распределения мгновенных значений огибающей амплитуды принимаемого сигнала, затем определять порог решающей схемы, отражающий текущую обстановку, и на основе определения наиболее вероятного значения сигнала обеспечивать устойчивую и надежную передачу сообщений.

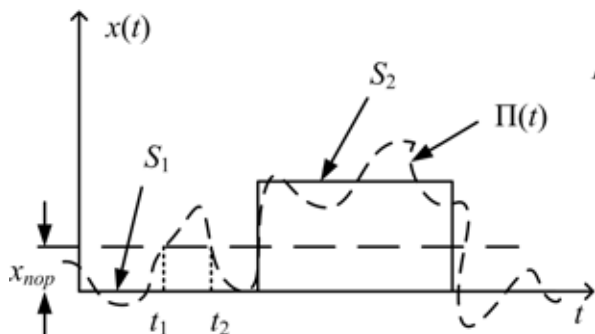


Рис. 2. Сигналы на входе приемника

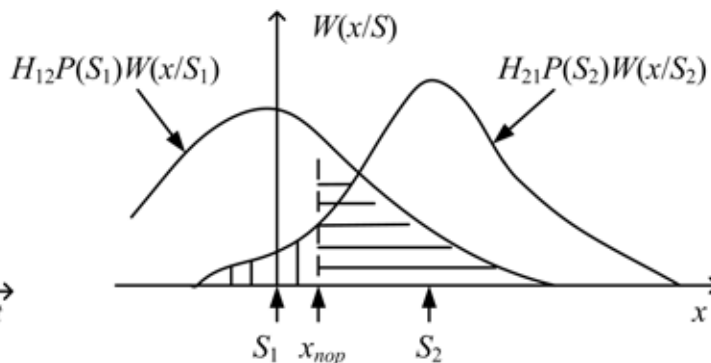


Рис. 3. Функции ПРВ сигнала

Для решения этой проблемы целесообразно использовать непараметрическую парзеновскую процедуру [6–8], позволяющую определить не только неизвестную плотность распределения, но и ее квантили, например моду, дисперсию и т. д.

Постановка задачи

Для повышения помехоустойчивости на линиях современной КВ-связи предлагается использовать адаптивно-непараметрический классификатор, основанный на текущем восстановлении ПРВ мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала в каждой ветви разнесения. Алгоритм работы восстановления ПРВ основан на непараметрической оценке ПРВ Парзена-Розенблатта, анализ которого проведен в работах [6–10]. При этом в ходе сеанса связи определяются наиболее вероятные значения сигнала (мода) при отсутствии и наличии помех, устанавливается в соответствии с реальной обстановкой на линии связи порог решающей схемы, а затем на основе сдвига мод принимается решение о вероятности ошибочного приема. Для уточнения качества определения порога методом имитационного моделирования набиралась достаточная статистика (репрезентативная выборка) мод сигнала, мод смеси сигнала и помехи, а также порога решающей схемы. На основе этих выборок строились ПРВ сигнала, ПРВ смеси сигнала с помехой и порога решающей схемы, что позволило определить дисперсию (разброс) указанных параметров. Вся работа осуществляется с помощью разработанного классификатора помеховой ситуации. В заключительной части работы приведен график вероятности ошибочной классификации помех при использовании классического байесовского подхода и подхода, основанного на альтернативном методе Байеса.

Решение задачи

На входе приемного устройства наблюдается изменяющийся во времени случайный сигнал, мгновенные значения которого представлены на рисунке 4.

С помощью дискретизатора из представленной последовательности выбираются независимые отсчеты, определяемые интервалом корреляции.

