

УДК 681.53

И. Г. Сухорукова, Д. А. Гринюк, И. О. Оробей
Белорусский государственный технологический университет

ВЛИЯНИЕ УСЛОВИЙ ФИЛЬТРАЦИИ И СГЛАЖИВАНИЯ В ИНФОРМАЦИОННЫХ КАНАЛАХ НА КРИТЕРИЙ СЕРИЙ

В статье производится оценка возможностей использования критерия серий для адаптивной фильтрации. Выполнено моделирование работы измерительных каналов в широком диапазоне частот и в условиях различных помех, которые характерны для радиоэлектроники. Тестирование производилось при помехах со следующими распределениями случайной величины: нормальным, равномерным, экспоненциальным, треугольным, трапециидальным, арктангенсуальным. Случайные величины генерировались встроенными средствами Matlab. После смешения с полезным гармоническим сигналом временной ряд сглаживался тремя типами фильтров: бегущего среднего, медианой выборки, низких частот. В процессе моделирования параметры фильтров изменялись в широком диапазоне. Длина наблюдения серий варьировалась от 8 до 64. Проводилась оценка влияния условий на основные показатели критерия: количество серий, математическое ожидание, дисперсия, полный и упрощенный коэффициенты стационарности.

На основании полученных результатов сделаны выводы о возможности использования основных параметров критерия серий для адаптивной фильтрации. Несмотря на различный тип помех серий в широком диапазоне динамики распределены по нормальному закону. Оценка коэффициентов корреляции между параметрами критерия серий и полезным сигналом позволяет рекомендовать использование количества серий и упрощенного критерия стационарности только при высокой динамике. Из-за случайного характера основных параметров критерия серий для адаптации лучше применять триггерные варианты. Предложено несколько вариантов схем адаптивной фильтрации.

Ключевые слова: адаптивная фильтрация, критерий серий, стационарность.

I. G. Suhorukova, D. A. Hryniuk, I. O. Orobei
Belarusian State Technological University

INFLUENCE OF CONDITIONS OF FILTERING AND SMOOTHING IN INFORMATION CHANNELS RUNS TESTS

The article considers the runs tests for the adaptive filtering. Simulation of the measurement channels operation in a wide range of frequencies and in different interference conditions that are typical for electronics, was performed. Working conditions were created at various noises as in. Testing was made in case of noises from distribution of a random variable: normal, uniform, exponential, triangular, trapezoidal; arctangent. Random variables were generated by the built-in means of Matlab. After mixing with the useful harmonic signal the time series was filtered with three types of filters: the running average, median filter, the filter of low frequency. In the course of simulation parameters of filters changed in a broad range. The length of observation of series varied from 8 to 64. The impact assessment of conditions on the main indices of the criterion was carried out: quantity of series, mathematical expectation, dispersion, the complete and simplified stationarity coefficient. Influence of quantization on level on quantity of series is carried out.

Based on the results of the analysis the conclusions are made about the possibility of using of the main parameters of the criterion for adaptive filtering. Various types of noise lead to a series of normal distribution. The normal distribution is destroyed by high dynamics of deterministic time series. The correlation coefficients show that at low frequencies to adapt better to use a mathematical expectation, dispersion or complete stationarity, but at high frequencies is used quantity of series. Because of the accidental character of key parameters of the criterion of series for adaptation it is better to use trigger options. Several versions of schemes for the adaptive filtering are offered.

Key words: adaptive filtering, runs tests, stationary.

Введение. Динамика временных рядов в цифровой фильтрации может быть обнаружена критерием серий или критерием Вальда–Вольфовица (ВВ) [1]. Данный критерий относится к непараметрическим и широко используется в биологиче-

ских, физических, социальных и экономических исследованиях. В работе [2] были проведены исследования использования ВВ с целью оптимизации его работы, а в [3] выполнена апробация на промышленном логическом контроллере.

