

Низкочастотный шум - универсальный детектор слабых воздействий

А.Г.Пархомов

Показана высокая чувствительность низкочастотного $1/f$ -шума к слабым внешним воздействиям и приведено обоснование его использования для регистрации дистанционного воздействия человека. Сформулированы условия создания универсального детектора слабых воздействий.

Отношение сигнал/шум считается важнейшим показателем, характеризующим качество измерительных приборов. С этой точки зрения установки, использованные для индикации дистанционного воздействия человека (полупроводниковые генераторы низкочастотного шума, экранированные микрокалориметры, система с электрогенерирующей рыбой [7,с.65-87]), плохие: откликом их на воздействие является не появление качественно отличного от шума сигнала, а изменение параметров самого непрерывно регистрируемого шума. На первый взгляд изменение характера шума при разнообразных слабых воздействиях выглядит странным, т.к. обычно шум представляется чем-то вроде совершенно неуправляемого хаотического теплового движения молекул и поэтому "шумовой детектор" кажется пригодным разве что для измерения температуры.

Это правильно, но только в отношении так называемого "белого шума", который давно и всесторонне изучен, а потому и широко известен. Но в природе широко распространен и принципиально другой вид шума - $1/f$ -шум (другие названия: фликкер-шум, избыточный шум), о который "поломало зубы" не одно поколение теоретиков [1,2]. Всем знакомым примером "белого шума" является звук дождя. А флуктуации количества осадков за длительное время - это уже пример $1/f$ -шума. Закономерности "белого шума" определяются статистикой независимых одиночных событий (например, ударов капель дождя или прохождением носителей заряда). В противоположность "белому шуму", $1/f$ -шум - это флуктуации интенсивности процессов в некоторой сложной системе. Так, осадки (интенсивность которых сильно и нерегулярно меняется, т.е. обладает свойствами шума) являются одним из проявлений процессов, происходящих в сложнейшей системе, компонентами которой являются Солнце, атмосфера и гидросфера Земли, рельеф местности и многое другое. Возникновение $1/f$ -шума в полупроводниковых приборах связано со сложными процессами взаимодействия носителей заряда с различными дефектами кристаллов. Характерная особенность $1/f$ -шума отражена в самом его названии: спектральная плотность его мощности (мощность шума в единичном интервале частоты) возрастает с понижением частоты f по закону, близкому к $1/f$, в отличие от "белого шума", у которого спектральная плотность от частоты не зависит. Очевидно, на достаточно низких частотах $1/f$ -шум должен преобладать над "белым шумом". У полупроводниковых приборов, например, преобладание $1/f$ -шума наблюдается на частотах ниже 1000Гц.

В природе имеется множество очень разных процессов, спектр флуктуаций параметров которых близок к виду $1/f$. Такой спектр имеют и шум различных электронных приборов в области низких и инфранизких частот, и землетрясения, и грозы, и изменения уровня рек, и ряд проявлений солнечной активности, и флуктуация периода сердцебиения человека, и альфа-волны на электроэнцефалограммах, и вариации разности потенциалов на нейромембранах [1,с.149]. Наиболее детально экспериментально исследован электрический $1/f$ -шум: зависимость спектральной плотности от частоты типа $1/f^n$ прослежена до частот порядка 10^{-7} Гц, причем почти всегда значение n лежит в пределах от 0,8 до 1,2 [2,с.160].

Почему для процессов самой разной природы характерен закон, близкий к $1/f$? Ответ может быть дан из общих соображений. $1/f$ -систему можно представить совокупностью элементов, в каждом из которых происходит постепенное накопление энергии, подводящее элемент к неустойчивому состоянию. В некоторый момент состояние элемента резко

меняется, накопленная энергия высвобождается (происходит "разряд"), после чего начинается новый цикл накопления-разрядки. Чем реже происходят разряды, тем больше энергии накапливается. Закон $1/f$, в сущности, и означает, что в данной системе частота, с которой происходит какое-либо событие, обратно пропорциональна энерговыделению при этом событии. Например, толчков землетрясений с энерговыделением от $1,8 \cdot 10^{15}$ Дж до $8 \cdot 10^{15}$ Дж происходит в среднем 14,9 в год, а с энерговыделением от $1,0 \cdot 10^{16}$ Дж до $4,4 \cdot 10^{16}$ Дж - 3,1 в год [3].

