РАСПОЗНАВАНИЕ ДИСКРЕТНОГО СИГНАЛА В АДДИТИВНОМ ШУМЕ ДЛЯ ДВУХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Троицкий И.И.[1], *Якубов Р.Ж.*[2]

Предлагаемый метод основан на корреляционной связи шумов в каналах передачи данных. Для компенсации шума решается задача выбора линейной функции взаимосвязи шумов и определяется ее параметр на основе максимума отношения сигнал/шум. Дискретный полезный сигнал содержится лишь в одном из каналов. Наличие посторонних шумов, возникающих при передаче информации, моделируется путем ввода линейных комбинаций нормальных случайных величин, связанных статистически. Это позволяет определить теоретическую (т.е. верхнюю границу) вероятности распознавания сигнала, путем аналитического выделения соотношения сигнал/шум. В работе определены отношения сигнал/шум для каналов, представлена модель результирующего канала, представляющего собой линейную комбинацию исходных, с параметрами, позволяющими достичь максимального отношения сигнал/шум. Эксперименты проводились с использованием метода k ближайших соседей, имеющего ряд преимуществ, таких как простота реализации, высокая эффективность, возможность варьирования количества учитываемых соседей при классификации. В работе графически представлено влияние изменения некоторых параметров математической модели на вероятность распознавания сигнала, а также дана сравнительная характеристика распознавания сигнала при наличии двух каналов передачи информации, результирующего канала с оптимально подобранным коэффициентом компенсации шума и интеграла вероятности, позволяющего определить теоретическую вероятность распознавания. Представленная работа позволяет провести анализ представленной модели передачи данных с точки зрения влияния взаимосвязи каналов на распознавание сигнала и наглядно убедиться в эффективности работы метода k ближайших соседей.

Ключевые слова*: компенсация шума, отношение сигнал/шум, интеграл вероятности распознавания, коэффициент корреляции, компьютерное моделирование, статистика, полезный сигнал, канал передачи данных.*

DOI: 10.21681/2311-3456-2017-1-57-62

Введение

Распознавание дискретного сигнала в аддитивном шуме может решаться различными методами: параметрическими, непараметрическими (в т.ч. методами потенциальных функций и k ближайших соседей), с использованием быстрого преобразования Фурье, вейвлет-преобразований, методы с использованием второго канала передачи информации: корреляционные, адаптивной фильтрации и т.д. [1-9].

В отличие от перечисленных методов распознавания сигналов по двум каналам передачи информации, в данной работе второй канал используется для учета статистической взаимосвязи шумов с первым. Будем считать, что во втором канале содержится только шум, а в первом полезный сигнал и аддитивный шум. Если второй канал передачи информации отсутствует, то в ряде случаев его можно искусственно ввести.

Математическое представление исследуемой модели

В связи с простотой реализации и наличием опыта проведенных исследований [10] для решения задачи классификации полученных данных в работе был использован метод k ближайших соседей [11].

Данный метод является одним из наиболее простых алгоритмов классификации. Классифицируемому объекту s присваивается тот класс S_i (i=1 …l, где l – количество классов), к которому относится большинство из k ближайших элементов обучающей выборки.

Оценка успешного распознавания бинарного сигнала в канале представляется в виде величины $P^* = \frac{m}{N}$, где m — количество успешно определенных классов сообщения, N – общая длина выборки.

Будем считать, что метод k ближайших соседей работает эффективно, если $\lim_{N\to\infty}\left|P^* - P_{пр}\right| \to 0$, где $P_{пр}$ — теоретическая вероятность правильного распознавания сигнала [11,12]:

$$P_{пр} = 0{,}5 + \sqrt{1/2\pi}\int_0^{\bar{R}_{\tilde{z}}/2} e^{-t^2/2}\,dt\,, \qquad (1)$$

где $\bar{R}_{\tilde{z}}$ – соотношение сигнал/шум для каналов

1 Троицкий Игорь Иванович, кандидат технических наук, доцент, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, iitroickiy@mail.ru
2 Якубов Рустам Жафарович, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, yakubov_rustam@inbox.ru

передачи данных. Выражение (1) верно для дискретного сигнала, принимающего два значения.

