

6. Барсегян А. А., Куприянов М. С., Степаненко В. В., Холод П. П. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 336 с.

References

1. Starzhinskaya N. V., Chernova A. I. Eksploatatsionnaya nadezhnost' beregovoradiooborudovaniya suchetom primeneniya ZIP dlya vosstanovleniya rabotosposobnosti Transportnoedelo Rossii. *Morskije vesti Rossii*, № 3, 2019, str. 129-132.
2. Sarychev D. S., Snezhko V. V. Telemetriya v geoinformatsionnoy sisteme elektricheskikh setey *Vestnik Tomskogo gos. un-ta*, № 1, 2006, str. 284-289.
3. Kopkin E. V., Kobzarev I. M. Model' ob"ekta analiza tekhnicheskogo sostoyaniya pri ispol'zovanii neprevyvnkh normal'no raspredelennykh diagnosticheskikh priznakov *Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti*, № 2, 2018, str. 69-83. URL: <http://scs.telgr.com/archive/2018-02/05-Kopkin.pdf> (data obrashcheniya 10.03.2021).
5. Fomin Ya. A. Diagnostika krizisnogo sostoyaniya predpriyatiya: Ucheb. posobie dlya vuzov. M.: YuNITI-DANA, 2003, 349 s.
6. Marinich A. N., Pripotnyuk A. V., Ustinov Yu. M., Kan V. S., Bezumov A. V., Sokach O. L. *Sovremennye sudovye i beregovye radiolokatsionnye stantsii (radary) otechestvennykh i zarubezhnykh firm: monografiya*. Petropavlovsk-Kamchatskiy: Kamchat GTU, 2012, 166 s.
7. Barsegyan A. A., Kupriyanov M. S., Stepanenko V. V., Kholod I. I. *Metody i modeli analiza dannykh: OLAP i Data Mining*. SPb.: BKhV-Peterburg, 2004, 336 s.

УДК 621.396.932 : 621.396.669
DOI: 10.34046/aumsuomt100/23

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕТОДОВ СГЛАЖИВАНИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

*Е.Е. Проzorovskiy, доктор технических наук, профессор
Ю.В. Редькин, кандидат технических наук, доцент*

В статье рассмотрено применение методов сглаживания телекоммуникационных сигналов, искаженных шумом при передаче по каналам радиосвязи. Промоделировано сглаживание сигналов при разных значениях отношения сигнал-шум и ширины окна сглаживания. Определена оптимальная ширина окна сглаживания и максимальный коэффициент подавления как функция уровня входного шума. Сравнение результатов показало, что наиболее эффективные методы сглаживания основаны на взвешивании отсчетов сигнала с помощью функции Гаусса и скользящего усреднения. При этом, метод скользящего усреднения более прост в реализации и использовании.

Ключевые слова: телекоммуникационная система, зашумленный сигнал, цифровая фильтрация, метод сглаживания, ошибка сглаживания.

SIMULATION OF TELECOMMUNICATION SIGNAL SMOOTHING METHODS

E.E. Prozorovskiy, Y.V. Redkin

The article discusses the use of methods for smoothing telecommunication signals distorted by noise during transmission over radio communication channels. Signal smoothing is simulated for different values of the signal-to-noise ratio and the width of the smoothing window. The optimal width of the smoothing window and the maximum pressure coefficient were determined as a function of the input noise level. Comparison of the results showed that the most effective smoothing methods are based on weighting signal samples using a Gaussian function and a moving averaging. Moreover, the moving averaging method is easier to implement and use.

Key words: telecommunication system, noisy signal, digital filtering, smoothing method, smoothing error.

В настоящее время наблюдается быстрый рост объемов информации, подлежащей передаче с помощью различных систем связи. Вследствие этого имеет место интенсивное развитие беспроводных информационных сетей в том числе для связи с морскими судами.

Характерной особенностью радиоканалов, используемых в беспроводных системах обмена данными с морскими судами, является наличие разнообразного рода помех естественного (атмосферных) и искусственного (от промышленного электрооборудования) происхождения [1, 2]. Так, в зависимости от используемого диапазона волн,

источниками помех являются: атмосферные шумы, замирания, помехи от радиостанций, работающих в том же диапазоне волн, судового радио- и электрооборудования и другого оборудования, функционирующего на объектах телекоммуникационной системы. При этом, из-за поглощения и рассеивания радиоволн заметно влияние даже относительно слабых по мощности помех.