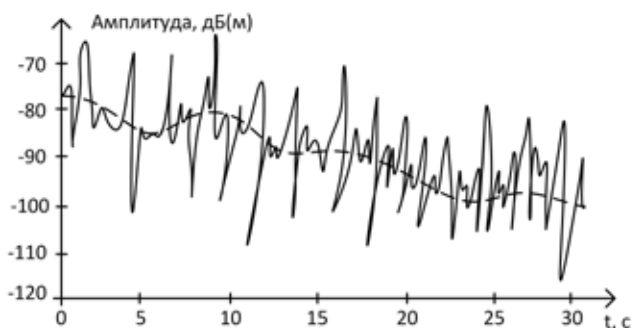


Рис. 4. Сигнал на входе приемного устройства

По выборке $x = x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ из генеральной совокупности $\{x\}$ независимых, одинаково распределенных случайных величин, каковыми являются мгновенные значения огибающей принимаемого сигнала, подчиняющихся неизвестной ПРВ, можно получить оценку $W_N(x)$, используя рекуррентную парзеновскую процедуру (2) [7, 8, 10]:

$$W_N(x) = W_{N-1}(x) + \frac{1}{N} \left(W_{N-1}(x) + \frac{1}{h_N} K(y) \right), \quad (2)$$

где N – объем выборки достаточной статистики;

$$h_N = C * N^{-\alpha}, \quad (3)$$

где $0 < \alpha < 0,5$ – ширина аппроксимирующего ядра,

$C = 1 \dots 10$ – параметр масштаба,

$K(y)$ – аппроксимирующая функция.

Функция $W(x)$ обладает той же степенью гладкости, что и ядро $K(y)$. Ядро $K(y)$ должно удовлетворять условию нормировки $\int K(y) dy = 1$. Тогда $\int W(x) dx = 1$.

При любом W функцию $W(x)$ действительно можно интерпретировать как ПРВ.

В представленной работе в качестве аппроксимирующей выбрана функция:

$$K(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}h_N} \exp^{-\frac{(x-x_i)^2}{h_N^2}}, \quad (4)$$

где x – значение из интервала оценки ПРВ;

x_i – мгновенное значение огибающей принимаемого сигнала (случайная дискретная последовательность с неизвестным законом распределения).

Обоснование параметров оценки ПРВ представлено в работах [6, 9].

На основе полученных значений ПРВ принимаемого сигнала, следуя байесовскому подходу, определяется порог решающей схемы приемного устройства на основе выражения [11]:

$$W_N(x_c) = W_N(x_{c+n}), \quad (5)$$

а также значение ее моды (наиболее вероятного значения) в соответствии с выражением:

$$M(i, T) = \max_{(x)} W_N(x), \quad (6)$$

где i – интервал набора достаточной статистики;

T – время, необходимое для набора статистики на заданном интервале.

На основе полученных значений ПРВ принимаемой смеси сигнала и помех определяется значение ее моды в соответствии с выражением:

$$M(i, T) = \max_{(x+n)} W_N(x_c + x_{c+n}), \quad (7)$$

где i – временной интервал набора достаточной статистики;

T – общее время, необходимое для набора статистики на заданном интервале.

В принципе все параметры, необходимые для работы решающей схемы приемника, определены на основе анализа текущей статистики по мгновенным значениям

оглающей смеси сигнала и помех U_{c+n} , наблюдаемой на входе радиоприемного устройства. При этом в дальнейшем вероятность ошибочного приема сигнала определяется, как и при классическом Байесовском подходе:

- если $U_{c+n} < U_{пор}$ – принимается решение об отсутствии помех;
- если $U_{c+n} > U_{пор}$ – принимается решение о наличии помех.

РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На основе имитационного моделирования в предположении, когда помеха отсутствует (это реально в момент вхождения в связь), с помощью предложенной процедуры Парзена-Розенблатта (выражение 2) берется 100 значений некоррелированных отсчетов мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала U_c и вычисляется ПРВ (кривая 1 на рисунке 5). При проведении исследований в качестве помехи использовался сигнал, представляющий собой копию сформированного сигнала. В результате была получена ПРВ (кривая 2 на рисунке 5). Точка пересечения этих кривых и является порогом решающей схемы приемного устройства.

