
**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИБОРОВ
И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ МЕТОДИК**

УДК 621.391

© Д. Л. Осипов, А. А. Гавришев, 2021

**АНАЛИЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТФИЛЬТРОВАННЫХ
С ПОМОЩЬЮ ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА
ХАОТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ
В СИСТЕМАХ РАДИОСВЯЗИ**

Проведен анализ использования отфильтрованных через широкополосный полосовой фильтр хаотических сигналов для обеспечения скрытности и надежности функционирования передачи данных в системах радиосвязи. Получены временные реализации хаотических сигналов, сгенерированных с помощью известных генераторов Чуа и Рикитаке. Проведены их фильтрация с помощью широкополосного полосового фильтра и исследование полученных данных с помощью показателей BDS-статистики и пик-фактора. Авторы на основе проведенных исследований и выводов из известных работ считают целесообразным применять для обеспечения скрытности и надежности передачи данных в системах радиосвязи при использовании хаотических сигналов наряду с широко распространенными методами также и фильтрацию с помощью полосовых фильтров с широкой полосой пропускания.

Кл. сл.: полосовая фильтрация, хаотические сигналы, системы связи, скрытность, надежность

ВВЕДЕНИЕ

Из литературы [1, 2] широко известно применение полосовых фильтров (ПФ) на приемной стороне различных систем радиосвязи для борьбы с помехами, которые воздействуют на передаваемые по каналу связи сигналы. Вместе с тем в последние годы стало развиваться и другое направление, связанное с использованием полосовых фильтров в системах радиосвязи, в частности [3, 4]. Они начинают находить применение для активно развивающегося в настоящее время направления: генерирования хаотических сигналов для систем радиосвязи. Исходя из этого, исследование и анализ хаотических сигналов, создаваемых при помощи полосовых фильтров для беспроводных систем передачи, представляет практический и научный интерес. Причиной такого интереса является [3–7] то, что полосовой фильтр при соответствующих настройках потенциально может заметно влиять на характеристики колебаний, и возникающие изменения должны быть учтены при диагностике получаемых сигналов.

Так, например, в работе [5] исследовалось прохождение сигналов, генерируемых аттрактором Ресслера, через полосовой фильтр. В результате проведенных исследований было установлено, что фильтрация хаотического сигнала в некоторых случаях приводит к изменению структуры аттрактора, усложняя ее, т.е. увеличивается хаотичность

аттрактора. В работах [3, 4] данная идея была развита и апробирована для систем радиосвязи. В частности, в работе [4] с помощью полосовой фильтрации хаотических сигналов исследуется повышение скрытности передачи бинарного сообщения в системах радиосвязи. В предлагаемом подходе проводилось фильтрование широкополосным полосовым фильтром (ШПФ) отображения в виде полинома Чебышева, которое в дальнейшем использовалось в качестве генератора хаотических сигналов. Проведенные исследования показали [4], что отфильтрованный хаотический сигнал имеет аттрактор, схожий с аттрактором белого шума, в том время как аттрактор исходного хаотического сигнала структурирован. Показано применение полученных данных для повышения скрытности передачи бинарного сообщения в системах радиосвязи с корреляционным методом приема. Вместе с тем авторы работы [4] указывают на важное обстоятельство — для надежного функционирования систем радиосвязи данного класса необходимо, чтобы была правильно подобрана оптимальная полоса пропускания ШПФ при генерировании хаотических сигналов, которая бы одновременно обеспечивала наилучшие показатели скрытности и надежности функционирования (т.к. в данном случае надежность функционирования приемопередающей аппаратуры обратно пропорциональна скрытности). Это связано прежде всего с тем, что чем уже полоса пропускания

фильтра, тем в большей мере фазовый портрет генерируемого хаотического сигнала подобен фазовому портрету белого шума. Однако это отрицательно сказывается на надежности функционирования системы радиосвязи.

В связи со сказанным в данной работе авторы хотят более подробно рассмотреть вопросы использования отфильтрованных через ШПФ хаотических сигналов для обеспечения скрытности и надежности передачи данных в системах радиосвязи.

Задачей данной работы является получение временных реализаций хаотических сигналов, сгенерированных генераторами Чуа и Рикитаке, их фильтрация ШПФ и исследование полученных данных с помощью показателей BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$ и пик-фактора P .

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Краткие сведения о полосовых фильтрах и их применении к фильтрации хаотических сигналов

В соответствии с известными работами [4, 8], полосовой фильтр представляет собой линейную систему, состоящую из фильтра нижних частот и фильтра верхних частот. Полосовые фильтры бывают широкополосными и узкополосными. В соответствии с работой [8], к ШПФ относятся фильтры, у которых $F_{C2} / F_{C1} > 1.5$, а к узкополосным — $F_{C2} / F_{C1} \leq 1.5$, где F_{C1} — нижняя граница частотного среза, F_{C2} — верхняя граница частотного среза.

Исследования будем проводить в соответствии с рекомендациями и выводами из работ [4, 5]. В соответствии с ними для преобразования хаотического сигнала к более сложному виду необходимо использовать ШПФ. Кроме того, в работах [4, 5] указывается, что при использовании ПФ с широкой полосой пропускания для фильтрации

хаотических сигналов их аттрактор изменяется незначительно. В случае же использования ПФ с узкой полосой пропускания для фильтрации хаотических сигналов, их аттрактор значительно усложняется.

Исходя из этого, проведем исследования в соответствии со следующим алгоритмом:

- 1) получим временные реализации хаотических сигналов без фильтрации и проведем их исследование;
- 2) получим временные реализации хаотических сигналов, отфильтруем их с помощью ПФ с широкой полосой пропускания и проведем их исследование;
- 3) получим временные реализации хаотических сигналов, отфильтруем их с помощью ПФ с узкой полосой пропускания и проведем их исследование;
- 4) проведем сравнение полученных результатов.

