

УДК 004.942, 004.042, 004.021

Оптимизация стохастического резонанса для выделения сигнала

Видьманов Д. А., аспирант

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»*

*Научный руководитель: Петросян О. Г., к.т.н., доцент,
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,
кафедра «Информационные системы и телекоммуникации»,
bauman@bmstu.ru*

Введение

Выделение сигнала в канале связи на фоне помех - один из разделов статистической теории связи [1]. Ниже приведена типичная задача теории выделения сигналов.

Переданный сигнал $S(t)$, случайная или неслучайная функция известной структуры, превращается в принятый сигнал: $x(t) = V(s, n)$, где $n(t)$ – случайный процесс (шум), а V (канал связи) – некоторый оператор, преобразующий пару (s, n) в принятый сигнал $x(t)$. Чаще всего предполагается, что шум действует на сигнал аддитивно: $x(t) = s(t) + n(t)$

Задача выделения полезного периодического сигнала в канале связи может быть реализована при помощи подшумливания, при этом используются свойства эффекта, открытого в конце XX века, именуемого как «Эффект Стохастического Резонанса».

В 1981-1982 гг. на основе исследований модели бистабильного осциллятора был введен термин «стохастический резонанс» [2]. Впоследствии, эффект СР был открыт в оптической бистабильной системе авторами работы [3]. Суть эксперимента заключалась в следующем: на вход нелинейной системы подавались гармонический сигнал и шум, а на выходе системы измерялась зависимость отношения сигнал/шум SNR_{out} от интенсивности шума D на входе. Было установлено, что зависимость SNR_{out} от D ведёт себя аномальным образом, т.е. имеет локальный максимум при некоторой интенсивности D_0 входного шума. В итоге в спектре мощности выходного сигнала регистрируется δ -пик на частоте модуляции и ее нечетных гармониках (в случае симметричного потенциала).

Таким образом, эффект СР может иметь практическое применение для выделения полезного периодического сигнала. При этом необходимо обеспечить некоторую оптимальную интенсивность D_0 шума на входе в нелинейную систему.

Слово "Стохастический" означает относящийся к области хаоса, к беспорядочному поведению, к процессу, динамика которого случайна и непредсказуема. То есть, реализация эффекта осуществляется при участии случайного процесса – шума.

Характеристики и условия существования эффекта СР

Недавно было осознано, что явление СР совершенно общего плана, и оно может возникать и в системах, отличных от бистабильных. Главное требование – это наличие какого-либо порога. Примером такой системы может служить потенциал, изображенный на рис.1. В этом случае переключения происходят не между двумя устойчивыми положениями равновесия, а между "основным" и "возбужденным" состояниями системы.



Рис. 1. Моностабильная система с возбуждением

Одной из основных характеристик эффекта СР является отношение сигнал/шум (SNR) импульсной функции (реакции моностабильной системы на входное периодическое воздействие в присутствии белого шума) на частоте слабого периодического сигнала.

Отношение сигнал/шум (SNR) определяется как отношение спектральных плотностей мощности сигнала и шума на частоте сигнала [4]. В проекте использовано определение SNR , принятое в радиотехнике как отношение энергии сигнала к энергии шума P_s/P_n . При гармоническом сигнале на входе такому определению в эксперименте отвечает отношение высоты спектральной линии сигнала модуляции (H_s) над шумовым основанием к высоте шумового основания (H_N) спектра выходного сигнала [5] (рис.2).

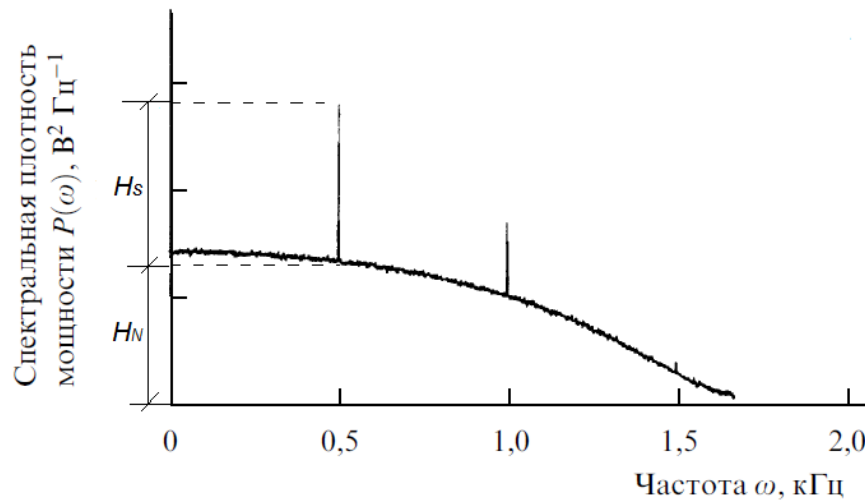


Рис. 2. Вычисление SNR по спектру на частоте сигнала

Таким образом, определим формулу нахождения SNR для экспериментально полученного спектра сигнала:

$$SNR_{\text{exp}} = \frac{H_S}{H_N},$$

Данная формула будет использована также для экспериментальной оценки SNR_{out} принятого из канала связи сигнала, чтобы впоследствии оценить эффективность системы. Оценка эффективности заключается в сравнении качества реакции системы с качеством принятого необработанного сигнала.