Одним из актуальных вопросов является работа принципа адаптации при условии не гауссовского распределения шумов на входе фильтра. В метрологической практике при анализе работы измерительных приборов используют ограниченный ряд стандартных аппроксимирующих функций распределения [4]: нормальную, равномерную, треугольную, арксинусоидальную, экспоненциальную и Рэлея.

Математическое моделирование производилось в Matlab. При постановке математического эксперимента случайные данные выбранных распределений генерировались таким образом, чтобы их мощности на фиксированном периоде времени отличались не более чем на 1%.

Помехи смешивались с гармоническим сигналом (ГС) с частотами от 0 до 0,03 Гц и пропускались через фильтры. Соотношение между амплитудой полезного сигнала и величиной дисперсии помехи не ниже 10 по нормальному распределению. В качестве фильтров анализировался фильтр бегущего среднего и с медианной выборкой [1] с длиной от 3 до 7 и цифровые фильтры 1–3 порядков, фильтр Баттерворта. Производилась оценка влияния эффекта квантования сигнала по уровню на параметры критерия серий.

Количество серий N варьировалось от 8 до 64. Для всех вариантов определялись количество серий r , математическое ожидание μ , дисперсия σ и оценки стационарности γ_1, γ_2 :

$$\mu = \frac{2N^+N^-}{N} + 1; \quad (1)$$

$$\sigma^2 = \frac{2N^+N^-(2N^+N^- - N)}{N^2(N-1)}; \quad (2)$$

$$\gamma = \gamma_1 = \exp\left(-\frac{(r-\mu)^2}{K\sigma^2}\right); \quad \gamma = \gamma_2 = \frac{r}{\mu}, \quad (3)$$

где N^+, N^- – количество положительных и отрицательных разниц до и после фильтра; K – коэффициент сжатия-растяжения вероятности статистической независимости.

Результаты и обсуждение. Для медианного (МФ), бегущего среднего (БС), фильтров первого (ФНЧ1) и третьего (ФНЧ3) порядков в отсутствие ГС и на малых частотах, при минимальных параметрах фильтров (MinTune) имеются отклонения от нормального распределения больше, чем при максимальных (MaxTune) (рис. 1–3). Графики (рис. 1–4) построены функцией распределения плотности вероятностей (РПВ) методом непараметрического сглаживания `ksdensity()`. В целом, чем больше сдвиг фаз фильтра, тем больше форма распределения случайных данных соответствует идеальному

колоколу Гаусса (рис. 3 и 4). Наличие у помехи (как, например, при экспоненциальном распределении) ненулевого математического ожидания влияет и на μ серий.

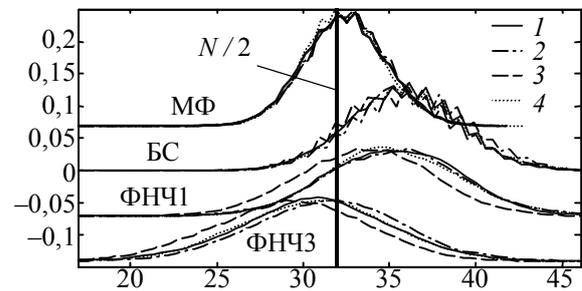


Рис. 1. РПВ без ГС с MinTune при $N = 64$. Часть 1: 1 – нормальное; 2 – равномерное; 3 – экспоненциальное; 4 – релейное

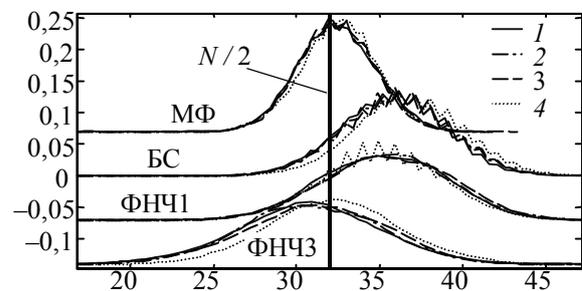


Рис. 2. РПВ без ГС с MinTune при $N = 64$. Часть 2: 1 – нормальное; 2 – треугольное; 3 – трапециидальное; 4 – арктангенсуальное