Исходная модель:

$$\begin{cases} y = \dfrac{a}{2}\eta + \varepsilon + \xi \\ x = \delta + \mathrm{h} \cdot \xi \end{cases} \tag{2}$$

где

$\varepsilon, \eta, \delta, \xi$ – случайные величины,

$$\eta = \begin{cases} 1, \text{с вероятностью } 0{,}5 \\ -1, \text{с вероятностью } 0{,}5 \end{cases};$$

$\varepsilon \sim N(0, \sigma_\varepsilon^2)$- шум в первом канале, $\delta \sim N(0, \sigma_\delta^2)$ - шум во втором канале, ε и δ статистически взаимосвязаны, $r_{\varepsilon,\delta}$ — их коэффициент корреляции;

$\xi \sim N(0, \sigma_\xi^2)$ – общий шум в каналах, h – константа;

η и ξ – случайные величины, независимые от ε и δ, и от друг друга;

ε и δ – естественные шумы, присутствующие в каналах передачи данных,

ξ – шум, появляющийся в каналах передачи данных при определенных технических условиях;

$a = |m_1 - m_{-1}|$ - дискретный сигнал;

$N(m, \sigma^2)$ – нормальный закон распределения с параметрами (m, σ^2).

Условные плотности распределения вероятностей $P\left({}^{y}/_{\eta = 1}\right)$, $P\left({}^{y}/_{\eta = -1}\right)$ имеют нормальный закон распределения с соответствующими параметрами $N(m_1, \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2)$ и $N\ (m_{-1}, \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2)$.

Данная модель используется для определения вероятности распознавания сигнала методом k ближайших соседей. Отметим, что модель, рассматриваемая в работе [12], отличалась отсутствием шума ξ.

Определение теоретической вероятности распознавания сигнала предлагается проводить с помощью механизма компенсации шума [12, 13].

Механизм компенсации шума

В основе механизма компенсации шума лежит решение задачи выбора функции взаимосвязи центрированных случайных величин $\mathring{y}$ и $\mathring{x}$, где

$$\mathring{y} = \frac{a \cdot \eta}{2 \cdot \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}} + \frac{\varepsilon + \xi}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}}, \quad \mathring{x} = \frac{\delta + \mathrm{h} \cdot \xi}{\sqrt{\sigma_\delta^2 + \mathrm{h}^2 \cdot \sigma_\xi^2}} \tag{3}$$

Для упрощения расчетов введем следующие обозначения:

$$\mathring{\alpha} = \frac{\varepsilon + \xi}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}}, \quad \mathring{\beta} = \frac{\delta + \mathrm{h} \cdot \xi}{\sqrt{\sigma_\delta^2 + \mathrm{h}^2 \cdot \sigma_\xi^2}} \tag{4}$$

Так как линейная комбинация нормально распределенных случайных величин имеет нормальное распределение [14], для компенсации шума целесообразно рассматривать случайную величину $\mathring{z}$ [12]:

$$\mathring{z} = \mathring{y} + c\mathring{x} = \frac{a \cdot \eta}{2 \cdot \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}} + \mathring{\alpha} + \mathrm{c} \cdot \mathring{\beta}, \tag{5}$$

где с – неизвестный параметр.

Определим дисперсию и условное математическое ожидание случайной величины $\mathring{z}$:

$$M\left[{}^{\mathring{z}}/_{\eta = 1}\right] = \frac{a}{2 \cdot \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}},$$
$$M\left[{}^{\mathring{z}}/_{\eta = -1}\right] = -\frac{a}{2 \cdot \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}}. \tag{6}$$

$$D[\mathring{z}] = D\left[\frac{a}{2 \cdot \sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}}\eta + \mathring{\alpha} + \mathrm{c} \cdot \mathring{\beta}\right] =$$
$$= D[\mathring{\alpha}] + \mathrm{c}^2 \cdot D[\mathring{\beta}] + 2 \cdot c \cdot r_{\alpha,\beta} \tag{7}$$

Определим $r_{\alpha,\beta}$:

$$r_{\alpha,\beta} = cov(\mathring{\alpha}, \mathring{\beta}) = M(\mathring{\alpha} \cdot \mathring{\beta}) =$$
$$= \frac{M(\varepsilon \cdot \delta) + \mathrm{h} \cdot M(\xi^2)}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2} \cdot \sqrt{\sigma_\delta^2 + \mathrm{h}^2 \cdot \sigma_\xi^2}} \tag{8}$$