Формула эффективности системы:

$$Eff = \begin{cases} \frac{SNR_{IF} - SNR_{out}}{SNR_{out}} \cdot 100, & SNR_{IF} > SNR_{out} \\ 0, & SNR_{IF} \leq SNR_{out} \end{cases},$$

где SNR_{IF} – отношение сигнал/шум импульсной функции на частоте периодической составляющей, SNR_{out} – отношение сигнал/шум принятого из канала связи необработанного сигнала.

Определим необходимые и достаточные условия существования эффекта стохастического резонанса, чтобы сформулировать ТЗ для создания системы [4]:

- Эффект реализуется в нединамических пороговых системах и динамических бистабильных и моностабильных системах
- Характеристики и свойства СР должны зависеть от структуры сигналов, воздействующих на нелинейную систему

- Сигнал модуляции может быть гармоническим или многочастотным, а может представлять собой узкополосный случайный процесс
- В отсутствие шума амплитуды периодического сигнала недостаточно для достижения порога чувствительности моностабильной или бистабильной системы
- Шумовой сигнал может по своим статистическим свойствам быть близким к белому шуму, а может иметь конечное время корреляции и ограниченный спектр

Формализация задачи оптимизации

В зависимости от условий, в которых функционирует система с откликом стохастической моностабильной системы на многочастотной периодический сигнал, могут быть сформулированы следующие задачи оптимизации:

1. Определение уровня интенсивности шума A_n в канале связи, соответствующего оптимальному состоянию эффекта СР на приёмнике, для заданных параметров полезного периодического воздействия на входе в канал связи и порога чувствительности МС.
2. Определение порога чувствительности МС, соответствующего оптимальному состоянию эффекта СР на приёмнике, для заданных параметров полезного периодического воздействия на входе в канал связи и интенсивности шума A_n в канале связи.

Оптимальный режим работы системы

Уникальность системы состоит в используемом способе выделения сигнала на фоне помех. Идея заключается в наращивании интенсивности аддитивного шума в канале связи (подшумливании) без изменения интенсивности полезного сигнала на входе в канал связи для достижения оптимального уровня реакции системы на приёмной стороне. Оптимальный уровень реакции системы должен выражаться в значениях показателей качества системы. Такими показателями качества могут быть как отношение сигнал-шум (SNR) выделяемого сигнала или реакции системы, так и значение эффективности системы. Эффективность системы выражается в выигрыше в значении SNR для обработанного сигнала по сравнению со значением SNR необработанного сигнала.

Далее, на рис. 3, приведены характеристики системы для двух различных методов оптимизации эффекта СР.