Вследствие этого, передача данных по сетям связи с морскими судами характеризуется значительными искажениями принимаемых сигналов, в частности, из-за действия на канал пере-

дачи шумов различного рода. Поэтому, при внедрении телекоммуникационных систем для автоматического обмена данными с судами особое внимание уделяется чистоте сигнала на выходе канального приемника. Необходимое качество сигнала достигается применением ряда технологий, одной из которых является очистка (фильтрация) принимаемых сигналов с помощью разнообразных программно-аппаратных средств.

На сегодняшний день известно множество способов обработки сигналов телекоммуникационных систем, позволяющих в той или иной степени снизить уровень шумов и помех разного рода, тем самым повышая достоверность приема информации [3]. Стандартным методом обработки канальных сигналов систем передачи данных считается фильтрация, выполняемая с помощью цифровых фильтров [4, 5].

Наиболее часто целью обработки телекоммуникационных сигналов с помощью цифровых фильтров является подавление в них быстрых вариаций, которые чаще всего обусловлены шумом. В результате из быстроизменяющейся последовательности отсчетов сигнала получается другая последовательность, в которой доминируют более низкочастотные составляющие. Такой процесс обработки отсчетов сигнала, называемый сглаживанием, является одним из наиболее простых и эффективных методов очистки сигналов от шумов в канале передачи, являясь по своей сути разновидностью низкочастотной цифровой фильтрации сигналов [3].

Известные методы сглаживания сигналов, как правило, применяют при обработке экспериментальных данных с целью избавиться от шумовой составляющей, неизбежно присутствующей в результатах измерений [6]. При этом, отношение мощности шума к мощности полезного сигнала невелико. Представляет интерес оценить эффективность применения известных методов сглаживания применительно к задаче подавления шума в сигналах телекоммуникационных систем, где отношение мощностей шум-сигнал может быть достаточно велико.

Рассмотрим и оценим эффективность известных методов сглаживания сигналов систем связи на примере нескольких фильтров, часто используемых на практике и реализованных в популярном пакете обработки данных – *MathCAD/Prime* [7]. Пакет *MathCAD/Prime* имеет несколько встроенных функций сглаживания, позволяющих эффективно выполнять фильтрацию сигналов путем их усреднения, отличаю-

щихся реализуемым методом усреднения и возможностью настройки параметров усреднения. Из них наиболее эффективной, обеспечивающей наилучшее подавление шума, считается функция *ksmooth*, а наиболее простой – скользящее усреднение.

Оценим качество подавления шума, аддитивно воздействующего на полезный сигнал, с помощью этих функций. Сравнить эффективность разных методов удобнее и нагляднее на примере обработки видеосигнала, задаваемого отсчетами функции, имитирующей отклик приемника на полезный сигнал, например, вида:

$$y_i = \sin(x_i)^2, \quad (1)$$

где $x_i = \varphi \cdot i$ – аргумент функции, причем $\varphi = 0,01\pi$, а $i = 0, 1, \dots, 99$.

В качестве помехи, искажающей полезный сигнал y_i , будем использовать нормально распределенный шум η с нулевым средним значением μ и среднеквадратичным отклонением равным величине σ от максимального значения отсчетов полезного сигнала y_i на рассматриваемом интервале аргумента i :

$$\eta = rnorm(n, \mu, \sigma). \quad (2)$$

При этом будем полагать, что на входе приемника присутствует аддитивная смесь $y\eta$ полезного сигнала y и шума η :

$$y\eta = y + \eta, \quad (3)$$

представленная своими отсчетами в виде вектора длиной N .

В качестве примера на рисунке 1 показан полезный сигнал y_i и сигнал $y\eta_i$, искаженный нормально распределенным шумом с $\sigma = 0,2$ и $\mu = 0$. Истинный относительный уровень шума, определяемый, как отношение длин векторов шума и полезного сигнала, при этом составляет $|\eta|/|y| = 0,325$.

