УДК 621.37

# ДЕТЕКТИРОВАНИЕ B-FSK СИГНАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ТРИГГЕРА ШМИДТА

## А.А. АХУМЯН<sup>1</sup>, В.Ж. ТОВМАСЯН<sup>2</sup>, О.С. АРОЯН<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт радиофизики и электроники НАН Армении, Аштарак <sup>2</sup>Ереванский государственный университет, Армения

(Поступила в редакцию 25 января 2008 г.)

Изучена возможность детектирования B-FSK сигналов с помощью стохастического резонанса. Триггер Шмидта использован как бистабильный стохастический резонатор. Создана цифровая модель детектора, и получены количественные результаты работы посредством симуляций. Исследована зависимость вероятности правильно детектированных битов от добавляемого шума и от частоты среза использованного в детекторе ФНЧ фильтра. Выявлена также устойчивость детектора к фазовым смещениям, вводимым каналом.

#### 1. Введение

В настоящее время явление стохастического резонанса (СР), при котором отклик нелинейной системы на подпороговый малый периодический сигнал может быть улучшен с помощью шума, является хорошо изученным нелинейным эффектом [1,2] и проявляется во многих областях науки: в биологии, в оптике, нейронных сетях, в радиофизических системах и т.д.

Большой интерес представляет исследование СР в современных радиофизических задачах [3,4]. В радиофизических системах эффект СР, в основном, выявляется в бистабильных системах. С точки зрения передачи информации бистабильными системами в режиме СР основную роль играют исключительно переходы через барьер. Внутриямная динамика может не оказывать существенного влияния на процесс переключений. Поэтому при обработке выходного сигнала можно использовать метод динамики двух состояний. Тогда выходной сигнал представляется в виде телеграфного процесса, из которого путем фильтрации можно выделить составляющие основных частот [5].

В данной работе исследовано детектирование B-FSK (бинарная частотная манипуляция) модулированного цифрового сигнала с помощью СР. В модели детектора мы использовали тригтер Шмидта как систему двух состояний [6]. Приведено детальное описание рассматриваемого устройства и логики его работы. Критерием качества работы детектора выбрана вероятность *P* правильно детектированных битов. Выведена зависимость *P* от мощности добавляемого шума. Исследована также зависимость результативности такого детектора от фазового сдвига, введенного каналом.

## 2. Описание и логика работы устройства стохастического B-FSK детектора

Рассмотрим классическую систему передачи информации через информационный канал с потерями (рис.1).



Рис.1. Схема классической системы передачи информации через канал с потерями.

Источник цифровой информации передает в информационный канал с потерями В-FSK модулированный цифровой сигнал *S*(*t*):

$$S(t) = A\cos(2\pi f_n t + \varphi_n), \quad n = 1, 2$$

для  $(k-1)T \le t < kT$ , k = 1, 2, ..., где A – амплитуда модулированного сигнала, f и f – несущие частоты B-FSK модуляции,  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  – введенные каналом связи сдвиги фазы, соответственно, для несущих f и f, а T – длительность одного бита. Среда передачи принимается такой, что на вход приемника приходит настолько слабый сигнал, который на фоне шумов невозможно детектировать классическими приемниками. Для детектирования принятого слабого сигнала мы предлагаем использовать приемник со стохастическим резонатором, т.е. с нелинейным пороговым устройством, который состоит из триггера Шмидта,  $\Phi$ НЧ, счетчика пересечений сигнала с соответственно выбранным пороговым уровнем, а также логического устройства принятия решения и генерации выходного демодулированного сигнала. Следует отметить, что здесь  $\Phi$ НЧ – необязательный элемент, поэтому на рисунке мы его отделили от остальных элементов пунктирным квадратом (рис.2).



Рис.2. Схема B-FSK приемника со стохастическим резонатором, основанным на триггере Шмидта.

Рассмотрим детально каждый этап процесса демодуляции сигнала. На рис.За можно увидеть изначальную цифровую последовательность, которая была передана, и

соответствующую форму низкочастотного сигнала в виде импульсов для битовых единиц и нулевого уровня для нулей. В приемнике после принятия сигнала имеем подпороговый B-FSK модулированный сигнал  $S_1(t)$  (рис.36).



Рис.3. Формы сигналов на разных этапах детектирования.