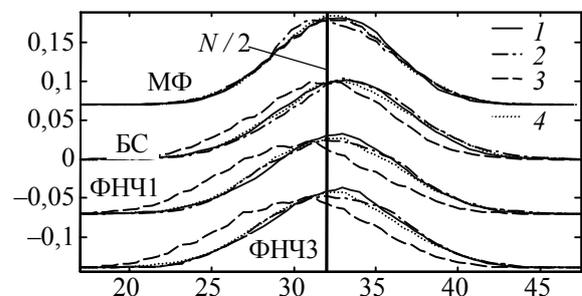


Рис. 3. РПВ без ГС с MaxTune при $N = 64$. Часть 1: 1 – нормальное; 2 – равномерное; 3 – экспоненциальное; 4 – релейное

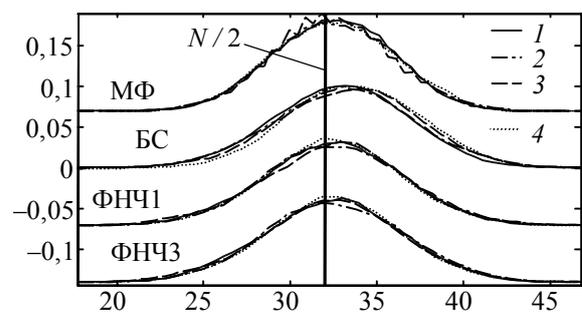


Рис. 4. РПВ без ГС с MaxTune при $N = 64$. Часть 2: 1 – нормальное; 2 – треугольное; 3 – трапециидальное; 4 – арктангенсуальное

Кривая для МФ, работа которого основана на случайном механизме, наиболее приближена к кривой нормального распределения и $\mu = N/2$. Такой эффект происходит и при увеличении параметров фильтров.

При повышении частоты математическое ожидание серий уменьшается (рис. 5 и 6). На некоторой частоте, значение которой зависит от соотношения между дисперсией помехи и амплитудой полезного сигнала, μ приближается к нулю и колокол Гаусса «разрушается». Первоначально уход от гауссовского распределения происходит у цифровых фильтров по причине проявления фазовых сдвигов. При этом равномерное распределение, трапециидальное и арктангенсуальное, которые имеют большую плотность в области больших отклонений, дольше сохраняют нормальное распределение.

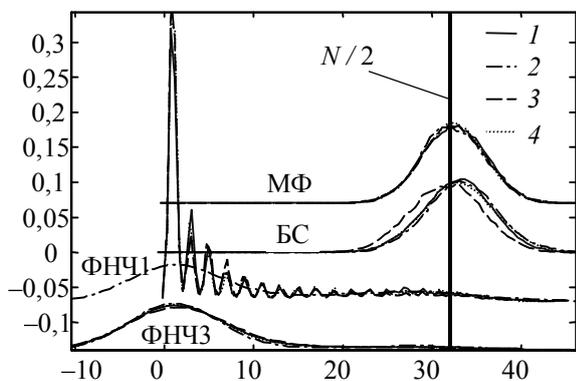


Рис. 5. РПВ при средних частотах с MaxTune:
1 – нормальное; 2 – равномерное;
3 – экспоненциальное; 4 – релейное

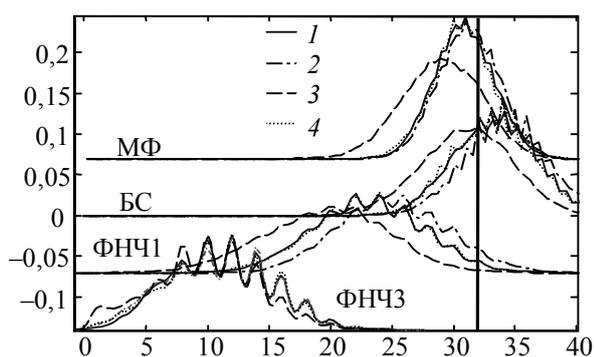


Рис. 6. РПВ при больших частотах с MinTune:
1 – нормальное; 2 – равномерное;
3 – экспоненциальное; 4 – релейное

Если при максимальной частоте полезного сигнала при длине 3 МФ и BC значение математического ожидания еще около 32, то уже при длине 4 происходит существенное отклонение, а при 7 значение математического ожидания смещается к 22–23.