Поскольку

$$M[\xi^2] = D[\xi] + (M[\xi])^2 = D[\xi] = \sigma_\xi^2 \tag{9}$$

$$M[\varepsilon \cdot \delta] = cov(\varepsilon, \delta) + M[\varepsilon] \cdot M[\delta] = r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta \tag{10}$$

$r_{\alpha,\beta}$ можно представить в виде:

$$r_{\alpha,\beta} = \frac{r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta + \mathrm{h} \cdot \sigma_\xi^2}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2} \cdot \sqrt{\sigma_\delta^2 + \mathrm{h}^2 \cdot \sigma_\xi^2}} \tag{11}$$

Следовательно, отношение сигнал/шум:

$$R_z = \frac{a}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}\sqrt{1 + c^2 + 2 \cdot c \cdot r_{\alpha,\beta}}} \tag{12}$$

R_z является функцией от c. На основании работы [12], R_z принимает наибольшее значение при $c = -r_{\alpha,\beta}$, следовательно, можно представить R_z в следующем виде:

$$\widehat{R_z} = \frac{a}{\sqrt{\sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\xi^2}\sqrt{1 - {r_{\alpha,\beta}}^2}} \tag{13}$$

$$\widehat{R_z} = \frac{a}{\sqrt{\frac{\sigma_\xi^2 \cdot \left(h^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot h \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta\right) + \sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2\right)}{\sigma_\delta^2 + h^2 \cdot \sigma_\xi^2}}} \tag{14}$$

Подставив выражение (14) в формулу (1), можно вычислить теоретическую вероятность распознавания сигнала. Проанализируем поведение R_z для двух случаев: $\sigma_\xi \to \infty$ и $\sigma_\xi \to 0$.

$$\lim_{\sigma_\xi \to \infty} \widehat{R_z} = \frac{a \cdot h}{\sqrt{h^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot h \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta}} \tag{15}$$

$$\lim_{\sigma_\xi \to 0} \widehat{R_z} = \frac{a}{\sqrt{\frac{\sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2\right)}{\sigma_\delta^2}}} = \frac{a}{\sigma_\varepsilon \sqrt{1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2}} \tag{16}$$

Определим характер зависимости $\widehat{R_z}$ от изменения σ_ξ. Продифференцируем $\frac{\partial \widehat{R_z}}{\partial \sigma_\xi}$:

$$\frac{\partial \widehat{R_z}}{\partial \sigma_\xi} = \frac{a \cdot h^2 \cdot \sigma_\xi \cdot \left(\sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2\right)\right) - a \cdot \sigma_\xi \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(h^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot h \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta\right)}{\sqrt{\sigma_\delta^2 + h^2 \cdot \sigma_\xi^2} \cdot \left(\sqrt{\sigma_\xi^2 \cdot \left(h^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot h \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta\right) + \sigma_\varepsilon^2 \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2\right)}\right)^3} \tag{17}$$

Знак $\frac{\partial \widehat{R_z}}{\partial \sigma_\xi}$ зависит от знака числителя:

$$a \cdot h^2 \cdot \sigma_\xi \cdot q - a \cdot p \cdot \sigma_\xi \cdot \sigma_\delta^2 = -\sigma_\xi \cdot \sigma_\delta^2 \cdot \left(h \cdot \sigma_\varepsilon \cdot r_{\varepsilon,\delta} - \sigma_\delta\right)^2 < 0 \Rightarrow$$

При увеличении σ_ξ отношение R_z уменьшается.

Сравним $\lim_{\sigma_\xi \to 0} \widehat{R_z}$ и $\lim_{\sigma_\xi \to \infty} \widehat{R_z}$.

$$\frac{a}{\sigma_\varepsilon \sqrt{1 - {r_{\varepsilon,\delta}}^2}} \vee \frac{a \cdot h}{\sqrt{h^2 \cdot \sigma_\varepsilon^2 + \sigma_\delta^2 - 2 \cdot h \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta}} \Rightarrow$$

$$\sigma_\varepsilon^2 \cdot {r_{\varepsilon,\delta}}^2 - \frac{2 \cdot r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon \cdot \sigma_\delta}{h} + \frac{\sigma_\delta^2}{h^2} \vee 0 \Rightarrow \tag{18}$$

$$\left(r_{\varepsilon,\delta} \cdot \sigma_\varepsilon - \frac{\sigma_\delta}{h}\right)^2 \geq 0 \Rightarrow \lim_{\sigma_\xi \to 0} \widehat{R_z} > \lim_{\sigma_\xi \to \infty} \widehat{R_z}.$$

