

ОПТИМИЗАЦИЯ МЕТОДОВ РОБАСТНОЙ ОБРАБОТКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОСТЫХ КРИТЕРИЕВ В КОНЦЕПЦИИ БАЙЕСОВСКОГО ПОДХОДА

В.И. Неволин, Д.В. Иванеев

Рассматриваются вопросы оптимизации методов робастной обработки радиолокационных сигналов с использованием простых критериев принятия решений. Эти методы улучшают параметры робастных структур, которые в свою очередь позволяют повысить помехоустойчивость в радиотехнических системах на фоне мощных аддитивных помех. Приводится численное математическое моделирование нелинейной робастной системы обнаружения сигналов. На основе анализа полученных результатов устанавливается факт, что использование простых критериев в концепции байесовского подхода незначительно повышает помехоустойчивость робастных методов. Однако простота использования таких критериев позволяет легко получить реальный практический вариант робастной системы обнаружения сигналов на фоне сложных аддитивных помех.

Ключевые слова: помехоустойчивость, обнаружитель, робастная обработка.

Введение

Современные радиотехнические системы работают в условиях электромагнитной незащищенности, поэтому проблема разработки новых методов повышения помехозащищенности является всегда актуальной. Одним из таких методов является метод робастной нелинейной фильтрации, основанный на робастной статистике, которая подробно описана в [1].

При исследовании такого робастного фильтра, синтезированного в [2], было выявлено повышение энергии сигнала за счет автоматической стохастической накачки [3, 4], в результате часть энергии белого шума переходит в энергию полезного сигнала тем самым увеличивая его мощность и, следовательно, улучшает характеристики приема.

Стохастическая накачка является специфическим явлением для класса нелинейных систем. В статье как раз приводится исследование такого необычного явления. В ходе исследования мы разработали метод оптимизации робастных структур, который позволил выяснить при каких условиях проявляется такая накачка, так как подобное явление можно использовать в радиотехнических системах для улучшения приема сигнала и уменьшения помехи. При исследовании данного феномена можно провести аналогию с параметрической накачкой, которая возникает в нелинейных цепях с реактивными элементами. Так, например, на этом подобном принципе построено множество устройств, в которых проявляются параметрические эффекты [5]. Это может быть параметрический усилитель, генератор (параметрон) и др. При стохастической накачке, в отличие от гармонической, повышение энергии будет осуществляться за счет шума. Только в отличие от параметрической накачки, где при повороте фазы сигнала накачки на $-\frac{\pi}{2}$ будет присутствовать активная отрицательная мощность, при накачке стохастической энергией шума частично переходит в энергию сигнала, тем самым можно добиться повышения отношения сигнал/шум на выходе робастного адаптивного фильтра.

1. Математическое моделирование робастной системы обработки сигналов

При моделировании нелинейного робастного адаптивного фильтра получается следующее. Принятая смесь сигнала и шума поступает на вход фильтра и в результате нелинейной обработки наблюдается некоторое повышение энергии сигнала по сравнению с линейным фильтром. Это как раз говорит о том, что в нелинейных системах происходит «накачивание» энергии за счет белого шума. На рис. 1 представлены графики линейной (ЛФ) и нелинейной (НЛФ) обработки.

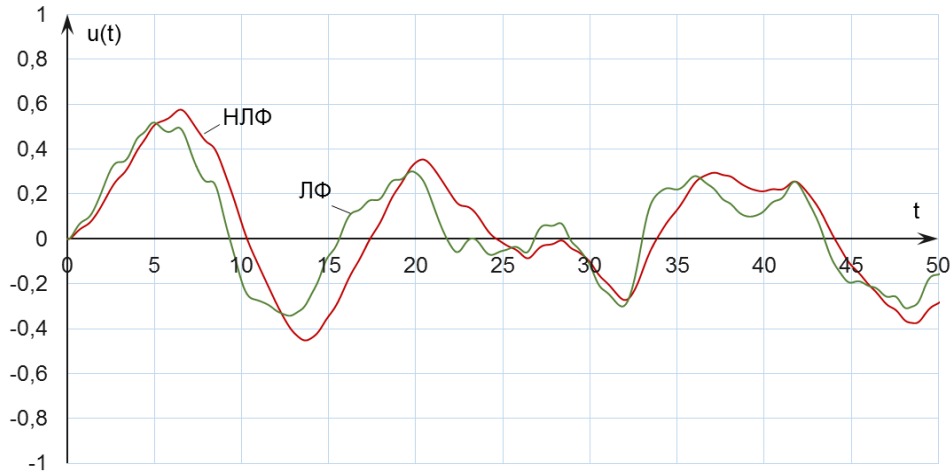


Рис. 1. Осциллограммы отфильтрованной смеси сигнал/шум

Здесь видно, что на промежутке от 0 до 7 с наблюдается всплеск, что характеризует наличие сигнала (прямоугольного видеопульса с длительностью 4.5 с) в конкретной реализации.