Самый простой способ сглаживания сигнала, искаженного шумом, – это скользящее усреднение соседних отсчетов сигнала. Его суть состоит в расчете для каждого значения аргумента x_i среднего значения отсчетов $y\eta_i$ смеси сигнала и шума по ее b соседним отсчетам. Чем больше b (ширина окна усреднения), тем больше данных участвуют в расчете среднего значения, тем более сглаженный сигнал получается на выходе фильтра, но тем сильнее искажается сам сигнал [7]. Для реализации данного метода в *MathCAD/Prime* была разработана программа, выполняющая скользящее усреднение передаваемого в нее массива данных, представленная на рисунке 2.

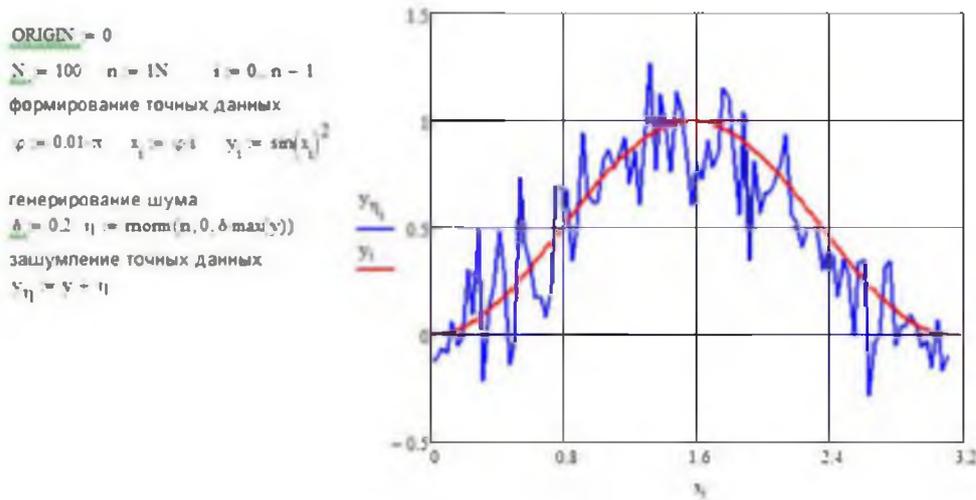


Рисунок 1 – Исходный сигнал y и сигнал y_{η} , искаженный шумом

```

ksmooth(x, y, w) :=
  wp ← trunc( w / 2 )
  N ← длина(x)
  for i ∈ 0..N - 1
    yi ← ( ∑j=i-wpN-1 yj ) / ( N - i + wp )  if i ≥ N - wp
    yi ← ( ∑j=i-wpi-wp yj ) / w  if N - wp > i ≥ wp
    yi ← ( ∑j=0i-wp yj ) / ( i + wp )  if i < wp
    
```

Рисунок 2 – Программа-функция скользящего усреднения массива данных

Приведенная на рисунке 2 программа-функция использует только отсчеты функции y_i , оформленные в виде вектора, полагая, что они соответствуют значениям ее аргумента x_i , взятым через одинаковые промежутки. Обращение к функции скользящего сглаживания имеет вид $rsmooth(x, y, b)$, где x, y – векторы длиной N , а b – ширина окна сглаживания.

В *MathCAD/Prime* имеется более сложный способ сглаживания сигнала, также основанный на усреднении соседних отсчетов сигнала, но взятых с определенными весами. Он реализован в функции $ksmooth$, которая вычисляет сглаженное значение отсчетов y_i сигнала по формуле:

$$Y_j^{KSM} = \frac{\sum_{i=1}^n h\left(\frac{t_i - t_j}{b}\right) \cdot y_i}{\sum_{i=1}^n h\left(\frac{t_i - t_j}{b}\right)} \quad (4)$$

где $i, j = 1, \dots, N$, а $h(t_i - t_j)$ является функцией Гаусса.

Обращение к функции $ksmooth$, реализующей соотношение (4), имеет вид $ksmooth(x, y, b)$, где x, y – вектора длиной N , содержащие значения x_i и y_i , а b – параметр, задающий степень сглаживания исходных данных. Чем больше величина параметра b , тем в большей степени сглаживаются исходные данные; считается, что значимые веса будут иметь отсчеты из интервала $[-1.5b; 1.5b]$, а всеми остальными отсчетами можно пренебречь [8].