Исследовательская часть

В качестве первого генератора хаотических сигналов возьмем известный генератор Чуа, описываемый следующим выражением [9]:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \alpha[x_2 - x_1 - h(x_1)], \\ \dot{x}_2 &= x_3 - x_2 - x_1, \\ \dot{x}_3 &= \beta x_2.\end{aligned}\tag{1}$$

Временные реализации генератора Чуа без фильтрации; генератора Чуа, отфильтрованного с помощью ПФ с широкой полосой пропускания; генератора Чуа, отфильтрованного с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, в соответствии с предложенным выше алгоритмом исследования авторами получены в пакете программ ScicosLab согласно рекомендациям из работ [4, 5, 9].

Примеры их фазовых портретов, построенных с помощью программы Fractan, приведены на рис. 1–3 соответственно.

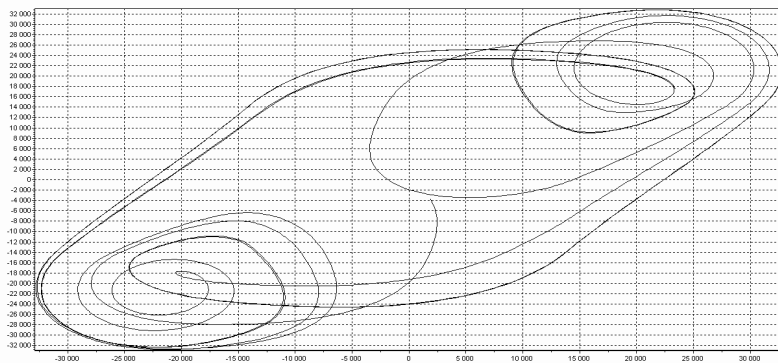


Рис. 1. Фазовый портрет временной реализации генератора Чуа (без фильтрации)

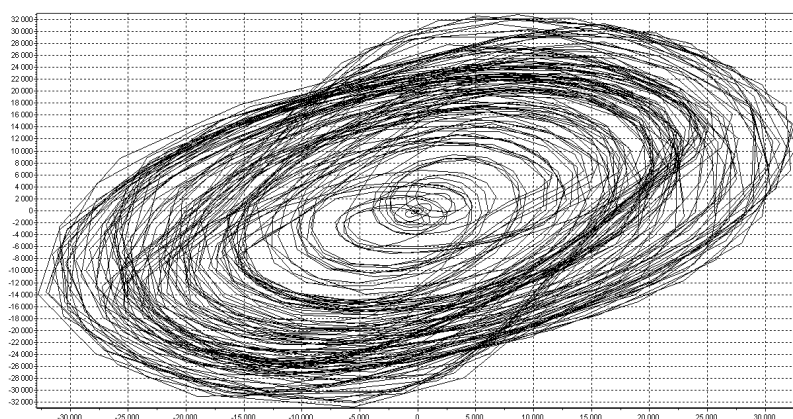


Рис. 2. Фазовый портрет временной реализации генератора Чуа, полученной с помощью ПФ с широкой полосой пропускания (ШПФ)

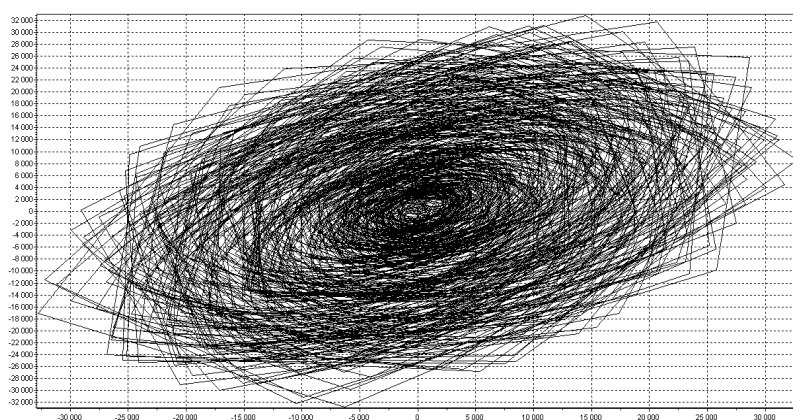


Рис. 3. Фазовый портрет временной реализации генератора Чуа, полученной с помощью ПФ с узкой полосой пропускания

Как видно из рис. 1, генератор Чуа (без фильтрации) обладает "классическим" фазовым портретом, который является структурированным. На рис. 2, 3 изображены усложненные фазовые портреты генератора Чуа, причем фазовый портрет, полученный с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, является наиболее хаотичным. Полученные данные согласуются на качественном уровне с исследованиями из работ [4, 5].

В качестве второго генератора хаотических сигналов возьмем известный генератор Рикитаке, описываемый следующим выражением [10, 11]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\mu x + zy, \\ \dot{y} &= -\mu x + (z - a)x, \\ \dot{z} &= 1 - xy.\end{aligned}\quad (2)$$

Временные реализации генератора Рикитаке (без фильтрации); генератора Рикитаке, отфильтрованного с помощью ШПФ; генератора Рикитаке, отфильтрованного с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, в соответствии с предложенным выше алгоритмом исследования авторами получены в пакете программ ScicosLab, согласно рекомендациям из работ [4, 5, 10, 11]. На рис. 4–6 приведены примеры их фазовых портретов соответственно.