Заметим, что одинаковость скорости накопления энергии для всех элементов системы не требуется. Разобьем всю систему на группы элементов, в которых скорость накопления примерно одинаковая. Если спектральная плотность мощности шума i -й группы элементов имеет вид $S_i = a_i/f$, то для всей системы $S = \sum S_i = \sum a_i/f$, т.е. закон $1/f$ остается в силе.

Рассмотрим систему, состоящую из N элементов, каждый из которых имеет частоту разрядов f_i . Значения f_i лежат в пределах от f_1 до f_N , причем интервалы между значениями f_i одинаковы. Энергию разряда i -го элемента обозначим E_i . Пусть скорость накопления энергии у всех элементов одинакова, тогда $E_i = a/f_i$, где a - константа. Если разряды происходят независимо, интервалы между ними случайны: система генерирует $1/f$ -шум.

Примером системы такого типа является набор плоскостей, поставленных с различными наклонами, на которые равномерно падает снег. В зависимости от угла наклона частота сползаний накапливающегося снега меняется в очень широких пределах, причем масса сползающего снега обратно пропорциональна частоте (приблизительно так происходит накопление снега и образование снежных лавин в горах).

Важной особенностью рассматриваемой системы является то, что ее элементы находятся во "взведенном", неравновесном состоянии, причем некоторая часть их близко подходит к критической точке, после достижения которой происходит "разряд". Для этих элементов достаточно очень слабого толчка, чтобы разряд произошел преждевременно. Для рассмотренного примера с наклонными плоскостями таким толчком может быть встряхивание, порыв ветра, резкий звук и т.д.

"Стимулированный" разряд имеет практически такие же параметры, как и разряды "самопроизвольные", и выделить его на общем фоне невозможно. Однако, если толчок испытывает **вся** система, на него откликнется множество элементов, находящихся на подходе к критической точке, и в короткое время в системе произойдет выделение энергии, значительно превосходящее обычное.

Оценим, при каких условиях суммарный стимулированный импульс можно выделить на фоне естественных флуктуаций. Обозначим через δ долю периода T цикла накопление-разряд, когда i -й элемент достаточно чувствителен, чтобы разрядиться под действием некоторого внешнего воздействия. Чем меньше величина δ , тем на более слабые воздействия способен отреагировать элемент. Всего в результате воздействия разрядится $\delta \cdot N$ элементов, в которых, в среднем, выделяется энергия

$$\bar{E} = \frac{1}{N} * \sum_{i=1}^N a/f_i = \frac{a}{f_N - f_1} * \ln f_N/f_1 \quad (1)$$

Суммарная энергия стимулированного импульса:

$$E_{CT} = \delta N \bar{E} = \frac{\delta N a}{f_N - f_1} \ln f_N/f_1 \quad (2)$$

Пусть к системе подключено регистрирующее устройство, отклик которого пропорционален энергии разряда: $U_i = kE_i$. Для рассмотренного примера с наклонными плоскостями таким устройством может быть микрофон, регистрирующий звук ударов срывающегося с плоскостей снега. Откликом регистратора на стимулированный импульс

будет, в соответствии с (1) и (2),

$$U_{CT} = kE_{CT} = \frac{k\delta N a}{f_N - f_1} \ln \frac{f_N}{f_1} \quad (3)$$

Наряду со стимулированным импульсом, будут регистрироваться и самопроизвольные разряды, отклик на которые $U_{сам}$ лежит в пределах от ka/f_N до ka/f_1 . Так как величина f_1 может быть очень малой, амплитуда некоторых "самопроизвольных" импульсов может быть значительной. Для надежного отделения U_{CT} от $U_{сам}$ необходимо, чтобы было выполнено условие

$$\frac{U_{CT}}{U_{сам}(f_1)} = \frac{\delta N f_1}{f_N - f_1} \ln \frac{f_N}{f_1} \gg 1 \quad (4)$$

или

$$N \gg \frac{f_N - f_1}{\delta f_1 \ln(f_N/f_1)} \quad (5)$$

Оценим величину N , считая $\delta=0,01$ и $f_N=1000$ Гц (примерная частота начала преобладания 1/f-шума над "белым" шумом в полупроводниковых приборах). Величина f_1 , как показывают эксперименты, может быть очень малой ($<10^{-7}$ Гц). Однако, если продолжительность опыта не очень большая (около 1000 секунд), вероятность появления импульсов, соответствующих $f_1 < 10^{-5}$ Гц, невелика. Поэтому для оценочных расчетов положим $f_1=10^{-5}$ Гц. Подставив принятые значения δ , f_N и f_1 в (5), получим $N \gg 5 \cdot 10^8$.