На (рис.1) продемонстрирована зависимость отношения $\widehat{R_z}$ от среднеквадратичного отклонения шума σ_ξ ($b = \lim_{\sigma_\xi \to 0} \widehat{R_z}$, $a = \lim_{\sigma_\xi \to \infty} \widehat{R_z}$):

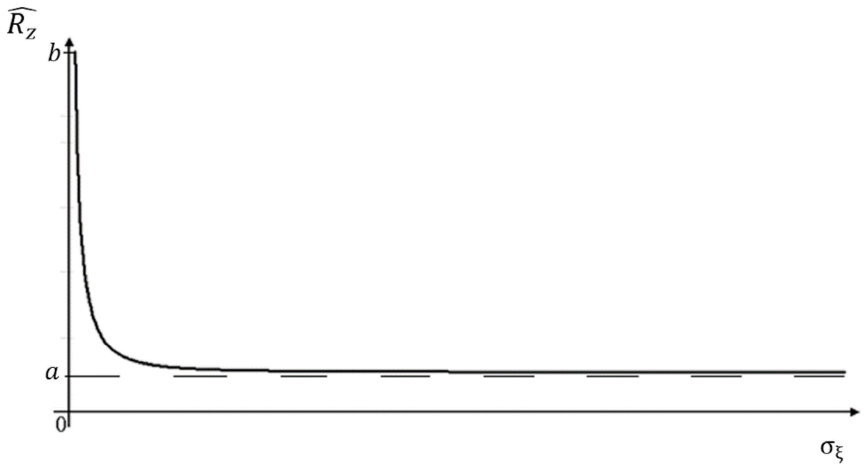

Рис.1. *Зависимость отношения сигнал/шум от* ξ

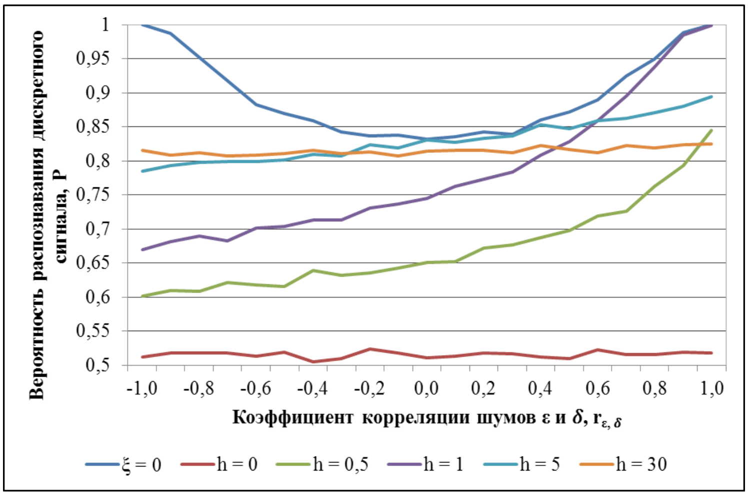

Рис.2. Исследование влияния общего шума ξ на распознавание сигнала в каналах X и Y методом k ближайших соседей

Эксперименты

Для исследования метода k ближайших соседей и механизма компенсации шума был проведен ряд экспериментов, позволяющих выявить влияние различных факторов на распознавание сигналов. Эксперименты проводились на основе моделей (2) и (5).

Целью экспериментов являлось выявление зависимости вероятности распознавания передаваемого дискретного сигнала от изменения коэффициента корреляции шумов ε и δ и коэффициента h.

При исследовании коэффициент корреляции ε и δ принимал значения от -1 до 1 с шагом 0.1. Было проанализировано изменение вероятности распознавания дискретного сигнала при варьировании коэффициента h. Среднеквадратическое отклонение величины ξ значительно больше среднеквадратичного отклонения ε и δ. Учитывая результаты, достигнутые в ходе работы [10], количество учитываемых ближайших соседей k = 13. Данное значение позволяет достичь оптимального соотношения качества распознавания сигнала и вычислительных затрат.