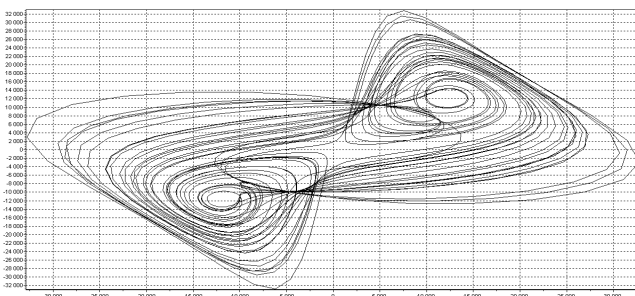


Рис. 4. Фазовый портрет временной реализации генератора Рикитаке

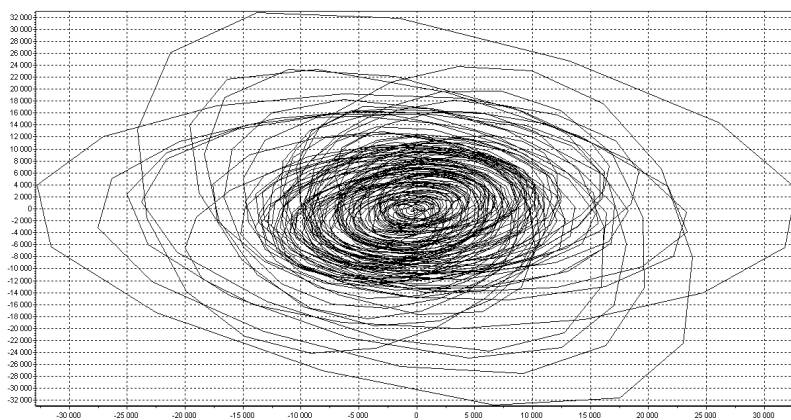


Рис. 5. Фазовый портрет временной реализации генератора Рикитаке, полученной с помощью ПФ с широкой полосой пропускания (ШПФ)

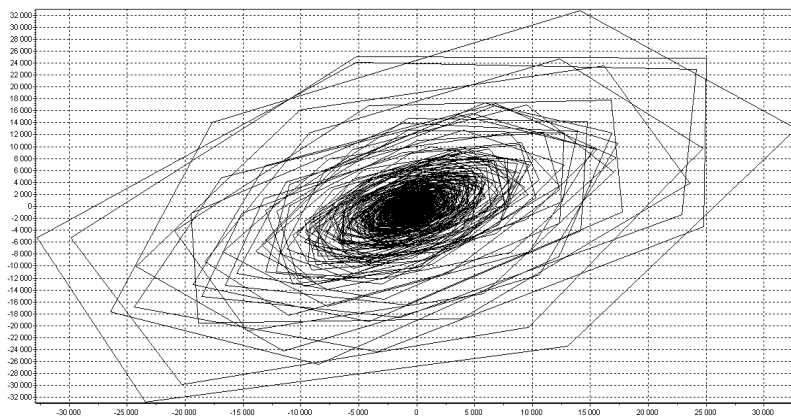


Рис. 6. Фазовый портрет временной реализации генератора Рикитаке, полученной с помощью ПФ с узкой полосой пропускания

Как видно из рис. 4, генератор Рикитаке (без фильтрации) обладает "классическим" фазовым портретом, который является структурированным. На рис. 5, 6 изображены усложненные фазовые портреты генератора Рикитаке, причем фазовый портрет, полученный с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, является наиболее хаотичным. Полученные данные также согласуются на качественном уровне с исследованиями из работ [4, 5].

Далее проведем количественную оценку скрытности полученных временных реализаций. Для осуществления количественной оценки скрытности обратимся к BDS-статистике, которая базируется на статистических свойствах корреляционной размерности исследуемого процесса в фазовом пространстве, которая в свою очередь определяется корреляционным интегралом. Эти данные дают в отдельных случаях больше информации о классе процесса (случайные, хаотические, регулярные), чем энергетические показатели. Таким образом, BDS-статистика в ряде случаев может выступить в качестве меры энергетической скрытности [12–14]. BDS-статистика основана на статисти-

ческой величине $w(\bar{\varepsilon})$ [12–14], описываемой следующим выражением:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (3)$$

где $C_{m,N}(\varepsilon)$ и $C_{1,N-m}(\varepsilon)$ — корреляционные интегралы, а $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ — среднеквадратичное отклонение.

В табл. 1 приведены значения BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$, описываемой выражением (3), для исследуемых временных реализаций. Расчеты авторами проведены с помощью программы Eviews Student Version Lite. Как видно из табл. 1, временные реализации генератора Чуа (без фильтрации) и генератора Рикитаке (без фильтрации) обладают значениями BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon}) \in [250 \div 320]$ и $w(\bar{\varepsilon}) \in [150 \div 200]$ соответственно. Согласно известным исследованиям [12–15], это указывает на то, что временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитаке обладают недостаточной

Табл. 1. Значения BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$, исследуемых временных реализаций генератора Чуа и генератора Рикитаке

Исследуемая система	BDS-статистика $w(\bar{\varepsilon})$
Генератор Чуа	
Генератор Чуа (без фильтрации)	[250÷320]
Фильтрация с помощью ШПФ	[108÷130]
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	[45÷50]
Генератор Рикитаке	
Генератор Рикитаке (без фильтрации)	[150÷200]
Фильтрация с помощью ШПФ	[74÷84]
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	[43÷49]

скрытностью от постороннего наблюдателя, т.к. их значение BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon}) \geq 200$.

Временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитаке, отфильтрованные с помощью ПФ с широкой полосой пропускания, обладают значениями BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon}) \in [108 \div 130]$ и $w(\bar{\varepsilon}) \in [74 \div 84]$ соответственно. Согласно известным исследованиям [12–15], это указывает на то, что они обладают значением BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$ в несколько раз меньшим, чем установлено для хаотических сигналов ($w(\bar{\varepsilon}) \geq 200$). С учетом того, что изначально они были получены с помощью генератора Чуа и генератора Рикитаке, то их скрытность от постороннего наблюдателя является достаточной. Временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитаке, отфильтрованные с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, обладают значениями BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon}) \in [45 \div 50]$ и $w(\bar{\varepsilon}) \in [43 \div 49]$ соответственно. Согласно известным исследованиям [12–15], это указывает на их схожесть с авторегрессионным и близкими к нему процессами. С учетом того, что они были получены с помощью генератора Чуа и генератора Рикитаке, то их скрытность от постороннего наблюдателя является достаточной. Полученные данные согласуются с исследованиями из работ [4, 5].