Для детектирования сигнала к нему добавляем шумовой процесс N(t) и подаем эту смесь на вход триггера Шмидта (рис.3в). Получаем сигнал  $S_2(t)$  в виде телеграфного процесса (рис.3г). Далее сигнал  $S_2(t)$  фильтруется с помощью ФНЧ с частотой среза  $F_0$  и получается процесс  $S_3(t)$  (рис.3д). Фильтрованный сигнал  $S_3(t)$  передается в счетчик, где считываются пересечения в возрастающем направлении сигнала с данным уровнем  $A_0$ . При детектировании цифровых сигналов суть задачи состоит в правильном определении значения переданного бита (в общем случае символа), а не в точном восстановлении формы переданного сигнала, что было необходимо при принятии аналоговых сигналов. То есть, если пересчитать количество пересечений сигнала в одном направлении в течение длительности одного бита, то это число должно быть равным одной из несущих частот f и f. На последней стадии обработки полученное количество пересечений передается в логическое устройство, работающее на принципе максимального правдоподобия:

$$\begin{array}{ccc}
H_1 \\
|N_T(\mathfrak{Z})| & \gamma \\
H_2
\end{array}$$

Полученная цифра  $N_7(t)$  сравнивается с оптимальным порогом, который в случае B-FSK равен  $\gamma = (f_1 + f_2)/2$ . В зависимости от результата сравнения генерируется импульс соответствующего значения бита.

Необходимо отметить, что ключевую роль играет мощность добавляемого шума. При малом шуме процесс переключений очень медленный и на выходе фильтра получается выходной сигнал, форма которого показана на рис.4б. Очевидно, что такой сигнал не может быть правильно детектирован. При оптимальном уровне шума сигнал детектируется корректно (рис.4в). Постепенно усиливая шум на выходе триггера Шмидта, получаем сигнал с многочисленными переключениями. После фильтрации сигнал получается довольно слабым, так как большая часть энергии была сконцентрирована в отфильтрованных высокочастотных компонентах (рис.4г,д).



Рис.4. Виды фильтрированного сигнала  $S_0(t)$  для разных мощностей добавляемого шума: (б) 0.1; (в) 0.5; (г) 5.0; (д) 12. На рисунке а) представлен входной сигнал с амплитудой 1.5 В. Частоты несущих равны 4 Гц и 7 Гц, Порог равен 2 В, T = 1с,  $F_0 = 10$  Гц. Впоследствии неправильно детектированные биты показаны подчеркнутым фонтом.

#### 3. Результаты моделирования стохастического B-FSK детектора

На рис. 5 и 6 представлены графики зависимости вероятности правильно детектированных битов для различных значений амплитуд сигнала и частот несущих – 4 и 7 Гц, 40 и 60 Гц, соответственно.



Рис.5. Процент P правильно детектированных битов в зависимости от мощности шума для амплитуд входного сигнала 1,2 В, 1,5 В и 1,8 В, частоты несущих равны 4 Гц и 7 Гц, Порог равен 2 В, T = 1 с,  $F_0 \approx 10$  Гц.



Рис.6. Процент P правильно детектированных битов в зависимости от мощности шума для амплитуд входного сигнала 1,2 В, 1,5 В и 1,8 В. Частоты несущих равны 40 Гц и 60 Гц, порог равен 2 В, T = 1с,  $F_0 \approx 150$  Гц.

Для определенных значений интенсивности шума, более того, в некоторых случаях для диапазона интенсивности шумов, расположенного около оптимальной интенсивности, вероятность правильного детектирования достигает 100%. Очевидно, что чем ближе значение амплитуды сигнала к величине порога, тем меньше шума требуется для корректных переключений, а это означает, что P будет иметь высокое значение (рис.5 и 6).



Рис.7. Процент *P* правильно детектированных битов в зависимости от мощности шума для частот среза ФНЧ равных 50 Гц, 60 Гц, 80 Гц, 100 Гц, 150 Гц и  $\infty$  Гц, т.е. режим без фильтра. Амплитуда входного сигнала равна 1,8 В, частоты несущих равны 40 Гц и 60 Гц, порог равен 2 В, *T* = 1 с.

Из рис.6 видно, что при высоких значениях несущих частот эффективность детектора снижается. Этого следовало ожидать, поскольку высокое значение частоты сигнала требует добавления более "высокочастотного" шума. Наличие последнего дает большее число пересечений через порог в течение одного периода сигнала (сохраняется условие адиабатичности), что и обеспечивает высокое значение вероятности Р. При этом фильтр низких частот срезает также высокочастотные шумовые компоненты, что и приводит к снижению эффективности работы детектора. Отсюда следует, что частота среза низкочастотного фильтра должна быть намного больше несущей частоты сигнала. В этой связи на рис.7 представлены графики процента правильно детектированных битов в зависимости от мощности шума для различных значений частот среза ФНЧ фильтра. Как видно из рис.7, несмотря на то, что частоты несущих фиксированы, происходит снижение эффективности работы детектора при сближении частоты среза ФНЧ фильтра со стороны высоких частот к частотам несущих. Также видно, что по мере увеличения частоты среза ФНЧ процент правильно детектированных битов увеличивается и в наилучшем случае стремится к 100%, но в то же время сужается диапазон шума, при котором эффективность детектора остается высокой. Таким образом, при правильном выборе частоты среза ФНЧ можно получить эффективно работающий детектор для более широкого диапазона шумов, чем тот же детектор, но без ФНЧ.