Итак, необходимым условием для того, чтобы рассмотренная 1/f-система имела высокую чувствительность к внешним воздействиям является достаточно большое количество активных элементов. В полупроводниковых приборах им соответствуют дефекты кристаллической структуры, которые, в основном, локализованы вблизи поверхности. Наибольшее влияние поверхностные явления оказывают на работу сплавных биполярных и МОП-полевых транзисторов, а также приборов из поликристаллических полупроводников (фото- и терморезисторов). Не случайно, что именно в генераторах шума на основе **таких** полупроводниковых приборов наблюдались эффекты, связанные с дистанционным воздействием человека, а также космические ритмы. В аналогичных устройствах с полупроводниковыми приборами других типов (планарные транзисторы, полевые транзисторы с p-n переходами, стабилитроны) подобные эффекты не наблюдали. Повидимому, это связано с недостаточно большой величиной N в этих приборах.

Таким образом, рассмотрение даже простейшей системы независимых "накопителей" энергии, генерирующей 1/f-шум, обнаруживает ее высокую чувствительность к внешним воздействиям при достаточно большом количестве активных элементов. Реальные 1/f-системы, конечно, значительно сложнее: в них проявляется нелинейность, многочисленность состояний, взаимодействие элементов, возникают цепные и лавинные процессы. Разнообразные интереснейшие явления, происходящие в неравновесных системах ("активных средах"), изучает неравновесная термодинамика [4,5,6] Наиболее важные из них: возникновение упорядоченных структур (например, автоволн), а также процессы типа "хищник-жертва" и "блуждание по странному аттрактору". Теоретическое рассмотрение двух последних процессов показывает, что они приводят к сильным флуктуациям параметров системы, которые легко подстраиваются под ритмы внешних воздействий (даже очень

слабых). Пример такой подстройки - колебание численности рысей и зайцев с 11-летним циклом солнечной активности [5,с.53].

Если систему с неравновесными процессами такого типа заэкранировать от наиболее сильнодействующих факторов, станет заметной "подстройка" процессов к иным воздействиям, которая ранее была неразличима. Например, помещенная в электромагнитный и тепловой экран, неравновесная система станет откликаться на воздействия (пусть даже очень слабые), которые экран не задерживает. Это могут быть воздействия обычного типа, например, квазистатическое магнитное поле или вибрация. Но вполне возможно и воздействие агентов, исследование которых только начинается или вообще неизвестных. Экспериментальным подтверждением справедливости такого подхода к экранированным неравновесным системам является возрастание по мере улучшения качества электромагнитной и тепловой экранировки отчетливости проявления в "шумовых" детекторах и микрокалориметрах эффектов, связанных с дистанционным воздействием человека, а также космических ритмов [7].

Итак, объяснение эффектов, наблюдаемых в 1/f-системах, следует искать в неравновесной термодинамике. Но трудности на этом пути значительны - они связаны как с недостаточной разработанностью самой неравновесной термодинамики, так и со сложностью и многообразием процессов, происходящих в 1/f-системах.

Литература

1. Букенгем М. Шумы в электронных приборах и системах. Пер.с англ.-М.:Мир,1986.
2. Бочков Г.Н., Кузовлев Ю.Е. Новое в исследованиях 1/f-шума. УФН, 1983, т.141, вып.1, с.151-176.
3. Эйби Дж.Землетрясения. Пер.с англ.-М.:Недра,1982,с.249.
4. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса.Пер.с англ.- М.:Прогресс,1986.
5. Осипов А.И. Самоорганизация и хаос.-М.:Знание,1986,сер."Физика",No.7.
6. Шелепин Л.А. Вдали от равновесия.-М.:Знание,1987,сер."Физика",No.8.
7. Материалы экспериментальных исследований физических полей человека. НТО РЭС им.А.С.Попова. Москва,1987,вып.1.