Проведем количественную оценку полученных временных реализаций с помощью одного из показателей надежности функционирования передачи данных в системах радиосвязи. В качестве такого показателя обратимся к известному показателю пик-фактора сигналов. Как известно из литературы [16, 17], увеличенное значение пик-фактора ограничивает реализуемые значения энергетической эффективности радиопередающего устройства, снижает помехоустойчивость приема,

усложняет и удорожает применяемую аппаратуру. Значение пик-фактора сигнала вычисляется с помощью следующего выражения:

$$P = \frac{U_{\max}}{\sigma}, \quad (4)$$

где $U_{\max}$ — максимальное значение сигнала, σ — среднеквадратичное значение сигнала.

В табл. 2 приведены значения пик-фактора P , описываемого выражением (4), для исследуемых временных реализаций. Расчеты авторами проведены с помощью программы ScicosLab.

Как видно из табл. 2, временные реализации генератора Чуа (без фильтрации) и генератора Рикитаке (без фильтрации) обладают наименьшим пик-фактором из рассмотренных сигналов, равным $P \leq 3$. Временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитаке, отфильтрованные с помощью ШПФ, обладают значением пик-фактора $P \in [2.3 \div 3.4]$ и $P \in [3.8 \div 4.5]$ соответственно. Временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитаке, отфильтрованные с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, обладают значением пик-фактора $P \in [3.9 \div 5]$ и $P \in [6 \div 8]$ соответственно. Согласно известным исследованиям [16, 17], для современных систем связи значение пик-фактора передаваемых сигналов, вычисленное с помощью выражения (4), должно находиться примерно в диапазоне $P \in [1 \div 4]$. Отсюда можно заключить, что сигналы, полученные с помощью ПФ с узкой полосой пропускания, не подходят для систем радиосвязи, т.к. обладают повышенным значением пик-фактора. Вместе с тем остальные сигналы потенциально возможно использовать для систем радиосвязи. Полученные данные согласуются с исследованиями из работы

[4].

Табл. 2. Значения пик-фактора P исследуемых временных реализаций генератора Чуа и генератора Рикитак

Исследуемая система	Пик-фактор P
Генератор Чуа	
Генератор Чуа (без фильтрации)	≤ 3
Фильтрация с помощью ШПФ	$[2.3 \div 3.4]$
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	$[3.9 \div 5]$
Генератор Рикитак	
Генератор Рикитак (без фильтрации)	≤ 3
Фильтрация с помощью ШПФ	$[3.8 \div 4.5]$
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	$[6 \div 8]$

Табл. 3. Обобщенные выводы по проведенным исследованиям

Исследуемая система	BDS-статистика	Пик-фактор
Генератор Чуа		
Генератор Чуа (без фильтрации)	–	+
Фильтрация с помощью ШПФ	+	+
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	+	–
Генератор Рикитак		
Генератор Рикитак (без фильтрации)	–	+
Фильтрация с помощью ШПФ	+	–/+
Фильтрация с помощью ПФ с узкой полосой пропускания	+	–

Сравнительный анализ полученных данных

В табл. 3 приведены обобщенные выводы по проведенным исследованиям.

Сравнительный анализ полученных данных (табл. 3) показывает, что для выбранных условий исследования в целом подходящими являются временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитак, полученные фильтрацией ПФ с широкой полосой пропускания (обладают приемлемыми значениями BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$ и пик-фактора P).

Таким образом, возможно сделать вывод, что фильтрация хаотических сигналов с помощью ШПФ при соблюдении определенных требований является перспективным подходом для обеспечения скрытности и надежности передачи данных в системах радиосвязи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований получены временные реализации хаотических сигналов, сгенерированных на основе известных генератора Чуа и генератора Рикитак. Проведена их фильтрация с помощью ШПФ и исследование полу-

ченных данных с помощью показателей BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$ и пик-фактора P . В результате проведенных исследований установлено, что для выбранных условий исследования в целом приемлемыми являются временные реализации генератора Чуа и генератора Рикитак, полученные фильтрацией ПФ с широкой полосой пропускания (обладают приемлемым значением BDS-статистики $w(\bar{\varepsilon})$ и пик-фактора P). Другие рассмотренные временные реализации, в частности генератора Чуа и генератора Рикитак без фильтрации, а также полученные их фильтрацией ПФ с узкой полосой в целом не подходят для систем радиосвязи, т.к. либо обладают недостаточной скрытностью от постороннего наблюдателя, либо обладают повышенным значением пик-фактора. Из этого можно заключить, что фильтрация хаотических сигналов с помощью ШПФ при соблюдении определенных требований является перспективным подходом для обеспечения скрытности и надежности передачи данных в системах радиосвязи. Вместе с тем она так же имеет и ограничения, которые необходимо учитывать при ее использовании. В частности, следует обращать внимание на влияние полученных при фильтрации сигналов на скрытность и надежность передачи

данных в системах радиосвязи. Данный вывод согласуется с выводами из работы [4].