#### 4. Зависимость работоспособности детектора от фазовых смещений канала

Для исследования устойчивости детектора к фазовым искажениям были проведены сравнения процента правильного детектирования битов для различных значений фазовых смещений.

Временная задержка, внесенная каналом, приводит к различным фазовым смещениям для разных несущих частот. Поскольку наш детектор принимает решение только на основе количества переключений триггера в течение длительности символа, временные смещения данных переключений в некотором допустимом интервале не влияют на точность принятия решения. Отсюда следует, что данный детектор довольно устойчив к фазовым искажениям, что также свидетельствует об эффективности и работоспособности нелинейных детекторов на основе триггера Шмидта.



Рис.8. Процент P правильно детектированных битов в зависимости от мощности шума для разных значений фазовых смещений. Амплитуда входного сигнала равна 1,8 В, частоты несущих равны 40 Гц и 60 Гц, порог равен 2 В, T = 1 с.

На рис.8 представлены зависимости процента правильно детектированных битов от мощности шума для различных фазовых смещений ( $\phi_1 \in [0; 5\pi/9]$ ,  $\phi_2 \in [0; 5\pi/6]$ ). Результаты моделирования совпали с теоретическими предположениями.

## 5. Заключение

Предложена новая модель нелинейного детектора для B-FSK модулированных сигналов на основе эффекта стохастического резонанса. Показан принцип работы, и представлена реализация нелинейного детектора с триггером Шмидта. Наглядно показана возможность регулирования работы детектора интенсивностью добавляемого шума. Результаты моделирования показали, что такой детектор работает стабильно для широкого

диапазона фазовых смещений, введенных каналом связи. В дальнейших работах будет изучена возможность детектирования M-FSK (многоуровневая частотная манипуляция) модулированных сигналов на основе этого подходом.

## ЛИТЕРАТУРА

- 1. L.Gammaitoni, P.Hanggi, P.Jung, F.Marchesoni. Rev. Mod. Phys., 70, 223 (1998).
- 2. F.Chapeau-Blondeau, X.Godivier. Phys. Rev. E, 55, 1479 (1997).
- 3. F.Chapeau-Blondeau. Phys. Rev. E, 55, 2016 (1997).
- 4. Y.Wang, L.Wu. Int. J. of Sig. Proc., 2, 108 (2005).
- 5. В.С.Анищенко, А.Б.Нейман, Ф.Мосс, Л.Шиманский-Гайер. УФН, 169, 7 (1999).
- 6. S.Fauve, F.Heslot. Phys. Lett., 97A, 5 (1983).

# B-FSK ԱՉԴԱՆՇԱՆՆԵՐԻ ԴԵՏԵԿՏՈՒՄԸ ՇՄԻԴՏԻ ՏՐԻԳԵՐԻ ՕԳՆՈւԹՅԱՄԲ

#### Ա.Ա. ՀԱԽՈՒՄՅԱՆ, Վ.Ժ. ԹՈՎՄԱՍՅԱՆ, Հ.Ս. ՀԱՐՈՅԱՆ

Ուսումնասիրված է ստոխաստիկ ռեզոնանսի միջոցով B-FSK ազդանշանների դետեկտման հնարավորությունը։ Որպես բիստաբիլ ստոխաստիկ ռեզոնատոր օգտագործվել է Շմիդտի տրիգերը։ Կառուցվել է վերը նշված դետեկտորի համակարգչային մոդելավորում, և այդ մոդելի միջոցով ստացվել են դետեկտորի աշխատանքի վերաբերյալ քանակական արդյունքներ։ Հետազոտվել է բիտի Ճիշտ դետեկտման հավանակության կախվածությունը ավելացված աղմուկի հզորությունից և, նաև, ցածր համախային ֆիլտրի թողարկման համախությունների շերտից։ Ուսումնասիրված է նաև ընդունիչի աշխատունակության կախվածությունը կապուղու կողմից մտցված փուլային շեղումներից։

# DETECTION OF B-FSK SIGNALS, USING SCHMIDT'S TRIGGER

# A.A. HAKHOUMYAN, V.Zh. TOVMASYAN, H.S. HAROYAN

We examine the possibility of B-FSK signals detection, using stochastic resonance. As a bistable stochastic resonator Schmidt's trigger is proposed. A mathematical model of the above-mentioned detector was designed and detector's work results was gained. We investigate the dependence of correctly detected bits on the added noise power and, as well, on the lowpass filter cutoff frequency. The influence of phase shifts brought by the information channel is also studied.