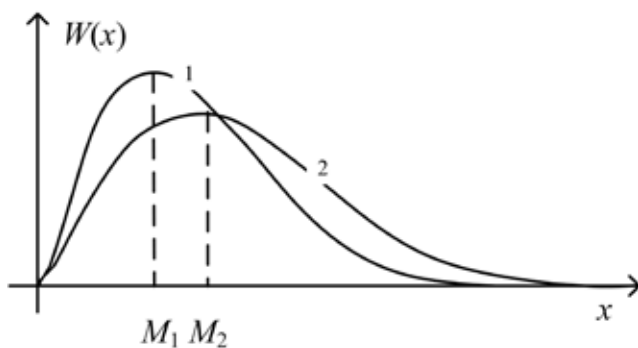


Рис. 5. ПРВ мгновенных значений сигнала

На рисунке 5 кривая 1 характеризует плотность распределения мгновенных значений при отсутствии помех (Закон Релея), кривая 2 – плотность распределения мгновенных значений огибающей смеси сигнала и помехи (Закон Релея).

Для уточнения определения порога решающей схемы приемника набиралась статистика мод сигнала $M_c(i, T)$ и смеси сигнала с помехой $M_{c+n}(i, T)$. Также, как и ранее, при определении ПРВ набираем по 100 отсчетов мод. Результаты вычислений представлены на рисунке 6.

В результате вычислений в соответствии с выражением (2) получены кривые ПРВ мод сигнала (кривая 1) и мод сигнала с помехой (кривая 2). Определен уточненный порог решающей схемы (точка 3). В принципе, он незначительно отличается от порога, определенного на основе лишь 100 некоррелированных значений мгновенных значений огибающей принимаемого сигнала. Результаты расчетов показывают, что независимо от текущей ПРВ огибающей принимаемого сигнала плот-

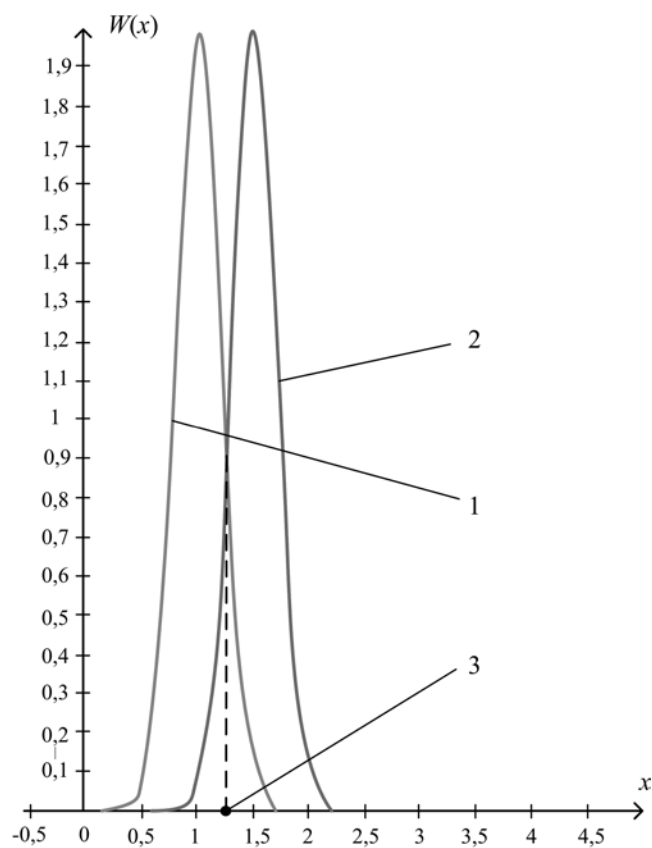


Рис. 6. ПРВ мгновенных значений сигналов при отсутствии помех и смеси сигнала и помех