Авторы на основе проведенных исследований и выводов из известных работ [4, 5] считают целесообразным применять для обеспечения скрытности и надежности передачи данных в системах радиосвязи при использовании хаотических сигналов наряду с широко распространенными методами (например, расширением базы передаваемых сигналов, помехоустойчивым кодированием и др.) также и фильтрацию хаотических сигналов с помощью ПФ с широкой полосой пропускания. Вместе с тем данное утверждение требует дальнейших исследований с учетом апробации на значительно большем количестве генераторов хаотических сигналов. Кроме того, в перспективе необходимо обратить внимание на вопросы синхронизации в таких системах, а также на вопросы усложнения приемопередающей аппаратуры, которые неизбежно возникают в таких случаях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Варакин Л.Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
2. *Емельянов Р.Ю., Кузьмин Л.В.* Компенсация узкополосной помехи в сверхширокополосной схеме связи на хаотических радиоимпульсах // Радиотехника и электроника. 2011. Т. 56, № 1. С. 67–76.
3. *Кузьмин Л.В., Емельянов Р.Ю.* Ортогональный базис для некогерентного приема сверхширокополосных хаотических радиоимпульсов // Материалы IV Всероссийской научной конференции "Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике". Муром, 2013. С. 49–54.
4. *Васюта К.С., Озеров С.В., Малышев А.А.* Повышение скрытности передачи бинарного сообщения в прямохаотической системе радиосвязи за счет фильтрации хаотической несущей // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. 2013. № 2 (35). С. 71–74.
5. *Кипчатов А.А., Красичков Л.В.* Изменение структуры странного аттрактора при полосовой фильтрации хаотических колебаний // Письма в ЖТФ. 1993. Т. 19, № 17. С. 68–71.
6. *Badii R., Broggi G., Derighetti B., Ravani M., Ciliberto S., Politi A., Rubio M.A.* Dimension increase in filtered chaotic signals // Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 60, no. 11. P. 979. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.979
7. *Rapp P.E., Albano A.M., Schmah T.I., Farwell L.A.* Filtered Noise Can Mimic Low-Dimensional Chaotic Attractors // Phys. Rev. E. 1993. Vol. 47, no. 4. P. 2289–2297.
8. *Ефимов И.П.* Проектирование электронных фильтров: методические указания по курсовому проектированию для студентов. Ульяновск: УГТУ, 1999. 33 с.
9. *Layec A.* "Modnum". Scilab toolbox for the communication systems. User's guide. IRCOM Group, 2006. 100 p.
10. *Гавришнев А.А., Осипов Д.Л.* Применение пакета программ Scicoslab для построения и анализа беспроводных систем связи на примере генераторов хаотических сигналов // Инновации в образовании. 2020. № 3. С. 122–136.
11. *Pehlivan I., Rikitake Y.U.* Attractor and It's Synchronization Application for Secure Communication Systems // Journal of Applied Sciences. 2007. Vol. 7, no. 2. P. 232–236.
12. *Васюта К.С., Озеров С.В., Зоц Ф.Ф.* Анализ пропускной способности и скрытности ММО-системы радиосвязи на хаотической несущей // Системы обработки информации. 2012. № 9 (107). С. 21–24.
13. *Васюта К.С.* Классификация процессов в инфокоммуникационных радиотехнических системах с применением BDS-статистики // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 4 (9). С. 63–71.
14. *Васюта К.С., Озеров С.В., Королюк А.Н.* Особенности построения стеганографических систем радиосвязи // Проблемы телекоммуникаций. 2012. № 3 (8). С. 94–104.
15. *Гавришнев А.А.* Моделирование и количественно-качественный анализ распространенных защищенных систем связи // Прикладная информатика. 2018. Т. 13, № 5 (77). С. 84–122.
16. *Логинов С.С.* Цифровые радиоэлектронные устройства и системы с динамическим хаосом и вариацией шага временной сетки. Дис. ... д-ра техн. наук. Казань, 2015. 228 с.
17. *Гавришнев А.А., Гавришнев А.Н.* К вопросу о расчете значений пик-фактора сигналов, генерируемых распространенными скрытными системами связи // Вестник НЦБЖД. 2020. № 3 (45). С. 149–157.

**Северо-Кавказский федеральный университет,
г. Ставрополь**

Контакты: *Гавришнев Алексей Андреевич*,
alexxx.2008@inbox.ru

Материал поступил в редакцию 24.01.2021

ANALYSIS OF THE USE OF CHAOTIC SIGNALS FILTERED WITH A BANDPASS FILTER FOR DATA TRANSFER OPERATION IN RADIO COMMUNICATION SYSTEMS

D. L. Osipov, A. A. Gavrishev

North-Caucasus Federal University, Stavropol, Russia

The analysis of the use of chaotic signals filtered through a broadband bandpass filter to ensure stealth and reliability of data transmission operations in radio communication systems is carried out. Time realizations of chaotic signals generated by the well-known Chua and Rikitake generators are obtained. They were filtered using a broadband bandpass filter, and the data obtained was studied using BDS-statistic and crest factor. As a result of the studies, it was found that under certain research conditions, time realizations of Chua generator and Rikitake generator, obtained by broadband filtering, are suitable. Other considered time realizations are not suitable for radio communication systems, since either they have low stealth from the outside observer, or they have an unacceptable crest factor value for radio communication systems. From this we can conclude that filtering chaotic signals using a broadband bandpass filter as a whole is a promising approach to ensure the stealth and reliability of data transmission in radio communication systems. The authors, basing on the conducted research and conclusions from well-known works, consider it appropriate to use broadband filtering to ensure the stealth and reliability of data transmission in radio communication systems when using chaotic signals, along with widely used methods.

Keywords: bandpass filtering, chaotic signals, communication systems, stealth, reliability

INTRODUCTION

From the research papers [1, 2], it is widely known method to use bandpass filters (BPF) on the receiving end of various radio communication systems to combat interference that affect signals transmitted over the communication channel. At the same time, in recent years, another prospect began to develop, associated with the use of bandpass filters in radio communication systems, in particular [3, 4]. They are starting to find application for the currently actively developing direction — generating chaotic signals for radio communication systems. On this basis, the study and analysis of chaotic signals generated by bandpass filters for wireless transmission systems is of practical and scientific interest. The reason for this interest is [3–7] that a band-pass filter with appropriate settings can potentially affect the characteristics of oscillations significantly, and the resulting changes should be taken into account when diagnosing the receiving signals.