При снижении r до 48 графики РПВ деформируются подобно кривым на рис. 6 для ФНЧ3. При длине r в 16 провалы опускаются до нуля. В то же время $\mu = N/2$. Это хорошо согласуется с положением, что при моделировании случайных процессов рекомендуется выбирать длину выборки не менее 100. Поэтому алгоритм использования критерия серий, работа которого исходит из нормального распределения серий, должен иметь длину наблюдения 64 и выше.

Изменения параметров серий для различной динамики, типов фильтров и их настроек можно видеть на рис. 7–11. Кривая s на графиках приведена без масштаба для визуального сравнения с остальными параметрами.

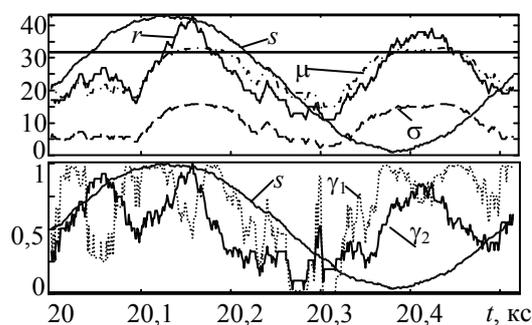


Рис. 7. Изменение показателей критерия серий при слабой динамике s для BC

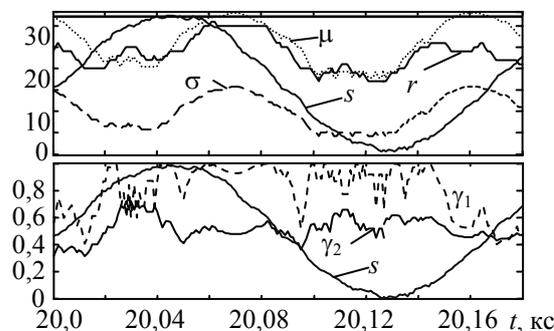


Рис. 8. Изменение показателей критерия серий при короткой длине BC

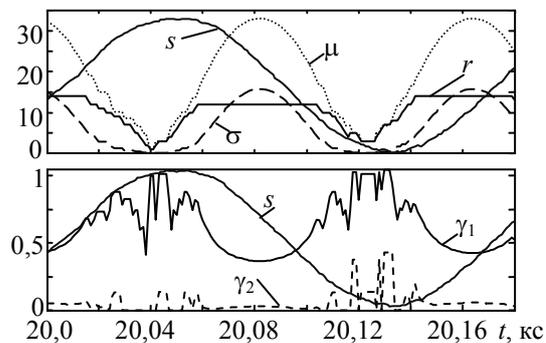


Рис. 9. Изменение показателей критерия серий при максимальной длине BC

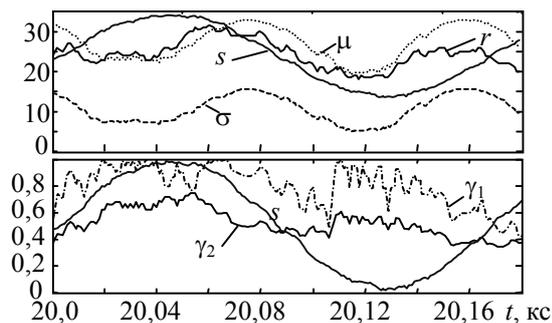


Рис. 10. Изменение показателей критерия серий при минимальной длине МФ

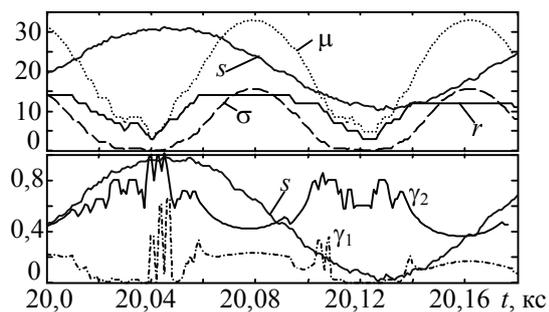


Рис. 11. Изменение показателей критерия серий для ФНЧ

Графики показывают, что в той или иной степени r , μ , σ , γ_1 и γ_2 могут выступать в качестве параметра оценки динамики тренда для адаптации. Установить же аналитическую зависимость между ними и динамикой сигнала проблематично. В то же время можно рекомендовать использование интервальной адаптации для ступенчатой перенастройки фильтров.

Влияние коэффициента сжатия-растяжения вероятности статистической независимости на γ_1 отражено на рис. 12. Выбор значения K зависит от структуры адаптации и той гипотезы (стационарный процесс или нестационарный), которая в данный момент интересует.

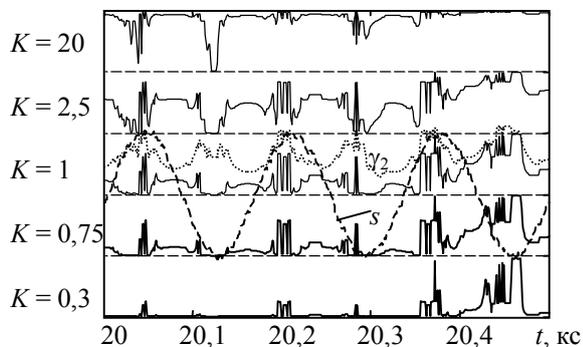


Рис. 12. Влияние K на γ_1