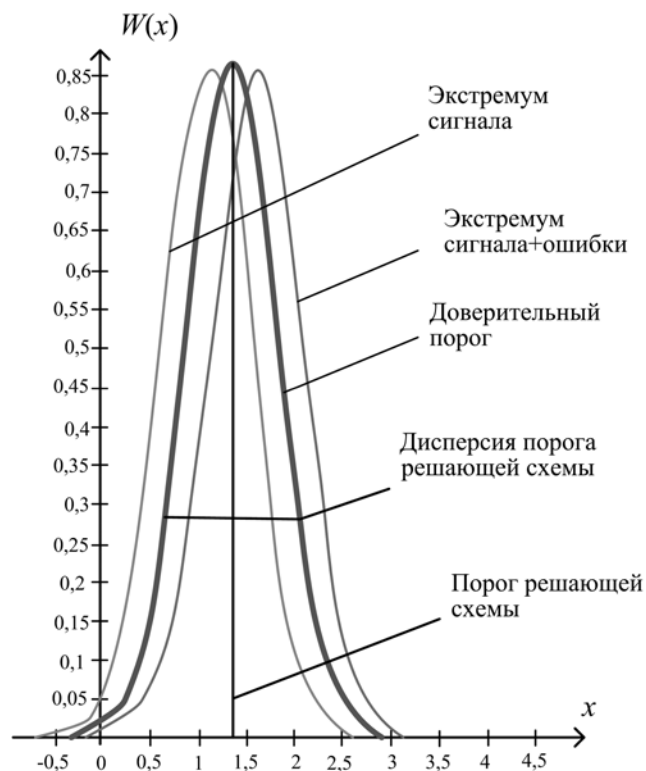


Рис. 7. Уточнение качества определения порога методом имитационного моделирования

ность распределения мод сигнала и сигнала с помехой подчиняется усеченному слева нормальному распределению.

Для определения разброса (дисперсии) порога решающей схемы, определенного имитационным методом, набиралась его достаточная статистика (100) отсчетов. Затем, используя выражение (2), определялась ПРВ порога. Результаты расчета представлены на рисунке 7.

В заключение работы произведен сравнительный анализ качества работы предлагаемого непараметрического классификатора помех с классическим классификатором, построенным на основе метода Байеса. Оценка производилась на основе определения вероятности ошибочного приема.

Выше было показано, что ПРВ мод подчиняется нормальному закону, усеченному слева, что привело к необходимости вывода выражения для определения вероятности ошибочного приема:

$$P_{ош} = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{|x_n - M_c|}{\sigma_c}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{M_{c+n}}{\sigma_{c+n}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\frac{|M_{c+n}|}{\sigma_{c+n}}} e^{-\frac{z^2}{2}} dz. \quad (8)$$

Результаты машинного расчета представлены на рисунке 8.

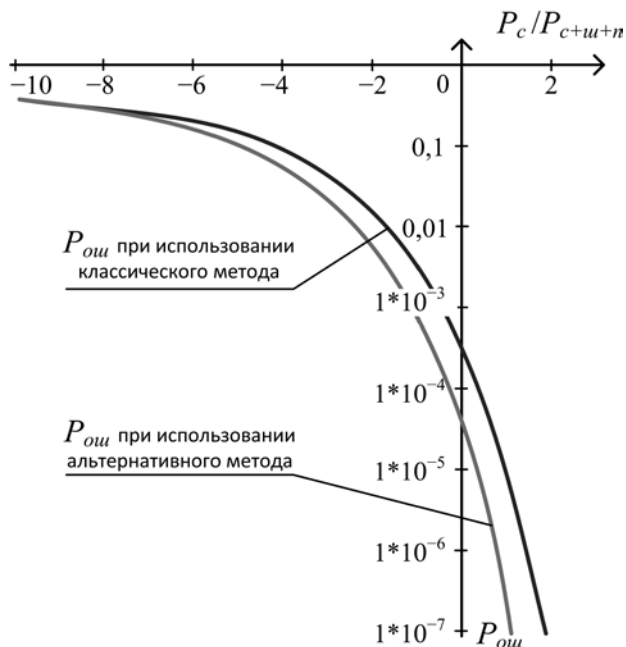


Рис. 8. Расчет вероятности ошибки сигнала при использовании классического и альтернативного методов Байеса при определении порога решающей схемы приемника

Из графика, представленного на рисунке 8, видно, что вероятность ошибочной классификации уменьшается до значения 10^{-4} в то время, когда на реальных сеансах связи нормальным отклонением является значение 10^{-3} .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Современные быстродействующие микропроцессорные вычислительные системы позволяют обрабатывать в реальном масштабе времени объемы достаточной статистики (100 независимых отсчетов мгновенных значений принимаемого сигнала).