For example, in [5], the passage of signals generated by the Rössler attractor through a BPF was investigated. As a result of the studies carried out, it was found that the filtering of a chaotic signal in some cases leads to a change in the structure of the attractor, complicating it, i.e. the chaos of the attractor increases. In papers [3, 4], this idea was developed and tested for radio communication systems. In particular, in [4], using band-pass filtering of chaotic signals, an in-

crease in the stealth of the transmission of a binary message in radio communication systems was studied. In the proposed approach, filtering of the mapping in the form of the Chebyshev polynomial was carried out with wideband bandpass filters (WBFs), resulting as a generator of chaotic signals. Studies have shown [4] that the filtered chaotic signal has an attractor similar to the attractor of white noise, while the attractor of the initial chaotic signal is structured. The application of the obtained data to increase the stealth of the transmission of a binary message in radio communication systems with a correlation reception method is shown. At the same time, the authors of [4] point out an important circumstance: for the reliable functioning of radio communication systems of this class, it is necessary that the optimal bandwidth of WBF is correctly selected when generating chaotic signals. This bandwidth is to provide simultaneously the best showing of stealth and reliability of operation (since in this case, the reliability of the operation of the transceiver equipment is inversely proportional to stealth). This is primarily due to the fact that the narrower the filter passband is, the more the phase image of the generating chaotic signal is similar to the phase image of white noise. However, this negatively affects the reliability of the radio communication system.

In connection with what has been stated in this paper, the authors want to consider in more detail the issues of using chaotic signals filtered through a WBF

to ensure secrecy and reliability of data transmission in radio communication systems.

The aim of this research is to obtain time realizations of chaotic signals created by Chua and Rikitake generators, filter them with a WBF and study the obtained data using the BDS statistic $w(\bar{\varepsilon})$ and crest factor P .

MAIN PART

Brief information about bandpass filters and their application for filtering chaotic signals

In accordance with the well-known works [4, 8], the bandpass filter is a linear system consisting of a low-pass filter and a high-pass filter. Bandpass filters can be broadband and narrowband. In accordance with [8], the WBFs are filters with $F_{C2}/F_{C1} > 1.5$, and the narrow-band filters are ones with $F_{C2}/F_{C1} \leq 1.5$, where F_{C1} is the lower limit of the frequency cutoff, F_{C2} is the upper limit of the frequency cutoff.

The research will be carried out in accordance with the recommendations and conclusions of the works [4, 5]. In accordance with them, to convert a chaotic signal to a more complex form, it is necessary to use a WBF. In addition, in [4, 5] it is stated that when using a wide band BF for filtering chaotic signals, their

attractor changes insignificantly. In the case of using a BF with a narrow passband for filtering chaotic signals, their attractor becomes much more complicated.

Based on this, we will conduct research in accordance with the following algorithm:

- 1) we get the time realization of chaotic signals without filtering and carry out their study;
- 2) we obtain the time realizations of chaotic signals, filter them out using a wide bandpass BF, and conduct their study;
- 3) we obtain the time realizations of chaotic signals, filter them out using a BF with a narrow band, and conduct their study;
- 4) and compare the results.

Research part

Chua generator defined by the expression [9]

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= \alpha[x_2 - x_1 - h(x_1)], \\ \dot{x}_2 &= x_3 - x_2 - x_1, \\ \dot{x}_3 &= \beta x_2.\end{aligned}\tag{1}$$

is taken as the first generator of chaotic signals.

Fig. 1. Phase image of time realization of Chua generator (without filtration)

Fig. 2. Phase image of time realization of Chua generator, obtained with a WBF

Fig. 3. Phase image of time realization of Chua generator, obtained with a narrow band BF

The time implementations of Chua generator without filtration as well as of Chua generator filtered with the use of a wide band BF, Chua generator filtered with the use of a narrow band BF accordingly to the proposed above algorithm were obtained by means of ScicosLab software in accord with the recommendations of [4, 5, 9].

The examples of their phase images designed by means of the Fractan software are given in Fig. 1–3 respectively.

As seen in Fig. 1, Chua generator without filtration has a classic phase image that is structured. In Fig. 2, 3 the complicated phase images of Chua generator are depicted, and the phase image obtained with the use of a narrow band BF is the most chaotic. The data obtained are consistent at qualitative level with the studies in [4, 5].

The well-known Rikitake generator defined by the expression [10, 11]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= -\mu x + zy, \\ \dot{y} &= -\mu x + (z - a)x, \\ \dot{z} &= 1 - xy.\end{aligned}\tag{2}$$

is taken as the second generator of chaotic signals.

The time implementation as well as of Rikitake generator filtered with the use of a WBF, Rikitake generator filtered with the use of a narrow band BF accordingly to the proposed above algorithm were obtained by means of ScicosLab software in accord with the recommendations of [4, 5, 10, 11]. The examples of their phase images are given in Fig. 4–6 respectively.

As seen in Fig. 4, Rikitake generator without filtration has a classic phase image that is structured. In Fig. 5, 6 the complicated phase images of Rikitake generator are depicted, and the phase image obtained with the use of a BPF with a narrow band is the most

Fig. 4. Phase image of time realization of Rikitake generator (without filtration)**Fig. 5.** Phase image of time realization of Rikitake generator, obtained with a WBF**Fig. 6.** Phase image of time realization of Rikitake generator, obtained with a narrow band BF

chaotic. The data obtained are also consistent at qualitative level with the studies in [4, 5].