Третьим способом сглаживания данных, реализованным в *MathCAD/Prime*, является так называемый медианный фильтр, позволяющий эффективно устранять аномальные отклонения усредняемых данных [8]. В медианном фильтре из N отсчетов смеси сигнала и шума выбирается b значений ($b=2L+1$), где b можно рассматривать

как апертуру медианного фильтра. Отсчеты сигнала, попавшие в апертуру, представляются в виде вариационного ряда, упорядочиваемый в виде последовательности:

$$Y_{i-L}, Y_{i-(L-1)}, \dots, Y_i, Y_{i+1}, \dots, Y_{i+L} \quad (5)$$

Выходным значением медианного фильтра будет значение, соответствующее y_i вариационного ряда. Перемещая апертуру по всем выборкам (отсчетам) обрабатываемого сигнала, получим усреднение его выборок и, тем самым, сглаживание шумовой составляющей смеси сигнала и шума.

Обращение к функции $medsmooth(v, b)$, реализующей соотношение (5), содержит такие па-

раметры, как v – вектор экспериментальных данных (отсчетов), и b – размер апертуры (нечетная величина).

Сравним эффективность сглаживания шума, искажающего полезный сигнал, с помощью описанных выше фильтров $rsmooth$, $ksmooth$ и $medsmooth$. При этом, в качестве критерия оценки эффективности будем рассматривать коэффициент подавления шума – изменение относительного уровня шума в смеси шума и полезного сигнала при его сглаживании.

На рисунке 3 приведены оценки результатов сглаживания, полученные путем усреднения 100 выборок полезного сигнала (1), искаженного нормально распределенным шумом (2).

ширина окон фильтров
 $b = 17$

сглаживание сигнала фильтрами
 $Y_{rsm} = rsmooth(x, y1, b)$ $Y_{ksm} = ksmooth(x, y1, b, \varphi)$ $Y_{msm} = medsmooth(y1, b)$

фактический уровень шума на входе фильтра
 $|n| = 20.083$ $|y| = 61.237$ $\frac{|n|}{|y|} = 0.328$

ошибки сглаживания
 $\frac{|Y_{rsm} - y|}{|y|} = 0.084$ $\frac{|Y_{ksm} - y|}{|y|} = 0.082$ $\frac{|Y_{msm} - y|}{|y|} = 0.106$

коэффициент подавления шума фильтрами
 $knr_{rsm} = \frac{|n|}{|Y_{rsm} - y|} = 3.881$ $knr_{ksm} = \frac{|n|}{|Y_{ksm} - y|} = 3.983$ $knr_{msm} = \frac{|n|}{|Y_{msm} - y|} = 3.101$

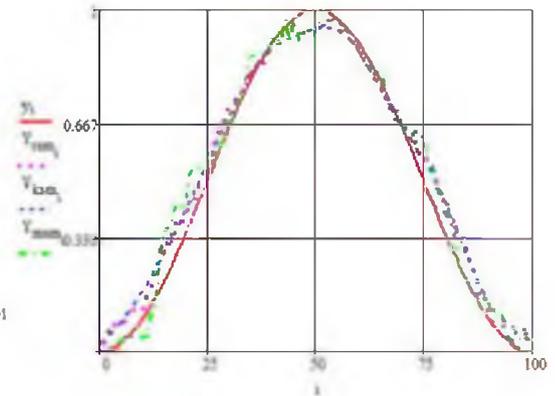


Рисунок 3 – Искаженный сигнал y и результаты Y его сглаживания фильтрами при $\sigma = 0,2$ и $b = 17$

Как следует из рисунка 3, результаты обработки искаженного сигнала (3) фильтрами $rsmooth$ и $ksmooth$ мало отличаются: оба фильтра обеспечивают примерно одинаковую ошибку сглаживания сигнала и, соответственно, близкие коэффициенты knr подавления шума (3.881 и 3.983 соответственно). Результат обработки смеси сигнала и шума с помощью фильтра $medsmooth$ хуже – уровень остаточного шума после фильтрации смеси заметно выше, а коэффициент подавления – ниже (3.101).

Зависимости, представленные на рисунке 3, получены при относительно небольшом значении уровня шума ($\sigma = 0,2$) и нешироком окне сглаживания ($b = 17$). Однако, при приеме телекоммуникационных сигналов уровень σ шума может составлять значительную величину. Поэтому, представляет интерес рассмотреть, как коэффициент knr подавления шума зависит от этих двух параметров для рассматриваемых фильтров.