Для наглядности графически представлены теоретические результаты распознавания (значение $P_{пр}$), а также данные, полученные при использовании метода k ближайших соседей для (5), характеризуемой наиболее высоким соотношением сигнал/шум (что было доказано выше).

Исходя из полученных результатов, представленных на (рис.2), можно определить, что наличие в каналах передачи данных шума ξ отрицатель-

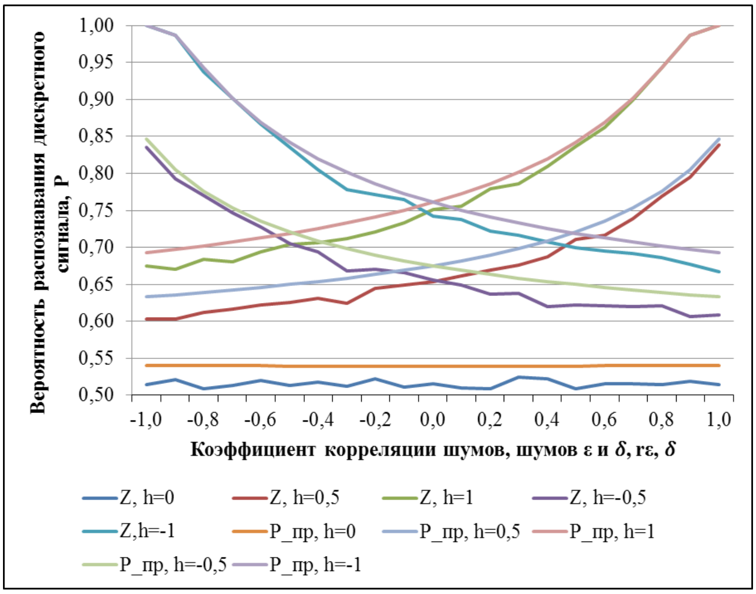

Рис.3. Сравнительная характеристика распознавания сигнала в канале Z методом k ближайших соседей и $P_{пр}$