Next, we will conduct a quantitative assessment of the stealth of the obtained time implementations. To carry out a quantitative assessment of stealth, let's turn to the BDS statistic, which is based on the statistical properties of the correlation dimensionality of the process under study in the phase space. The dimension is determined by the correlation integral. These data give in some cases more information about the class of the process (random, chaotic, regular) than energy showings. Thus, BDS statistic in a number of cases can act as a measure of energy stealth [12–14]. The BDS statistic are based on a statistical value $w(\bar{\varepsilon})$ [12–14] described by the following expression:

$$w_{m,N}(\varepsilon) = \sqrt{N-m+1} \frac{C_{m,N}(\varepsilon) - C_{1,N-m}(\varepsilon)^m}{\sigma_{m,N}(\varepsilon)}, \quad (3)$$

where $C_{m,N}(\varepsilon)$ and $C_{1,N-m}(\varepsilon)$ are the correlation integrals and $\sigma_{m,N}(\varepsilon)$ is the root-mean-square deviation.

Tab. 1 shows the BDS statistic values $w(\bar{\varepsilon})$, described by the expression (3) for the investigated time implementations. The calculations were carried out by the authors using the Eviews Student Version Lite program. As you can see in the Tab. 1, time implementations of Chua generator (without filtering) and Rikitake generator (without filtering) have the BDS

statistic values $w(\bar{\varepsilon}) \in [250 \div 320]$ and $w(\bar{\varepsilon}) \in [150 \div 200]$ correspondingly. According to well-known studies [12–15], this indicates to the fact that the time realization of Chua generator and Rikitake generator have insufficient stealth from an outside observer, because their BDS statistic value is $w(\bar{\varepsilon}) \geq 200$.

The time implementations of Chua generator and Rikitake generator, filtered with the use of a WBF, have the values of the BDS statistic $w(\bar{\varepsilon}) \in [108 \div 130]$ and $w(\bar{\varepsilon}) \in [74 \div 84]$ correspondingly. According to the known studies [12–15], this indicates to the fact that they have a BDS-statistic values $w(\bar{\varepsilon})$, that is several times lower than that established for chaotic signals ($w(\bar{\varepsilon}) \geq 200$). Taking into account that they were originally obtained with the use of Chua generator and Rikitake generator, their stealth from an outside observer is sufficient. The time implementations of Chua generator and Rikitake generator, filtered using a BF with a narrow bandpass, have the BDS statistic values $w(\bar{\varepsilon}) \in [45 \div 50]$ and $w(\bar{\varepsilon}) \in [43 \div 49]$, accordingly. According to the well-known studies [12–15], this indicates their similarity with autoregressive and cog-nant processes. Taking into account the fact that they were obtained using Chua generator and Rikitake generator, their stealth from an outside observer is sufficient. The data obtained are consistent with studies [4, 5].

Tab. 1. Values of BDS- statistic $w(\bar{\varepsilon})$ of studied time realizations of Chua generator and Rikitake generator**Tab. 2.** Values of crest factor P of investigated time realizations of Chua generator and Rikitake generator

Let's carry out a quantitative assessment of the obtained time realizations using one of the indicators of the reliability of the operation of data transmission in radio communication systems. As such an indicator, let's turn to the well-known signal crest factor. As is known from the sources [16, 17], the increased value of the crest factor limits the realized values of the en-

ergy efficiency of the radio transmitting device, reduces the noise immunity of reception, complicates and increases the cost of the used equipment. The crest factor of the signal is calculated using the following expression:

$$P = \frac{U_{\max}}{\sigma}, \quad (4)$$

where $U_{\max}$ is the maximum signal value, σ is the rms signal value.

Tab. 2 shows the values of the crest factor P , described by expression (4), for the studied time realizations. The calculations were carried out by the authors using the ScicosLab program.

As you can see in the Tab. 2, the time implementations of Chua generator (without filtering) and Rikitake generator (without filtering) have the smallest crest factor value, among the considered signals, and equal to $P \leq 3$. Time implementations of Chua generator and Rikitake generator, filtered by a WBF, have the crest factor values $P \in [2.3 \div 3.4]$ and $P \in [3.8 \div 4.5]$, accordingly. Time implementations of

Chua generator and Rikitake generator, filtered with a narrow band BF, have the crest factor value $P \in [3.9 \div 5]$ and $P \in [6 \div 8]$, respectively. According to well-known studies [16, 17], for modern communication systems, the value of crest factor of the transmitted signals, if calculated using expression (4), should be approximately in the range $P \in [1 \div 4]$. Hence, we can conclude that the signals received with the use of a narrow band BF are not suitable for radio communication systems, since have increased crest factor. At the same time, the remaining signals can potentially be used for radio communication systems. The data obtained are consistent with the studies in [4].

Tab. 3. Generalized conclusions of the research

Comparative analysis of the obtained data

Tab. 3 summarizes the findings of the studies.

Comparative analysis of the obtained data (Tab. 3) shows that under certain research conditions, on the whole, the time realizations of Chua generator and Rikitake generator, obtained by a wide band filtering, are suitable, since they have acceptable values of BDS statistic $w(\bar{\varepsilon})$ and crest factor P .

Thus, it is possible to conclude that filtering chaotic signals using a WBF, subject to certain requirements, is a promising approach to ensure the secrecy and reliability of data transmission in radio communication systems.

CONCLUSION

As a result of the research carried out, the time realizations of chaotic signals generated on the basis of the known Chua generator and Rikitake generator were obtained. They were filtered using a WBF and the data obtained were studied using BDS statistic $w(\bar{\varepsilon})$ and crest factor P . As a result of the studies, it was found that, for the selected research conditions, the time realizations of Chua generator and Rikitake generator obtained with the use of a wide passband BPF have an acceptable values of BDS statistic $w(\bar{\varepsilon})$ and crest factor P . Other considered time implementations, in particular Chua generator and Rikitake generator without filtering, as well as ones obtained by narrow band filtering is generally not suitable for radio communication systems, because either have insufficient stealth from an outside observer, or have an increased crest factor. From this we can conclude that

filtering chaotic signals using a WBF, subject to certain requirements, is a promising approach to ensure the stealth and reliability of data transmission in radio communication systems. However, it also has limitations that must be taken into account when using it. In particular, one should pay attention to the influence of signals, obtained during filtering, on stealth and reliability of data transmission in radio communication systems. This conclusion is consistent with the conclusions in work [4].