цикл по параметру b (ширине окна)
 $i = 3, 5, 30$ $b_j = i$

сглаживание сигнала фильтрами
 $Y_{rsm_j} = rsmooth(x, y1, b_j)$ $Y_{ksm_j} = ksmooth(x, y1, b_j, \varphi)$ $Y_{msm_j} = medsmooth(y1, b_j)$

коэффициент подавления шума фильтрами
 $knr_{rsm_j} = \frac{|n|}{|Y_{rsm_j} - y|}$ $knr_{ksm_j} = \frac{|n|}{|Y_{ksm_j} - y|}$ $knr_{msm_j} = \frac{|n|}{|Y_{msm_j} - y|}$

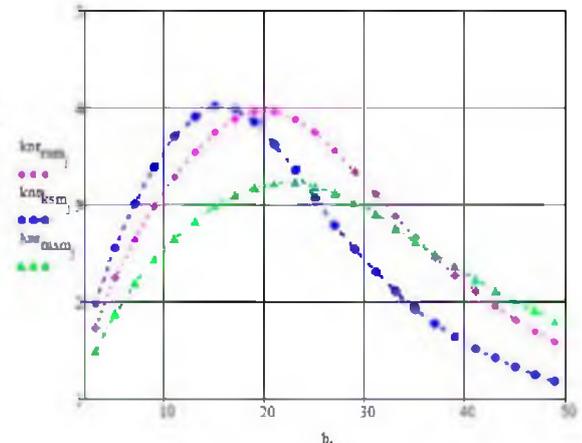


Рисунок 4 – Коэффициент подавления шума фильтрами при $\sigma = 0,2$ как функция ширины b окна сглаживания

Результаты расчета коэффициента knr подавления шума для рассматриваемых фильтров как функция параметра ширины окна b , представлен на рисунке 4. Из этого рисунка следует, что при заданном значении $\sigma = 0.2$ для каждого фильтра существует оптимальное значение b_{opt} ширины окна, при котором ошибка сглаживания минимальна. При значениях $b < b_{opt}$ наблюдается увеличение ошибки сглаживания за счет остаточного шума, а при $b > b_{opt}$ рост ошибки сглаживания обусловлен подавлением в полезном сигнале его быстрых изменений. Отметим, что в фильтре

$ksmooth$ экстремум функции коэффициента подавления выражен наиболее сильно (но требуется тщательная подборка ширины окна b), в фильтре $rsmooth$ он менее выражен, а коэффициент подавления фильтра $medsmooth$ изменяется наиболее плавно (но при этом и подавление шума на 25% ниже).

Представляет интерес оценить, как зависит ошибка сглаживания и, соответственно, коэффициент подавления шума при заданной ширине b окна от уровня входного шума фильтра. Данные зависимости, полученные для фильтров $rsmooth$, $ksmooth$ и $medsmooth$, представлены на рисунке 5.

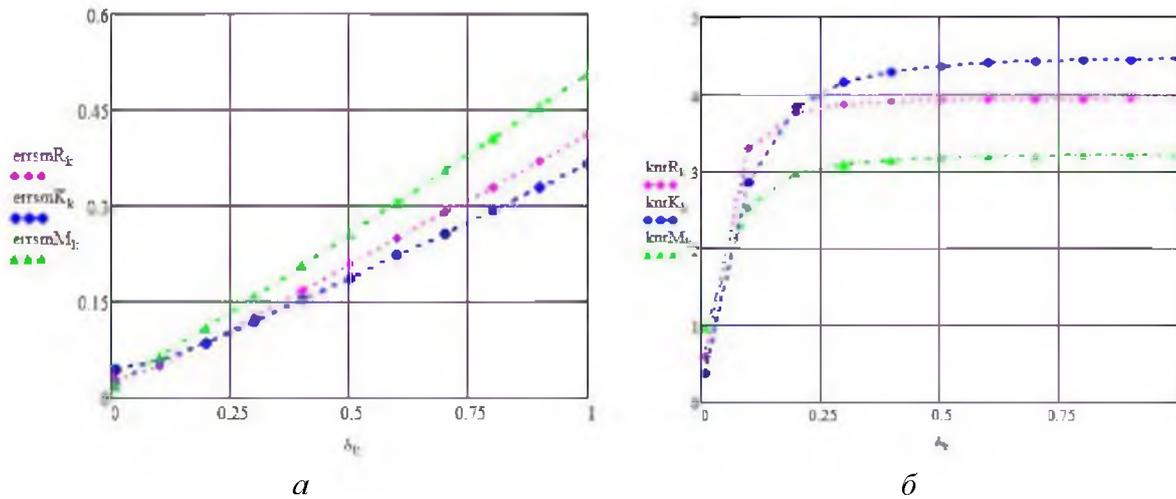


Рисунок 5 – Ошибка сглаживания (а) и коэффициент подавления (б) при $b=17$ как функция уровня σ входного шума