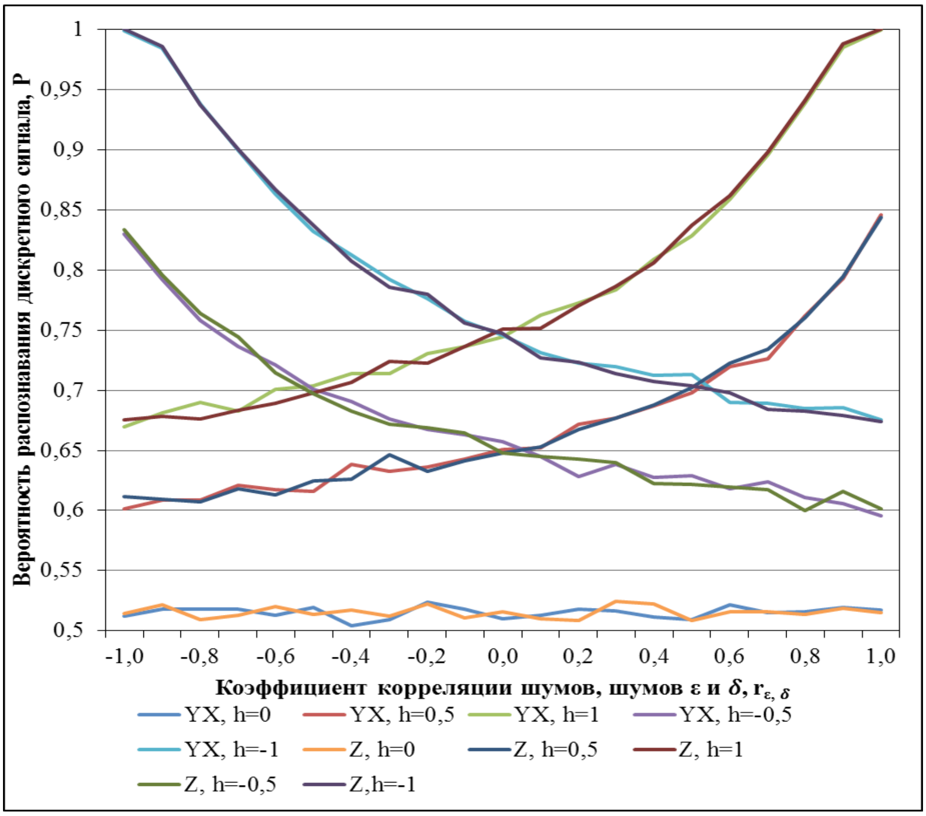

***Рис.4.** Сравнительная характеристика распознавания сигнала методом k ближайших соседей для каналов X,Y и Z*

но сказывается на распознавании дискретного сигнала. Наилучших результатов распознавания можно достичь при величине коэффициента h=1 и коэффициенте корреляции $r_{\varepsilon,\delta} = 1$. При $h \gg 1$ вероятность распознавания сигнала усредняется для различных значений коэффициента корреляции, и приближается к 0.8.

На (рис.3) приведены результаты работы алгоритма k ближайших соседей для модели (5), а также теоретическая вероятность распознавания сигнала для соответствующих параметров $P_{пр}$. Как видно из графиков, метод k ближайших соседей работает наилучшим образом при приближении коэффициента корреляции $r_{\varepsilon,\delta}$ к $|1|$.

На (рис.4) представлены данные, позволяющие сравнить вероятность распознавания с использованием метода k ближайших соседей в случае двух каналов X,Y и одного канала, представляемого случайной величиной *Z*.

Выводы

В ходе данной работы с использованием имитационного моделирования и математической статистики были исследованы метод k ближайших соседей и модель каналов передачи данных (2). Полученные результаты позволяют дать высокую оценку эффективности методу k ближайших соседей, как методу распознавания дискретного сигнала, при его передаче по каналам связи с присутствующими шумами.

Использование данного метода позволило достичь высокой, приближенной к верхней, «теоретической», границе, вероятности распознавания сигнала P. По результатам эксперимента можно говорить о значительном влиянии коэффициента корреляции между шумами на распознавание сигнала. Кроме того, шум ξ в каналах значительно снижает P, при этом его влияние можно контролировать за счет варьирования коэффициента h.

***Рецензент:** Басараб Михаил Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Информационная безопасность» МГТУ им. Н.Э. Баумана, bmic@mail.ru*

Литература

1. Горелик А.Л., Скрыпник В.А. Методы распознавания. М.: Высшая школа, 1989. 232 с.
2. Даджион Д., Мерсеро Р. Цифровая обработка многомерных сигналов. Пер. с англ. М.: Мир, 1988. 488 с.
3. Малла С. Вейвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. М.: Мир, 2005. 671 с.:
4. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. М.: Солон-Пресс, 2009. 247 с.
5. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. 2-е изд. СПб: Питер, 2002. 606 с.

6. Шахтарин Б.И. Случайные процессы в радиотехнике: учебное пособие для вузов. Т.1. Линейные преобразования. М.: Горячая линия-Телеком, 2010. 518 с.
7. Тихонов В.И., Шахтарин Б.И., Сизых В.В. Случайные процессы. Примеры и задачи. Том 5 - Оценка сигналов, их параметров и спектров. Основы теории информации: учебное пособие для вузов. 2-е изд., стереотип. М.: Горячая линия-Телеком, 2012. 400 с.
8. Перов А.И. Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.
9. Джиган В.И. Адаптивная фильтрация сигналов. Теория и алгоритмы. М: Техносфера, 2013. 527 с.
10. Якубов Р.Ж. Двумерное распознавание сигнала на основе метода k ближайших соседей // Молодежный научно-технический вестник. 2015. № 7. С. 40.
11. Дуда Р., Харт П. Распознавание образов и анализ сцен. М.: Мир, 1976. 509 с.
12. Троицкий И.И., Басараб М.А., Матвеев В.А. Использование двух каналов передачи информации для решения задачи распознавания дискретного сигнала в аддитивном шуме // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 4 (103). С. 106-112.
13. Троицкий И.И., Матвеев В.А. К вопросу об использовании двух каналов передачи информации для решения задачи распознавания дискретного сигнала в аддитивном шуме // Теоретические и прикладные аспекты современной науки. 2014. № 2-1. С. 103-105.
14. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Радио и связь, 1989. 656 с.