The authors, basing on the studies carried out and conclusions from the well-known works [4, 5], consider it expedient to apply filtering chaotic signals using a wide band BF along with widespread methods (for example, expanding the base of transmitted signals, noise-immune coding, etc.) to ensure the stealth and reliability of data transmission in radio communication systems when using chaotic signals. At the same time, this statement requires further research, taking into account testing on a significantly larger number of chaotic signal generators. In addition, in the future, one need to pay attention to synchronization issues in such systems, as well as on the issues of complication of the transceiving equipment, which inevitably arise in such cases.

REFERENCES

1. Varakin L.E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Noise-like communication systems]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p. (In Russ.).
2. Emel'yanov R.Y., Kuz'min L.V. [Compensation of a narrowband interference in an ultrawideband communication system based on chaotic radio pulses]. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of communications technology and

- electronics], 2011, vol. 56, no. 1, pp. 67–76. (In Russ.). DOI: 10.1134/S1064226910121095
3. Kuz'min L.V., Emel'yanov R.Y. [Orthogonal basis for non-coherent reception of ultra-wideband chaotic radio pulses]. *Materialy IV Vserossijskoj nauchnoj konferencii "Sverhshirokopolosnye signaly v radiolokacii, svyazi i akustike"* [Materials of the IV All-Russian Scientific Conference "Ultra-wideband signals in radar, communications and acoustics"]. Murom, 2013, pp. 49–54. (In Russ.).
 4. Vasyta K.S., Ozerov S.V., Malyshev A.A. [Improving communication stealth binary messages in chaotic radio communications system by filtering chaotic carrier]. *Zbirnik naukovih prac' Harkivs'kogo universitetu Povitranijih Sil* [Scientific Works of Kharkiv National Air Force University], 2013, no. 2 (35), pp. 71–74. (In Russ.).
 5. Kipchatov A.A., Krasichkov L.V. [Changing the structure of a strange attractor during band filtering of chaotic oscillations]. *Pis'ma v ZhTF* [Applied Physics Letters], 1993, vol. 19, no. 17, pp. 68–71. (In Russ.).
 6. Badii R., Broggi G., Derighetti B., et al. Dimension increase in filtered chaotic signals. *Phys. Rev. Lett.*, 1988, vol. 60, no. 11, pp. 979. DOI: 10.1103/PhysRevLett.60.979
 7. Rapp P.E., Albano A.M., Schmah T.I., Farwell L.A. Filtered Noise Can Mimic Low-Dimensional Chaotic Attractors. *Phys. Rev. E*, 1993, vol. 47, no. 4, pp. 2289–2297. DOI: 10.1103/PhysRevE.47.2289
 8. Efimov I.P. *Proektirovanie elektronnyh fil'trov: metodicheskie ukazaniya po kursovomu proektirovaniju dlja studentov* [Electronic Filter Design: Course Design Guidelines for Students]. Ul'janovsk, UGTU Publ., 1999. 33 p. (In Russ.).
 9. Layec A. *"Modnum". Scilab toolbox for the communication systems. User's guide*. IRCOM Group, 2006. 100 p.
 10. Gavrishev A.A., Osipov D.L. [Application of the scicoslab software package for construction and analysis wireless communication systems on the example of chaotic signal generators]. *Innovacii v obrazovanii* [Innovation in Education], 2020, no. 3, pp. 122–136. (In Russ.).
 11. Pehlivan I., Rikitake Y.U. Attractor and It's Synchronization Application for Secure Communication Systems. *Journal of Applied Sciences*, 2007, vol. 7, no. 2, pp. 232–236. DOI: 10.3923/jas.2007.232.236.
 12. Vasyta K.S., Ozerov S.V., Zots F.F. [Throughput analysis and secrecy mimo-radio system for chaotic carrier]. *Sistemi obrobki informacii* [Information Processing Systems], 2012, no. 9 (107), pp. 21–24. (In Russ.).
 13. Vasyta K.S. [Classification of Processes in Information and Communication Radio Systems Using BDS Statistics]. *Problemy telekommunikacij* [Telecommunications problems], 2012, no. 4 (9), pp. 63–71. (In Russ.).
 14. Vasyta K.S., Ozerov S.V., Koroljuk A.N. [Features of construction of steganographic radio communication systems]. *Problemy telekommunikacij* [Telecommunications problems], 2012, no. 3 (8), pp. 94–104. (In Russ.).
 15. Gavrishev A.A. [Modeling and quantitative analysis of common secure communication systems]. *Prikladnaja informatika* [Journal of Applied Informatics], 2018, vol. 13, no. 5 (77), pp. 84–122. (In Russ.).
 16. Loginov S.S. *Cifrovye radioelektronnye ustrojstva i sistemy s dinamicheskim haosom i variaciej shaga vremenoj setki*. Diss. dr. techn. nauk [Digital avionics and systems with dynamic chaos and time grid pitch variation dr. techn. sci. diss.]. Kazan, 2015. 228 p. (In Russ.).
 17. Gavrishev A.A., Gavrishev A.N. [To the question of calculating the crest factor values of signals generated by common hidden communication systems]. *Vestnik NTs-BZhD* [Bulletin of NCBJD], 2020, no. 3 (45), pp. 149–157. (In Russ.).

Contacts: Gavrishev Aleksej Andreevich,
alexxx.2008@inbox.ru

Article received by the editorial office on 24.01.2021