Увеличение K склоняет γ_1 в сторону гипотезы стационарности, а уменьшение – нестационарности. Путем изменения K можно реализовать триг-

герную структуру с зоной нечувствительности для уменьшения зависимости от шума γ_1 .

При одинаковом входном сигнале фильтры по-разному формируют серии и их показатели. Даже близкие по принципу работы МФ и БС дают разную картину. Цифровые фильтры имеют более узкий диапазон частот, при котором можно говорить о стабильном определении динамики ввиду большей зависимости фазы от частоты. БС и МФ имеют больший диапазон детектирования динамики, но хуже сглаживают. Возможен вариант построения наблюдателя слежения за динамикой для своевременной перенастройки фильтра основного канала. Для этого можно использовать и ФНЧ с автоподстраиваемой в зависимости от динамики малой постоянной времени по сравнению с основным каналом. Данный подход вместе с изменением K , как было указано выше, скорее всего окажется более выигрышным, чем поиск зависимости между γ_1 , γ_2 , μ , r , σ и s динамикой тренда.

Производилась оценка корреляции между γ_1 , γ_2 , μ , r , σ и s . Коэффициент корреляции (КК) выше между s и γ_1 , μ , σ в среднем на четверть, чем между γ_2 , r и s . При этом для МФ и БС КК при частотах 10^{-4} начинает быстро подниматься и остается на одном уровне до 10^{-2} , а затем резко возрастает, когда количество серий r сдвигается ближе к нулю, чем к значению $N/2$. Если длина БС на среднем диапазоне частот незначительно влияет на корреляцию, то при больших частотах при некоторой длине БС коэффициент корреляции достигает максимума для μ и σ , а затем начинает падать, тогда как для остальных параметров КК начинает резко расти. Для ФНЧ при частотах 10^{-4} в зависимости КК от постоянной времени фильтра имеется пологий максимум. По мере роста частоты максимум становится резким и смещается в сторону малых постоянных времен. На больших частотах КК для γ_2 , r становятся выше, чем для остальных параметров.