На рис. 2 представлены осциллограммы отфильтрованного шума (без полезного сигнала) робастным нелинейным (НЛФ) и линейным (ЛФ) фильтром. По одной реализации сложно оценить какой-либо эффект, поэтому для большей наглядности строятся рабочие характеристики и гистограммы плотностей вероятности, тем более, что в ходе эксперимента мы выяснили, что стохастическая накачка проявляется не во всех реализациях. Для этого проводилось статистическое численное математическое моделирование с количеством реализаций $N = 10^5$. Число реализаций выбрано с учетом соотношения производительности и точности вычислений. Несмотря на стремительное развитие вычислительной техники количество реализаций больше 10^5 уже может вызвать трудности при вычислении на обычном ПК, в частности, значительно увеличится время расчета рабочих характеристик. Методика моделирования аналогична методике из [3], а алгоритм обработки сигналов представляет из себя нелинейное стохастическое дифференциальное уравнение второго порядка

$$\frac{d^2u}{dt^2} + \frac{1}{RC(u)} \frac{du}{dt} + \frac{1}{C(u)} \frac{\partial C(u)}{\partial u} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + \frac{1}{LC(u)} = \frac{1}{LC(u)} \xi(t),$$

который был разработан в [1]. На рис. 3 представлены рабочие характеристики рассматриваемой системы. Для сравнения на графике представлен также линейный и согласованный фильтр (СФ).

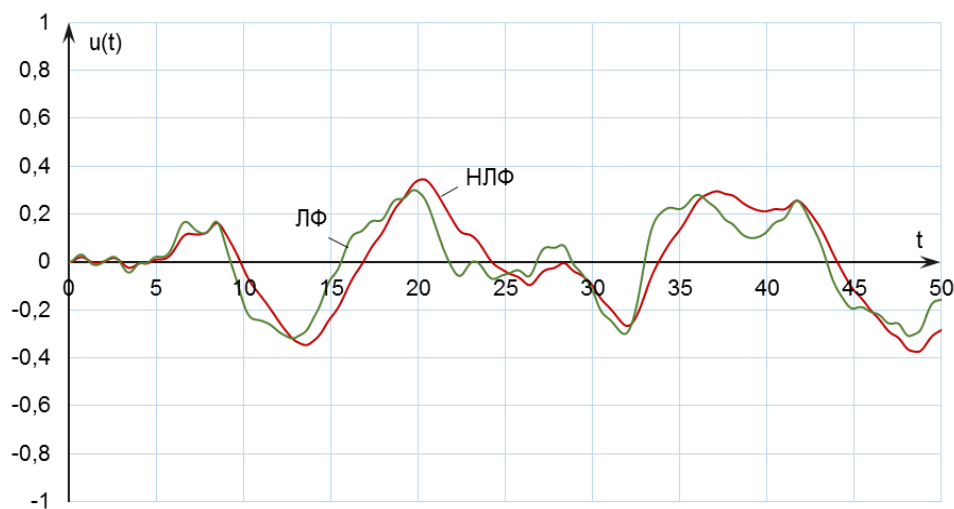


Рис. 2. Осциллограммы отфильтрованного шума

Из рис. 3 видно, что нелинейная обработка является эффективнее линейной, что подтверждает наличие стохастической накачки. Вероятность правильного обнаружения при заданной вероятности ложной тревоги по сравнению с квазиоптимальным линейным фильтром, повысилась, приблизительно, на 0,06. По сравнению с оптимальным согласованным фильтром повышение будет небольшое, около 0,02. На рис. 4 представлены гистограммы плотности вероятности обрабатываемого случайного процесса.

