

УДК 681.391

Николов Н. А., к.т.н.; Супрунюк Д. А., асп.; Сметанюк А. Н., студент
(*Национальный технический университет Украины «КПИ»*)

СТОХАСТИЧЕСКАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ

Николов М. О., Супрунюк Д. О., Сметанюк А. М. Стохастична синхронізація сигналів. Розроблено алгоритм синхронізації і відновлення сигналів на основі явища стохастичного резонансу. Алгоритм заснований на попередньому масштабуванні сигналу і його згладжуванні, що служить рівнем порогу для стохастичної фільтрації. Безпосередня синхронізація сигналів відбувається при одночасному перевищенні рівня порога вихідних зашумлених сигналів, до яких додається зовнішня випадкова складова певної інтенсивності.

Ключові слова: СТОХАСТИЧНИЙ РЕЗОНАНС, СИНХРОНИЗАЦІЯ СИГНАЛІВ, МАШТАБНІ ЕФЕКТИ

Николов Н. А., Супрунюк Д. А., Сметанюк А. Н. Стохастическая синхронизация сигналов. Разработан алгоритм синхронизации и восстановления сигналов на основе явления стохастического резонанса. Алгоритм основан на предварительном масштабировании сигнала и его сглаживании, что служит уровнем порога для стохастической фильтрацией. Непосредственная синхронизация сигналов происходит при одновременном превышении уровня порога исходных зашумленных сигналов, к которым добавляется внешняя случайная составляющая определенной интенсивности.

Ключевые слова: СТОХАСТИЧЕСКИЙ РЕЗОНАНС; СИНХРОНИЗАЦИЯ СИГНАЛОВ; МАСШТАБНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Nikolov M. O., Supruniuk D. O., Smetaniuk A. M. Stochastic synchronization signal. Developed the algorithm of synchronization and restoration of signals on the basis of the phenomenon of a stochastic resonance. The algorithm is based on preliminary scaling of a signal and its smoothing that serves as level of a threshold for a stochastic filtration. Direct synchronization of signals occurs at simultaneous excess of level of a threshold initial noisy signals to which the external casual component of certain intensity is added.

Key words: STOCHASTIC RESONANCE, SIGNAL SYNCHRONIZATION, SCALE EFFECTS

Введение. Одним из универсальных методов фильтрации и усиления сигналов является стохастическая фильтрация, в частности на основе явления стохастического резонанса (СР). Под СР следует понимать явления, проявляющиеся в нелинейных системах, в которых при наложение на относительно слабый зашумленный или подпороговый для детектирования сигнал внешнего шума происходит увеличение соотношения сигнал-шум или вероятность обнаружения и распознавания сигнала. Усиление «полезной» части исходного сигнала (сигнал-шум) в зависимости от интенсивности внешнего шума описывается колокообразной зависимостью, что и характеризует термин «резонанс». Однако, несмотря на достаточно хорошо разработанную теоретическую базу СР [1, 2] в прикладном аспекте научных публикаций незначительное количество. Не выработаны четкие инженерные критерии выбора уровня внешнего шума и порога (высоты потенциального барьера) для конкретного изображения или сигнала; не определено, должны ли параметры фильтрации изменяться в зависимости от амплитуды сигнала и т.д. В то же время, применение стохастических методов обработки сигналов чрезвычайно актуально для детектирования сверхслабых сигналов, обработки изображений [3], шифрования и восстановления данных [4, 5], повышения чувствительности и надежности электронных систем [6], распознавания образов [7]. Представляет чрезвычайный интерес и синхронизация хаотических систем, что может быть полезно не только для вышеупомянутых задач, но и для радиолокации, автоматической синхронизации модулей электронных схем [8-10].

Целью данной работы является разработка алгоритма синхронизации временных сигналов на основе явления СР и выбор эффективных параметров фильтрации.

Математический алгоритм. Разработанный математический алгоритм основан на наблюдении, что визуализация свойств (низкочастотных характеристик) зашумленных

сигналов может существенно лучше проявляться при уменьшении их разрешающей способности. Будем называть подобные эффекты – масштабными. В свою очередь, выделение условно истинных характеристик сигналов может служить основой выбора наиболее эффективного уровня внешнего шума и потенциально барьера для СР. Синхронизация двух и более одинаковых без шума или хорошо коррелированных сигналов может осуществляться при одновременном превышении потенциального барьера (порога) исходных зашумленных сигналов с добавленным внешним шумом.

Обобщенный алгоритм синхронизации сигналов на основе СР можно представить следующим образом:

- 1) ввод исходных зашумленных сигналов $y_i(t)$, где i – порядковый номер сигнала (условно названный в данной работе «пакетом»), t – время;
- 2) масштабирование сигнала (уменьшение частоты дискретизации сигнала) и поиск эффективного значения порога $p_i(t)$ и интенсивности внешнего шума I_i ;
- 3) фильтрация сигналов $y_i(t)$ на основе СР и взаимное их усиление при одновременном превышении соответствующего порога $p_i(t)$;
- 4) оценка результатов качества фильтрации полученных сигналов $Y_i(t)$.