Для трендов r на среднем значении частот для ФНЧ, где параметр колеблется в широком диапазоне, выполнено разложение в ряд Фурье. Основная гармоника больше по амплитуде остальных, однако вторая и последующие имеют сравнимое с ней значение, что говорит о нелинейности преобразования. В целом тренд r для ФНЧ при некоторых частотах напоминает модуль гармонического сигнала.

При прохождении через квантователь по уровню критерий стационарности γ_1 и γ_2 сдвигается в сторону 1 со снижением амплитуды вариации, его зависимость от динамики уменьшается. Тренд r смещается в сторону $N/2$, снижает амплитуду и меньше реагирует на характеристику шума. Тренды μ и σ также очищаются от шума,

но увеличивают амплитуду, становятся более подобны на модуль гармонического сигнала. Случайные процессы с экспоненциальным распределением ввиду больших отклонений менее подвержены влиянию квантования.

Заключение. Критерий серий показал слабую зависимость от распространенных распределений шумов в радиоэлектронике. Ненулевое ма-

тематическое ожидание шума оказывает воздействие на параметры распределения серий. Вследствие подверженности основных показателей серий влиянию шума адаптацию лучше строить на основании триггерных схем, которые были предложены выше. В условиях работы с малым количеством разрядов АЦП на диапазоне шума лучше использовать μ или σ для адаптации фильтров.

Литература

1. Айвазян С. А., Енюков И. С., Мешалкин Л. Д. Прикладная статистика: Основы моделирования и первичная обработка данных. М.: Финансы и статистика, 1983. 471 с.
2. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Эффективность работы адаптации фильтра на критерии серий // Труды БГТУ. 2011. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 107–111.
3. Гринюк Д. А., Оробей И. О., Сухорукова И. Г. Адаптация критерия серий к применению в управлении технологическими процессами // Труды БГТУ. 2014. № 6: Физ.-мат. науки и информатика. С. 92–95.
4. Басов В. Г. Информационно-измерительные системы. Основы проектирования. В 3 ч. Ч. 2. Минск: БГУИР, 2007. 78 с.

References

1. Ayvazyan S. A., Enyukov I. S., Meshalkin L. D. *Prikladnaya statistika: Osnovy modelirovaniya i pervichnaya obrabotka dannykh* [Applied Statistics: Basics of modeling and primary data processing]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1983. 471 p.
2. Hryniuk D. A., Orobei I. O., Suhorukova I. G. Efficiency of the filter to adapt to a runs test. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2011, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 107–111 (In Russian).
3. Hryniuk D. A., Orobei I. O., Suhorukova I. G. Adaptation runs test for use in process control. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 6: Physical-mathematical sciences and informatics, pp. 92–95 (In Russian).
4. Basov V. G. *Informatsionno-izmeritel'nyye sistemy. Osnovy proektirovaniya. V 3 ch. Ch. 2* [Information-measuring system. Fundamentals of design. In 3 parts. Part 2], Minsk, BGUIR Publ., 2007. 78 p.

Информация об авторах

Сухорукова Ирина Геннадьевна – ассистент кафедры информационных систем и технологий. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: irina_x@rambler.ru

Гринюк Дмитрий Анатольевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: hryniuk@tut.by

Оробей Игорь Олегович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автоматизации производственных процессов и электротехники. Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Свердлова, 13а, Республика Беларусь). E-mail: orobei@tut.by

Information about the authors

Suhorukova Irina Gennadyevna – assistant lecturer, the Department of Information Systems and Technology. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: irina_x@rambler.ru

Hryniuk Dmitry Anatolyevich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: hryniuk@tut.by

Orobei Igor Olegovich – PhD (Engineering), Assistant Professor, Assistant Professor, the Department of Automation of Production Processes and Electrical Engineering. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: orobei@tut.by

Поступила 02.03.2016