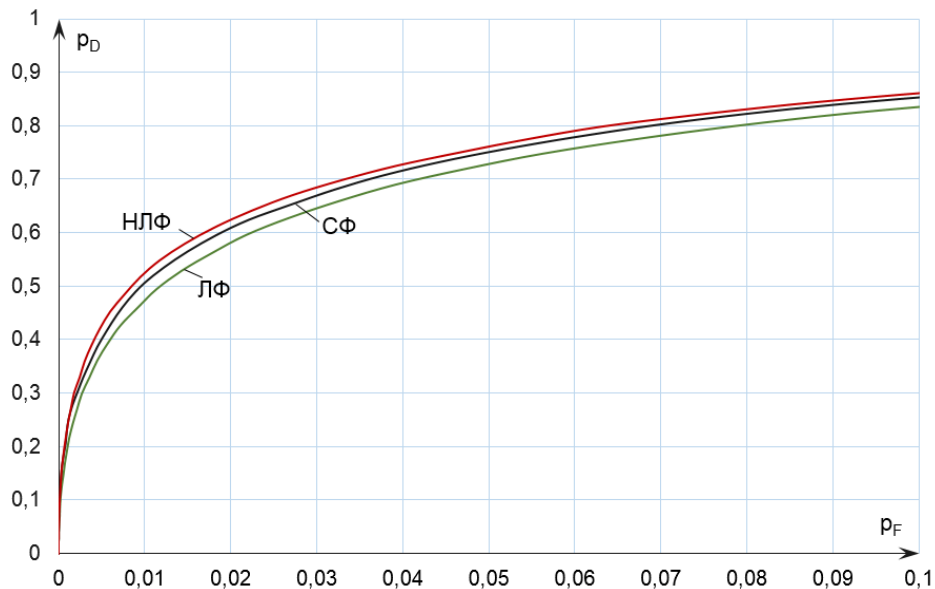


Рис. 3. Рабочие характеристики (p_F – вероятность ложной тревоги, а p_D – вероятность правильного обнаружения)

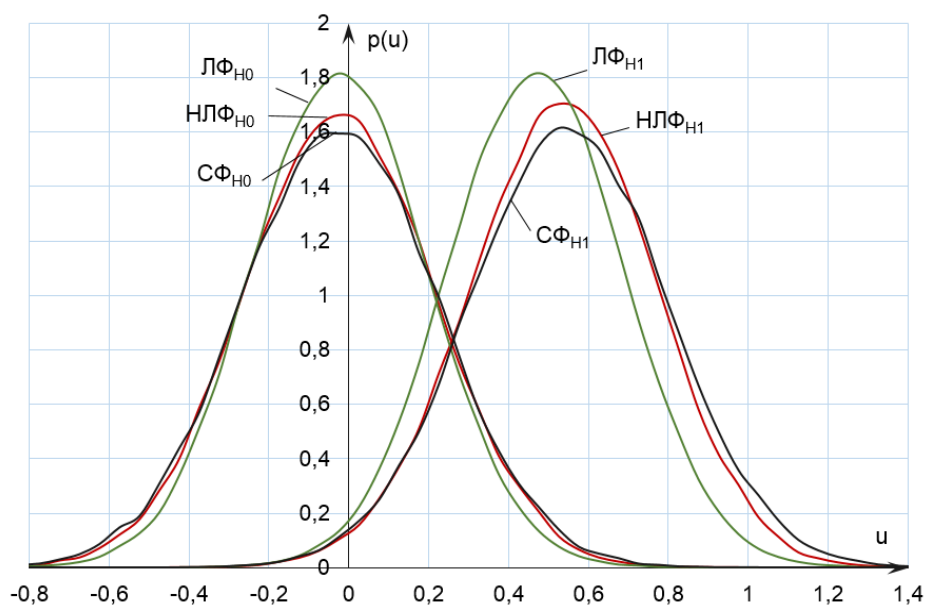


Рис. 4. Гистограммы плотностей вероятности

2. Один из методов оптимизации робастных систем

Как мы отметили ранее, стохастическая накачка работает не всегда, а наиболее эффективно себя показывает на, так называемых, «хороших» выборках шума. Для того, чтобы продемонстрировать такой эффект, на основе алгоритмов нелинейной обработки был разработан алгоритм вычисления оптимизированных выборок и из них уже составлялась полная оптимизированная нормально распределенная генеральная совокупность. Для этого был использован один из методов

компенсации входного наблюдения. Робастный многоканальный фильтр работал в двух режимах с разной нелинейной емкостью $C(u)$, затем выходные напряжения фильтра вычитались. Полученная разность вычиталась из входного наблюдения (на рис. 5 входное наблюдение отмечено как кривая 1). Результатом является компенсирующая составляющая (рис. 5, кривая 2). Затем компенсация вычиталась из входного наблюдения и, таким образом, находилось среднее значение, после чего находилась сумма (рис. 5, кривая 3). Если сумма отрицательная, считалось, что выборка «плохая» и, наоборот, если положительная, то «хорошая».