Поиск эффективного порога $p_i(t)$ и внешнего шума I_i осуществлялся следующим образом:

- 1) задание максимальных значений порядка медиального сглаживания сигнала $nFilter_{max}$ и разряжения (масштабирования/уменьшение времени дискретизации) сигнала Δt_{max} ;
- 2) медиальное сглаживание сигналов $y_i(t)$ медиальным фильтром порядком $nFilter$ и получение сигнала y_i^{sc} с уменьшенной частотой дискретизации на Δt ;
- 3) на основе кубической сплайн интерполяции данных y_i^{sc} приведении сигнала к исходной частоте дискретизации и получение сигнала $y'(t)$;
- 4) расчет автокорреляционной функции $R(\tau)$ сигнала $y'(t)$;
- 5) выбор сигнала $y''(t)$, соответствующий максимальному интегралу $\int |R(\tau)| d\tau$;
- 6) определение максимальной амплитуды A_{maxi} сигнала $y_i(t)$;
- 7) определение $p_i(t) = -(3..4)A_{maxi}y_i''(t)$;
- 8) определение интенсивности добавляемого равномерного внешнего шума I_i как $(6..8) \times A_{maxi}$.

Аппробация алгоритма. Представленный алгоритм был реализован в системе Matlab 7.0. В качестве примера приведена синхронизация двух одинаковых сигналов вида $y(t) = \sin(t)/t$. После зашумления идеального сигнала $y(t)$ получено два однотипных сигнала $y_1(t)$ и $y_2(t)$ с взаимным коэффициентом корреляции порядка 0,4 (рис. 1).

Эффективный уровень порога, оцененный исходя из представленных алгоритмов, для $y_1(t)$ и $y_2(t)$ по отношению к идеальному сигналу $y(t)$ представлен на рис. 2. Изменение коэффициента взаимной корреляции r между восстановленным сигналом $Y(t)$ и $y(t)$ в

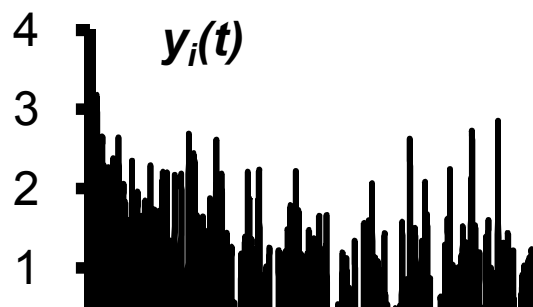


Рис. 1. Исходные зашумленные сигналы $y_i(t)$

зависимости от выбранного уровня (амплитуды) порога и интенсивности добавляемого шума представлено на рис. 3 Пунктирной линией на рис. 3 показана корреляция между идеальным и исходным зашумленным сигналами).

При анализе данных на рис. 3 можно заметить, что применение только эффектов масштаба без стохастической фильтрации ($I=0$) увеличивает r с 0,41 до 0,5..0,6. Максимальный коэффициент взаимной корреляции r наблюдается при $p(t)=(-10..-2)y''(t)$ и достигал 0,7..0,8. При уменьшении по модулю амплитуды уровня порога кривая $r(I)$ ($p(t)=-2y''(t)$) имеет достаточно выраженный максимум и по форме приближается к классическому виду, используемый для иллюстрации явления СР. Однако, подобный резкий максимум требует более точного определения I , что на практике достаточно проблематично.

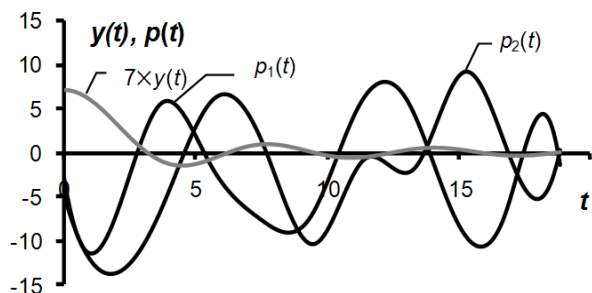


Рис. 2. Уровень порога для тестовых сигналов по отношению к идеальному

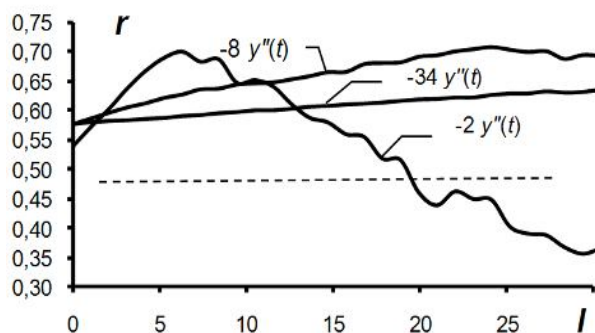


Рис. 3. Изменение r в зависимости от параметров фильтрации.