Как видно из рисунка 5, при заданном значении ширины окна сглаживания $b = 17$ при $\sigma > 0.2$ наблюдается практически линейный рост ошибки сглаживания. Вследствие этого, с ростом σ коэффициент подавления шума у всех рассматриваемых фильтров практически не изменяется. При этом, он максимален у фильтра $ksmooth$ и минимален у $medsmooth$ (на 25% ниже, чем у $ksmooth$).

Анализируя вид зависимостей, представленных на рисунках 4 и 5, можно сделать вывод, что при заданном уровне σ шума существует оптимальное значение b_{opt} ширины окна, при котором достигается максимальный коэффициент его подавления. Данные зависимости, полученные путем поиска экстремума коэффициентов knr подавления для фильтров $rsmooth$, $ksmooth$ и $medsmooth$, представлены на рисунке 6.

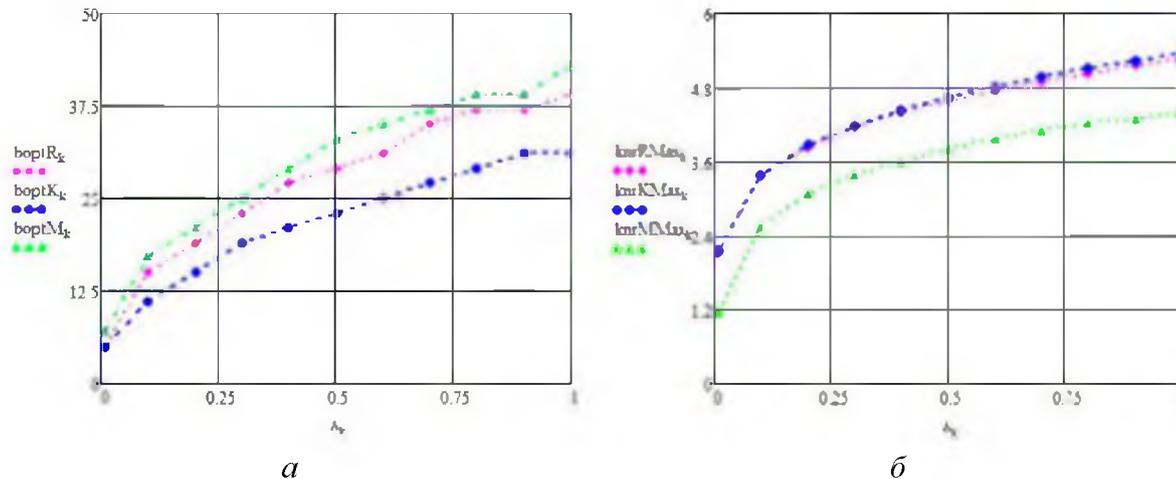


Рисунок 6 – Оптимальная ширина окна сглаживания (а) и максимальный коэффициент подавления (б) как функция уровня σ входного шума

Полученные результаты моделирования методов сглаживания смеси полезного сигнала и шума при различных параметрах сигналов и сглаживающих фильтров позволяют сделать следующие выводы.

Для заданного значения уровня σ шума существует оптимальное значение ширины b_{opt} окна сглаживания, при котором достигается максимальное значение коэффициента knr подавления шума. Отметим, что оптимальное значение b_{opt} , обеспечивающее максимальное значение коэффициента knr подавления шума, нелинейно увеличивается с ростом уровня σ входного шума фильтра.

Максимальные коэффициенты подавления шума, обеспечиваемые при этом фильтрами $ksmooth$ и $rsmooth$, близки по величине, но достигаются при различных значениях b_{opt} (у фильтра $rsmooth$ оптимальная ширина окна в 1,25 раза больше). Максимальное подавление шума с помощью медианного фильтра требует еще большего значения b_{opt} но обеспечиваемый при этом коэффициент подавления минимален.