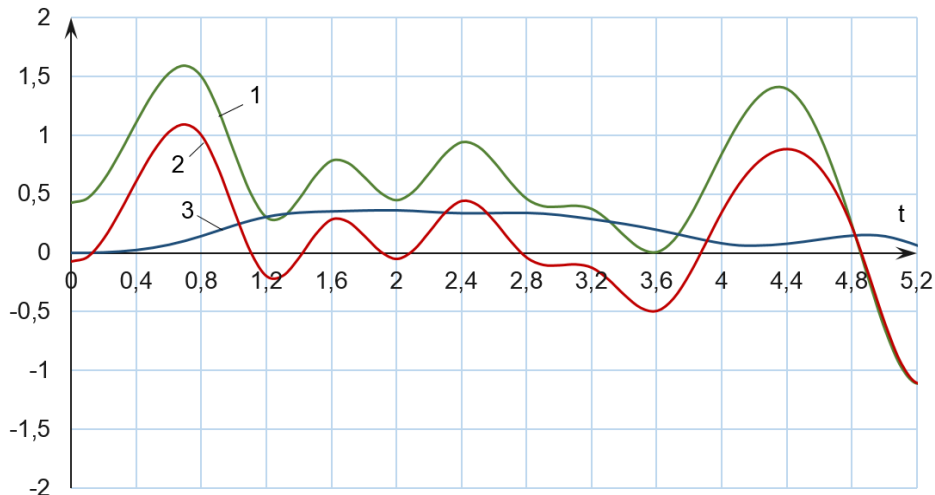


Рис. 5. Одна из входных реализаций и ее компенсирующие составляющие при наличии полезного сигнала

Аналогичная процедура проводилась для реализации при отсутствии полезного сигнала. На рис. 6 наглядно продемонстрированы составляющие метода компенсации и входная реализация при отсутствии полезного сигнала.

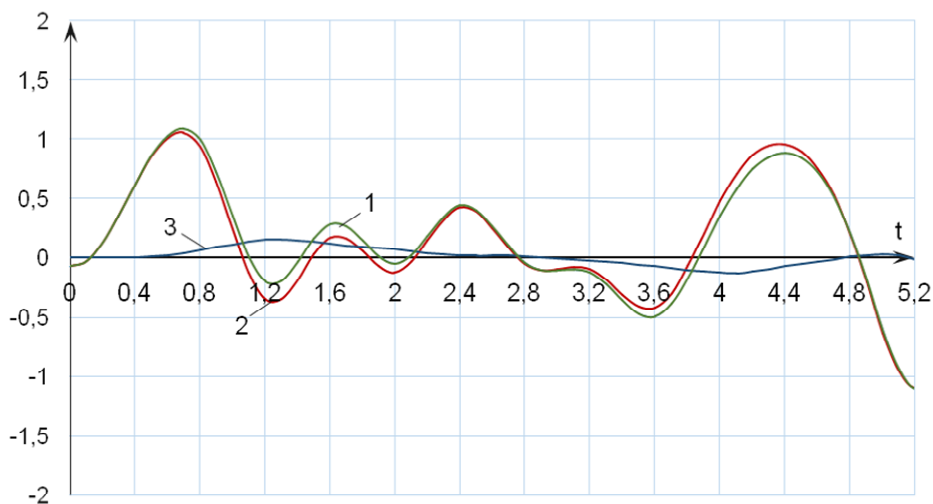


Рис. 6. Одна из входных реализаций и ее компенсирующие составляющие при отсутствии полезного сигнала

На рис. 7 можно увидеть пример оптимизированной реализации, когда ненулевая гипотеза H_1 поднимается на всей длительности полезного сигнала в отличие от нулевой гипотезы H_0 .