Рис.4. Результат синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$

Типичный конечный результат синхронизации сигналов $y_1(t)$ и $y_2(t)$ на основе СР представлен на рис. 4.

В случае синхронизации трех сигналов на основе представленного алгоритма r стремится к 0,92-0,95. Однако, при увеличении количества «пакетов» более 3 наблюдалось некоторое снижение качества восстановления сигналов, несмотря на снижение дисперсии коэффициента корреляции в точке оптимума между восстановленным и идеальным сигналом. В табл. 1 представлены значения коэффициента корреляции при оптимальной интенсивности внешнего шума для сигналов: $y_{sin}(t) = \sin(t)/t$ и импульсного $y_{puls}(t)$ (меандр). Исходная зашумленность сигналов в «пакетах» выбиралась таковой, чтобы коэффициент корреляции с идеальным сигналом составлял порядка 0,3.

Таким образом, при увеличении количества пакетов возрастает роль «некорректно» восстановленных сигналов. Уменьшение эффективности восстановления сигналов также объясняется появлением некоторого сдвига фаз между восстановленным и идеальным сигналами, что сказывается на значении коэффициента корреляции. Возможно, данный эффект объясняется работой [11].

Табл. 1

Коэффициент корреляции между идеальным и восстановленным сигналом	Число «пакетов»			
	1	2	3	4
$r (y_{\sin} - Y_{\sin})$	$0,75 \pm 0,08$	$0,78 \pm 0,06$	$0,94 \pm 0,04$	$0,93 \pm 0,02$
$r (y_{\text{puls}} - Y_{\text{puls}})$	$0,77 \pm 0,09$	$0,90 \pm 0,06$	$0,88 \pm 0,03$	$0,79 \pm 0,02$

Выводы

1. Алгоритм адаптивного выбора порога для стохастического резонанса целесообразно основывать на низкочастотной составляющей исходного зашумленного сигнала.
2. Разработанный алгоритм восстановления сигналов с большим ожидаемым коэффициентом корреляции позволяет более чем в 3 раза увеличить соотношение сигнал/шум.
3. При увеличении количества «пакетов», несущих одну и ту же информацию (более трех) наблюдается смещение фаз между восстановленным и идеальным сигналом и уменьшение соответствующего коэффициента корреляции.

Литература

1. Климантович Ю. Л. Что такое стохастическая фильтрация и стохастический резонанс / Ю. Л. Климантович // УФН. – 1999. – Т. 169, № 1. – С. 39-47.
2. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка / [В. С. Анищенко, А. Б. Нейман, Ф. Мосс, Л. Шиманский-Гайер] // УФН. – 1999. – Т. 169, № 1. – С. 7-38.
3. Simonotto E., Riani M., Seife C., Roberts M., Twitty J., Moss F. Visual perception of stochastic resonance // Phys. Rev. Letters. – 1997. – Vol. 78, No. 6 – P. 1186-1189.
4. Ефремов Е. В. Передача информации с помощью динамического хаоса. Генерация и разделение сигналов : автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М. – 2003 г.
5. Stocks N. G. Suprathreshold stochastic resonance in multilevel threshold systems // Phys. Rev. Letters. – 2000. – Vol. 84, No. 11. – P. 2310-2313.
6. Гудыма Ю. В. Влияние внешнего шума на оптический тепловой пробой полупроводниковой пластины / Ю. В. Гудыма // ЖТФ. – 1997. – Т. 67, № 9. – С. 117-119.
7. Stoop R., Buchli J., Keller G., Steeb W.-H. Stochastic resonance in pattern recognition by a holographic neuron model // Phys. Rev. E. – Vol. 67. – P. 061918-1 - 061918-6.
8. Кальянов Э. В. Взаимодействие колебаний в автостохастической системе / Э. В. Кальянов // ЖТФ. – 2000. – Т. 70, вып. 10. – С. 135-137.
9. Никитин А. П. Когерентный резонанс в замкнутой цепочке ждущих мультивибраторов / А. П. // Письма в ЖТФ. – 2001. – Т. 27, вып. 21. – С. 43-47.
10. Бурлак Г. Н. Стохастический резонанс и самоорганизация при параметрическом взаимодействии / Г. Н. Бурлак // Письма в ЖТФ. – 1994. – Т. 59, вып. 9. – С. 625-629.
11. Короновский А.А. Временное запаздывание между неустойчивыми периодическими орбитами связанных хаотических осцилляторов / А. А. Короновский, М. К. Куровская, А. Е. Хмаров // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31, вып. 3. – С. 60-66.