Таким образом, имея оценку уровня шума, искажающего полезный сигнал, можно подобрать оптимальную ширину окна сглаживания фильтра, обеспечивая при этом максимальное подавление мешающего шума (до 5-6 раз) для любого сглаживающего фильтра (из рассмотренных). Из них наибольший коэффициент подавления обеспечивают фильтры $ksmooth$ и $rsmooth$. При этом, первый обладает наименьшей оптимальной шириной окна, но требует ее тщательного подбора. Полученный результат позволяет обеспечить адаптивную обработку сигналов телекоммуникационных систем в зависимости от текущей помеховой обстановки и тем самым обеспечить максимальную достоверность приема данных с помощью достаточно простых программно-аппаратных средств.

Литература

1. Апорович А.Ф., Чердынцев В.А. Радиотехнические системы передачи информации. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 214с.: ил.

2. Бьяляски П., Ингрэм Д. Цифровые системы передачи: Пер. с англ. / Под ред. А.А. Визеля. – М.: Связь, 1980. – 360 с. : ил.
3. Степанов А.В., Матвеев С.А. Методы компьютерной обработки сигналов систем радиосвязи. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 208 с. : ил.
4. Васильев В.П. Основы теории и расчета цифровых фильтров / В.П. Васильев, Э.Л. Муро, С.М. Смольский: под. ред. С.М. Смольского. – 2-е изд., стереотип. – М.: ИНФРА-М, 2018. – 272 с. : ил.
5. Денисенко А.Н. Цифровые сигналы и фильтры. – М.: ИД МЕДПРАКТИКА-М, 2008. – 188 с. : ил.
6. Троян В.Н., Киселев Ю.В. Анализ и обработка данных. – СПб.: Изд-во С.-Петерб. Ун-та, 2010. – 580 с. : ил.
7. Кирьянов Д. В. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с. : ил.
8. Воскобойников Ю.Е., Задорожный А.Ф. Основы моделирования и программирования в пакете MathCAD. – 2-е изд., стереотип. – СПб.: Издательство Лань, 2018. – 224 с. : ил.

REFERENCES

1. Aporovich A.F., Cherdynceva V.A. Radiotekhnicheskie sistemy peredachi informatsii. – Minsk: Vysheyschaya shkola, 1985. – 214s.: il.
2. Bylyanski P., Ingrem D. Tsifrovyye sistemy peredachi: Per. s angl. / Pod red. A.A. Vizelya. – M.: Svyaz, 1980. – 360s. : il.
3. Stepanov A.V., Matveev S.A. Metody komp'yuternoy obrabotki signalov sistem radiosvyazi. – M: Solon-Press, 2003. – 208 s. : il.
4. Vasil'ev V.P. Osnovy teorii i rascheta tsifrovyykh fil'trov / V.P. Vasil'ev, E.L. Muro, S.M. Smol'skiy: pod. red. S.M. Smol'skogo. – 2-e izd., stereotip. – M.: INFRA-M, 2018. – 272s. : il.
5. Denisenko A.N. Tsifrovyye signaly i fil'try. – M.: ID MEDPRAKTIKA-M, 2008. – 188s. : il.
6. Troyan V.N., Kiselev Yu.V. Analiz i obrabotka dannykh. – SPb.: Izd-vo S.-Peterb. Un-ta, 2010. – 580s. : il.
7. Kir'yanov D. V. Mathcad 15 / Mathcad Prime 1.0. – SPb.: BKhV-Peterburg, 2012. – 432 s. : il.
8. Voskoboynikov Yu.E., Zadorozhnyy A.F. Osnovy modelirovaniya i programmirovaniya v pakete MathCAD. – 2-e izd., stereotip. – SPb.: Izdatel'stvo Lan', 2018. – 224 s. : il.

УДК 681.3.001:518.5

DOI: 10.34046/aumsuomt100/24

ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА МОДИФИЦИРОВАННОГО ШИФРА ФЕЙСТЕЛЯ С ИНВОЛЮТИВНОЙ КВАТЕРНИОННОЙ МАТРИЦЕЙ

Е.И. Духнич, доктор технических наук
Д.А. Демищенко

В данной статье описывается сравнение алгоритмов шифрования, основанных на построении шифра Фейстеля, повышение его эффективности с применением кватернионной инволютивной матрицы. Приведены результаты теста случайностей.