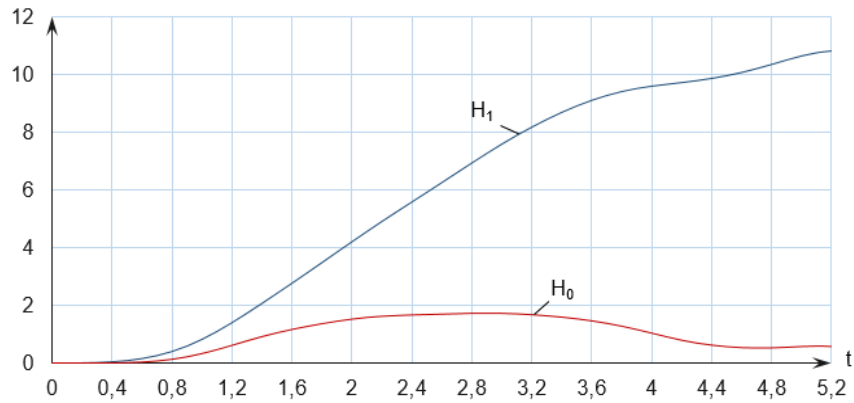


Рис. 7. Сумма компенсирующих составляющих при наличии (H_1) и отсутствии (H_0) сигнала

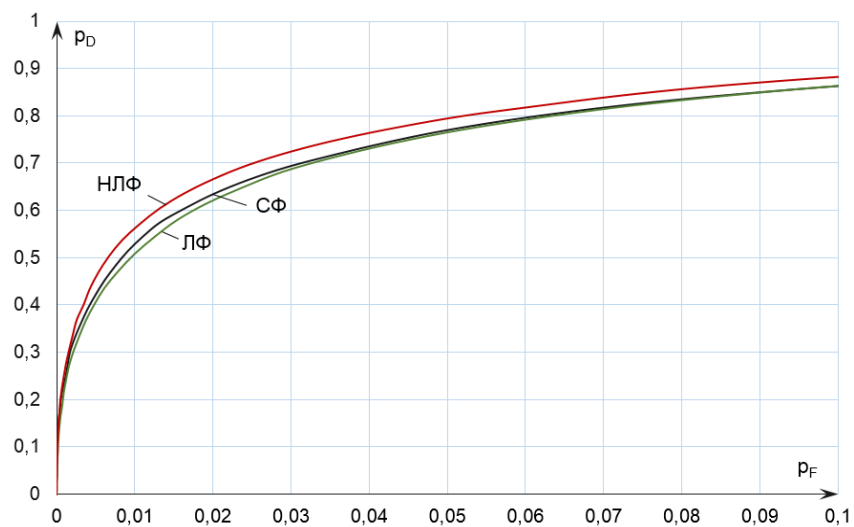


Рис. 8. Рабочие характеристики для оптимизированной генеральной совокупности (p_F – вероятность ложной тревоги, а p_D – вероятность правильного обнаружения)

Из рис. 8 видно увеличение вероятности правильного обнаружения нелинейной робастной системы по сравнению с согласованным фильтром примерно на 0,03. Также отмечается смещение нулевой гипотезы (рис. 9).