В свою очередь, это позволяет, не увеличивая массогабаритные показатели современных беспроводных систем связи, повысить их эффективность работы в условиях непараметрической неопределенности относительно сигналов и помех.

Целесообразно продолжить работы по оценке качества определения адаптивного порога решающей схемы с помощью альтернативного метода Байеса.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бузин А.Ю., Зарубин А.Ю., Малышев И.И. Показатели верности передачи информации в адаптивных коротковолновых каналах связи // Вестник ТГТУ. – 2007. – Т. 13, № 1А. – С. 46–50.
2. Синтез, анализ и прогнозирование характеристик ионосферных линий декаметровой радиосвязи / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, Д.В. Иванов [и др.] ; под общ. ред. проф. В.А. Иванова. – Йошкар-Ола : Марийский государственный технический университет, 2011. – 180 с.
3. Беспроводные технологии от последней мили до последнего дюйма : учеб. пособие / М.С. Немировский [и др.]. – М. : Эко-Тренз, 2010. – 400 с.
4. Звягин Л.С. Применение байесовского подхода в измерениях аналитических данных как фактор формирования процессов системного экономического развития // Молодой ученый. – 2017. – № 22. – С. 256–261.
5. Мясковский Г.М. Системы производственной радиосвязи : справочник / под ред. И.М. Пышкина. – М. : Связь, 1980 – 216 с.
6. Украинцев Ю.Д., Украинцев К.Ю., Щелкунов Н.Н. Методы непараметрической идентификации плотности распределения вероятностей мгновенных значений сигналов и помех, наблюдаемых на входе радиоприемного устройства // Тр. 53-й науч. конф. МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук» Ч. I. Радиотехника и кибернетика. Т. 1 – М. : МФТИ, 2010. – 230 с.
7. Parzen. On estimation of a probability density function and mode. Ann. Math. Statist, 1962, no 3 (33), 3, pp. 1065–1076.
8. Rosenblatt M. Remarks on some nonparametric estimates of a density function. Ann. Math. Statist, 1956, no 3 (27), 3, pp. 832–837.
9. Украинцев Ю.Д., Украинцев К.Ю. Применение методов непараметрической статистики в системах помехоустойчивого кодирования. Современные проблемы создания и эксплуатации радиотехнических систем : сб. науч. тр. восьмой Всерос. науч.-практ. конф., г. Ульяновск, 1–2 июля 2013 г. – Ульяновск : УлГТУ, 2013. – 265 с.

10. Адаптивный порог решающей схемы радиоприемного устройства, основанный на «наивном» байесовском подходе. Ю.Д. Украинцев, А.И. Сатинов, А.В. Гончаров, М.О. Дворовой, О.И. Мешков // Итоги науки и техники : науч.-техн. сб. № 98. Труды академии. – СПб. : ВАС, 2017. – С. 93–99.

11. Бородин А.Н. Элементарный курс теории вероятностей и математической статистики. – СПб. : Лань, 2002. – 256 с.

REFERENCES

1. Buzin A.Iu., Zarubin A.Iu., Malyshev I.I. Pokazateli vernosti peredachi informatsii v adaptivnykh korotkovolnovykh kanalakh svyazi [Indexes of Data Communication Fidelity in Adaptive Short Wave Channels of Communication]. *Vestnik TGTU* [Transactions of TSTU], 2007, vol. 13, no. 1A, pp. 46–50.

2. Ivanov V.A., Riabova N.V., Ivanov D.V. et al. *Sintez, analiz i prognozirovanie kharakteristik ionosferykh linii dekametrovoiradiosvyaзи. Podobshch. red. prof. V.A. Ivanova.* [Synthesis, Analysis and Prediction of HF Ionospheric Radio Communications Link Parameters]. Yoshkar-Ola, Mariiskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet Publ., 2011. 180 p.