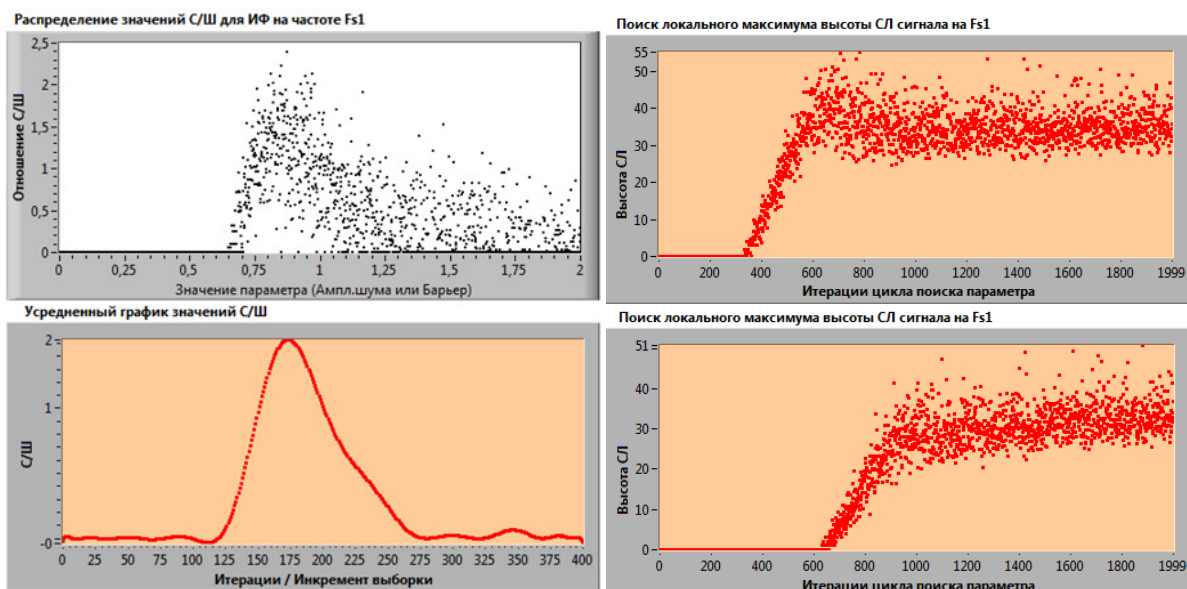


Рис. 3. Оптимизация по интенсивности шума (графики слева). Оптимизация по уровню порога чувствительности МС (графики справа)

Оптимизация по интенсивности шума A_n (графики слева на рис. 3) в канале связи приводит к наилучшим результатам моделирования при любых начальных условиях, и прекрасно иллюстрирует эффект СР.

Метод оптимизации по уровню порога чувствительности МС (графики справа на рис. 3) оказался работоспособным для значений порога чувствительности не больше трехкратного значения амплитуды чистого периодического сигнала на входе в канал связи.

Для полученных результатов использованы следующие параметры системы:

- Тип сигнала: сумма 2-х синусоид, $A_{s1} = 0.1$, $F_{s1} = 350$ Гц, $A_{s2} = 0.1$, $F_{s2} = 500$ Гц,
- Высота шумового основания: 80%,
- Порог чувствительности: 0.8,
- Границы поиска частоты: 300 Гц – 600 Гц,
- Параметры оптимизации: точность 0.001, интервал для поиска 2, поиск интенсивности шума в канале связи.

На рис. 4 представлен расчет эффективности системы для стохастического резонанса в системе.

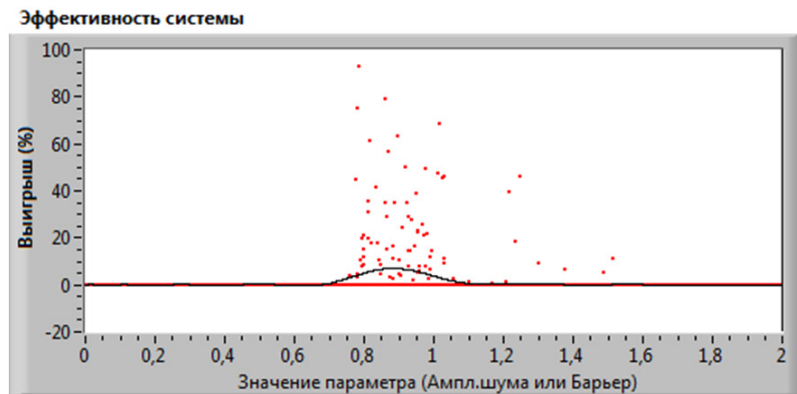


Рис. 4. Зависимость эффективности системы от уровня шума в канале связи

Выводы

Исследовано два метода оптимизации эффекта СР: по высоте спектральной линии импульсной функции и по значению отношения сигнал/шум импульсной функции на частоте периодической составляющей.

Проиллюстрированы результаты моделирования, на основе реальных параметров. Результаты моделирования показали, что для имеющегося инструментария LabVIEW максимальная эффективность системы соответствует значению отношения сигнал/шум принятого сигнала находящемуся в интервале от 0.04 (-14 дБ) до 0.07 (-12 дБ). Оптимальное состояние эффекта СР существует как для определенного значения интенсивности шума в канале связи, так и для определенного значения уровня порога чувствительности нединамической пороговой системы.

Список литературы

1. Фано Р. Передача информации. Статистическая теория связи. М.: Мир, 1965. 414 с.
2. Benzi R., Sutera A., Vulpiani A. The mechanism of stochastic resonance // J. Phys. A: Math. Gen. 1981. Vol. 14. L453–L457.
3. McNamara B., Wiesenfeld K., Roy R. Observation of stochastic resonance in a ring laser. Phys. Rev. Lett. 1988. Vol. 60. №25. P. 2626-2629.
4. Анищенко В.С., Нейман А.Б., Мосс Ф., Шиманский-Гайер Л. Стохастический резонанс как индуцированный шумом эффект увеличения степени порядка // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 1. С. 7-38.
5. Столбов М.Б. Алгоритмы оценки отношения сигнал/шум речевых сигналов // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 6 (82). С. 67-72.