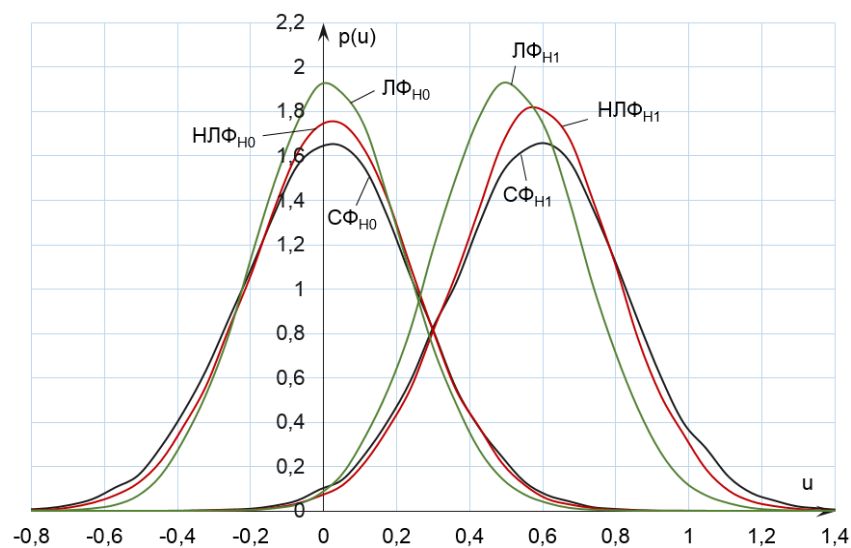


Рис. 9. Гистограммы для оптимизированной генеральной совокупности

Выводы

Таким образом, нелинейная робастная система работает не хуже, а в некоторых случаях лучше, оптимального обнаружителя типа согласованного фильтра. Такое повышение эффективности происходит за счет действия стохастической накачки, при котором часть энергии шума переходит в энергию сигнала. Можно добиться большего увеличения помехоустойчивости, подбирая параметры робастной многоканальной системы, а также мощность шума. Очевидно, что на практике за счет случайного характера шума, стохастическая накачка может работать не всегда, поэтому нужно оптимизировать алгоритм, чтобы свести ошибки обнаружения к минимуму. Из всего вышесказанного следует, что оптимизация робастных методов в концепции байесовского подхода не дает высоких результатов. Для того, чтобы улучшить его, необходимо использовать более сложные критерии обнаружения сигнала, так как пороговый критерий не дает максимального прироста соотношения сигнал/шум, однако его легче всего реализовать практически.

Литература

1. Хьюбер, Д.П. *Робастность в статистике: пер. с англ. / Д.П. Хьюбер.* – М.: Мир, 1984. – 304 с.
2. Неволин, В.И. *Робастные информационные системы. Методы анализа и синтеза / В.И. Неволин.* – М.: Радио и связь, 2008. – 312 с.
3. Неволин, В.И. *Моделирование многоканального робастного обнаружителя импульсных сигналов / В.И. Неволин, М.Б. Меренков, С.Н. Гергенбергер // Научно-технический вестник Поволжья.* – 2012. – № 6. – С. 330–333.
4. *Идентификация сигналовизображения робастными методами со стохастической накачкой / В.И. Неволин, М.Б. Меренков, Д.В. Иванеев, М.А. Зуйкова // Журнал радиоэлектроники.* – 2013. – № 1, январь.
5. Гоноровский, И.С. *Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие для вузов / И.С. Гоноровский.* – 5-е изд. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

Неволин Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Кыштыме (г. Кыштым); nevolin_v_i@mail.ru.

Иванеев Дмитрий Владимирович, аспирант кафедры радиотехники, Южно-Уральский государственный университет, филиал в г. Кыштыме (г. Кыштым); Strato5128@inbox.ru.

Поступила в редакцию 6 мая 2014 г.

**Bulletin of the South Ural State University
Series “Computer Technologies, Automatic Control, Radio Electronics”
2014, vol. 14, no. 3, pp. 112–118**

THE OPTIMIZATION OF ROBUST METHODS OF PROCESSING BY USING SIMPLE CRITERIA IN THE CONCEPT OF A BAYESIAN APPROACH

V.I. Nevolin, South Ural State University, Kyshtym branch, Kyshtym, Russian Federation, nevolin_v_i@mail.ru,
D.V. Ivaneev, South Ural State University, Kyshtym branch, Kyshtym, Russian Federation, Strato5128@inbox.ru

The robust processing methods of the space radar signals and images that improve the noise-immunity of radio systems on the powerful noise background is described. The numerical mathematical simulating of nonlinear robust detector synthesized by the design

of separate partial channels as well as its performances are represented. The obtained results based on the phenomenon of the stochastic pumping and described higher informativity in comparison with the known Bayesian optimal linear approaches are represented. The more improved noise immunity in comparison with the matched filter is registered.

Keywords: noise-immunity, detector, robust processing.

References

1. Peter J. Huber. *Robastnost' v statistike. Perevod. s angl.* [Robust Statistics. Translating from English]. Moscow, Science Publ., 1984. 304 p.
2. Nevolin V.I. *Robastnye informacionnye sistemy. Metody sinteza i analiza.* [Robust Information System. Methods of the Synthesis and Analysis]. Moscow, Radio and Connection Publ., 2008. 312 p.
3. Nevolin V.I., Merenkov M.B., Gergenberger S.N. [The Simulating of the Robast Multi-channel Impulse Signal Detector]. *Scientific and Technological Magazine of Volga Region*, 2012, no. 6, pp. 330–333. (in Russ.)
4. Nevolin V.I., Merenkov M.B., Ivaneev D.V., Zuykova M.A. The Identification of the Image Signal Using the Robust Systems with the Stochastic Pumping. *Radio Electronics Magazine*, 2013, no. 1, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/10/text.pdf>.
5. Gonorovsky I.S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radiotechnics Circuits and Signals: a Textbook for High Schools]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 719 p.

Received 6 May 2014