3. Nemirovskii M.S. et al. *Besprovodnye tekhnologii ot poslednei mili do poslednego diuima. Ucheb. posobie* [Wireless Technologies from the Last Miles to the Last Inch. Textbook]. Moscow, Eko-Trenz Publ., 2010. 400 p.

4. Zviagin L.S. Primenenie baesovskogo podkhoda v izmereniakh analiticheskikh dannykh kak faktor formirovaniia protsessov sistemnogo ekonomicheskogo razvitiia [The Application of Bayesian Approach to Analytical Data Measurements as a Factor of Systematic Economic Development Process Creation]. *Molodoi uchenyi* [Youth Scientist], 2017, no. 22, pp. 256–261.

5. Miaskovskii G.M. *Sistemy proizvodstvennoi radiosvyaзи. Spravochnik pod red. I.M. Pyshkina* [Industrial Radio Service Systems. Reference Textbook edited by I.M. Pushkin]. Moscow, Sviaz Publ., 1980. 216 p.

6. Ukraintsev Iu.D., Ukraintsev K.Iu. Shchelkunov N.N. *Metody neparametricheskoi identifikatsii plotnosti raspredeleniia veroiatnostei mgnovennykh znachenii signalov i pomekh, nabliudaemykh na vkhode radiopriemnogo ustroistva* [Nonparametric Methods for Identification of Probability Density Function of Instantaneous Values of Signals and Noises Observed at Radio Receiver Input]. *Tr. 53-i nauch. konf. MFTI "Sovremennye problemy fundamentalnykh i prikladnykh nauk" Ch. I. Radiotekhnika i kibernetika. T. 1* [Proc. of the 53d the Moscow Institute of Physics and Technology Sci. Conf. on Challenges of Fundamental and Applied Sciences. Part 1. Radioengineering and Cybernetics. Vol. 1]. Moscow, MIPT Publ., 2010, 230 p.

7. Parzen. On Estimation of a Probability Density Function and Mode. *Ann. Math. Statist*, 1962, no. 3 (33), 3, pp. 1065–1076.

8. Rosenblatt M. Remarks on Some Nonparametric Estimates of a Density Function. *Ann. Math. Statist*, 1956, no. 3 (27), 3, pp. 832–837.

9. Ukraintsev Iu.D., Ukraintsev K.Iu. Primenenie metodov neparametricheskoi statistiki v sistemakh pomekhoustoichivogo kodirovaniia [Application of Nonparametric Statistics Methods in Noise-Immune Coding Systems]. *Sovremennye problemy sozdaniia i ekspluatatsii radiotekhnicheskikh sistem. Sb. nauch. tr. vosmoi Vseros. nauch.-prakt. konf., Ulyanovsk, 1–2 iulia 2013* [Proc. of the 8th Russian Sci. Conf. on Challenges of Creation and Operation of Radioengineering Systems]. Ulyanovsk, UISTU Publ., 2013, 265 p.

10. Ukraintsev Iu.D., Satinov A.I., Goncharov A.V., Dvorovoi M.O., Meshkov O.I. *Adaptivnyi porog reshaiushchei skhemy radiopriemnogo ustroistva, osnovannyi na "naivnom" baesovskom podkhode* [An Adaptive Decision Threshold Scheme for the Receiver based on a 'Childly' Bayesian Approach]. *Itogi nauki i tekhniki. Nauch.-tekhn. sb. № 98. Trudy akademii* [Proc. of the Academy no. 98. Findings of Science and Engineering]. St. Petersburg, VAS Publ., 2017, pp. 93–99.

11. Borodin A.N. *Elementarnyi kurs teorii veroiatnostei i matematicheskoi statistiki* [Fundamentals of the Theory of Probability and Mathematical Statistics]. St. Petersburg, Lan Publ., 2002. 256 p.