RECOGNITION OF A DISCRETE SIGNAL IN THE ADDITIVE NOISE FOR TWO DATA TRANSMISSION CHANNELS

I. Troitskii[3], R.Yakubov[4]

Abstract. *The method is based on the correlation of noises in the data transmission channels. To compensate for the noise, the problem of selecting a linear function for the noise interaction is solved and its parameter is defined based on the signal/noise maximum. A discrete useful signal is contained in only one of the channels. Unwanted sounds that occur during transmission of the information are modelled by the input of linear combinations of normal random variables that are statistically related. This allows for defining theoretical (i.e. upper) limit of the signal recognition probability by analytical definition of the signal/noise ratio. The work defines signal/noise ratio for the channels, provides a model of the resulting channel, which is a linear combination of references, with parameters that allow achieving maximum signal/ noise ratio. The experiments were held using k-nearest neighbour algorithm, which has certain advantages, such as simplicity of implementation, high efficiency, and possibility to vary the number of neighbours taken into account during classification. The work graphically represents the influence of the change in certain parameters of a mathematical model on the probability of signal recognition, and compares the signal recognition, when there are two data transmission channels, resulting channel with optimum noise compensation factor and probability integral, which allows defining theoretical probability of recognition. This work allows analysing the submitted data transmission model from the point of view of influence of the channel interconnection on the signal recognition and seeing visual proof of k-nearest neighbour algorithm efficacy.*

Keywords: *signal recognition, signal-to-noise ratio, integral of probability of recognition, correlation coefficient, computer modeling, statistics*

References

1. Gorelik A.L., Skrypnik V.A. Metody raspoznavaniya. M.: Vysshaya shkola, 1989. 232 P.
2. Dadzhion D., Mersero R. Tsifrovaya obrabotka mnogomernykh signalov. Per. s angl. M.: Mir, 1988. 488 P.
3. Malla S. Veyvlety v obrabotke signalov. Per. s angl. M.: Mir, 2005. 671 P.
4. Afonskiy A.A., D'yakonov V.P. Tsifrovye analizatory spektra, signalov i logiki. M.: Solon-Press, 2009. 247 P.
5. Sergienko A.B. Tsifrovaya obrabotka signalov. 2-e izd. SPb: Piter, 2002. 606 P.
6. Shakhtarin B.I. Sluchaynye protsessy v radiotekhnike: uchebnoe posobie dlya vuzov. T.1. Lineynye preobrazovaniya. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2010. 518 P.
7. Tikhonov V.I., Shakhtarin B.I., Sizykh V.V. Sluchaynye protsessy. Primery i zadachi. Tom 5 - Otsenka signalov, ikh parametrov i spektrov. Osnovy teorii informatsii: uchebnoe posobie dlya vuzov. 2-e izd., stereotip. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2012. 400 P.
8. Perov A.I. Statisticheskaya teoriya radiotekhnicheskikh sistem. M.: Radiotekhnika, 2003. 400 P.
9. Dzhigan V.I. Adaptivnaya fil'tratsiya signalov. Teoriya i algoritmy. M: Tekhnosfera, 2013. 527 P.
10. Yakubov R.Zh. Dvumernoe raspoznavanie signala na osnove metoda k blizhayshikh sosedey, Molodezhnyy nauchno-tekhnicheskiy vestnik. 2015. No 7, pp. 40.
11. Duda R., Khart P. Raspoznavanie obrazov i analiz stsen. M.: Mir, 1976. 509 P.
12. Troitskiy I.I., Basarab M.A., Matveev V.A. Ispol'zovanie dvukh kanalov peredachi informatsii dlya resheniya zadachi raspoznavaniya diskretnogo signala v additivnom shume, Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N.E. Baumana. Seriya: Priborostroenie. 2015. No 4 (103), pp. 106-112.
13. Troitskiy I.I., Matveev V.A. K voprosu ob ispol'zovanii dvukh kanalov peredachi informatsii dlya resheniya zadachi raspoznavaniya diskretnogo signala v additivnom shume, Teoreticheskie i prikladnye aspekty sovremennoy nauki. 2014. No 2-1, pp. 103-105.
14. Levin B.R. Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. 3-e izd., pererab. i dop. M.: Radio i svyaz', 1989. 656 P.

---

3 Igor Troitskii, Ph.D, Associated Professor, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, iitroickiy@mail.ru
4 Rustam Yakubov, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, yakubov_rustam@inbox.ru