Московский Государственный Университет имени М.В.Ломоносова

НИИ Ядерной Физики имени Д.В.Скобельцына

С.Г.Басиладзе

Пороговые ограничения, вносимые приемником в тракт передачи сигналов

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006-4/803

Москва 2006

УДК 519.72 + 539.12

S.G.Basiladze

E-mail address: basilad@monet.npi.msu.ru

“The threshold restrictions brought by the receiver in a path of signaling”

Preprint NPI MSU – 2006-4/803

Abstract:

The influence of sensitivity, speed and noise of the receiver on amount of the information registered by it is considered in the paper. As a basis for the analysis the generalized function block-diagram of the recording instrument. It is shown, that insufficiency of speed derivates so-called threshold information restriction where a threshold of registration is the size of action. The border of trimming of classical thermal noise because of presence of an information threshold is found.

С.Г.Басиладзе

“ Пороговые ограничения, вносимые приемником в тракт передачи сигналов”

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006-4/803

Аннотация:

В работе рассматривается влияние чувствительности, быстродействия и шума приемника на количество регистрируемой им информации. Основой для анализа служит обобщенная функциональная схема регистратора сигналов. Показано, что недостаточность быстродействия порождает так называемое пороговое информационное ограничение, где порогом регистрации является величина действия. Найдена граница обрезания классического теплового шума из-за наличия информационного порога.

© НИИ Ядерной Физики им.Д.В.Скобельцина МГУ, 2006.
© Басиладзе С.Г.

Введение

Как хорошо известно, канал передачи информации включает в себя передатчик, передающую среду и приемник сигналов. Информационная пропускная способность любого реального канала передачи должна быть ограничена. Действительно, согласно формуле Шеннона [1] ее ограничивает логарифм отношения мощности сигнала к средней мощности шума в канале: $P_S/\langle P_N \rangle$. Мощность сигнала есть ограничение “сверху”, т.е. **предел**, обусловленный физическими характеристиками передатчика. Уровень шума задает ограничение “снизу”; чаще всего шум определяется физическими особенностями передающей среды либо приемника, хотя определенный шум может быть и в передатчике.

Формула Шеннона подтверждается в большом количестве реальных трактов передачи сигналов и нет оснований сомневаться в ее правильности. Однако, в ней очевидным образом отсутствуют характеристики приемника, которые также *должны* влиять на темп передачи информации по каналу связи. Прежде всего, это относится к чувствительности приемника и, разумеется, к его быстродействию. Для того, чтобы представить каким образом приемник может ограничивать информационную пропускную способность необходимо выяснить следующие вопросы:

1) понять, как выглядит обобщенная функциональная схема приемника аналоговых сигналов и какими параметрами в ней определяются быстродействие и чувствительность;
2) найти условия, при которых основным ограничивающим фактором является не шум, а другие характеристики приемника сигналов.
3) свести все влияющие на прием информации факторы к одному параметру, который бы играл ту же роль, что и мощность шума в формуле Шеннона;

Настоящая работа посвящена анализу и решению этих вопросов.

Первой задачей, которая встает на указанном пути, является определение понятия *чувствительности* приемника. В установившейся практике оно весьма неоднозначно и часто вводится формальным образом. Например, чувствительностью называют порог приемника *по амплитуде* сигнала. Если принять это определение, то тогда не совсем понятно, почему в формуле Шеннона фигурирует *квадрат* амплитуды, т.е. мощность (см. первый абзац). Это явно указывает, что порог следует сопоставлять с *уровнем энергии*, которую приемник должен получить по входу. Ясно, что наиболее правильным будет то определение, которое наиболее полным образом отражает *физические принципы* работы приемника. В работе показано, что обобщенной величиной **порога** приемника, учитывающей как его чувствительность, так и быстроту, является величина *действия*.

Пороговые ограничения при регистрации сигналов

Проанализируем работу приемника, как "нуль-органа", т.е. его способность отличать наличие сигнала от его отсутствия или способность

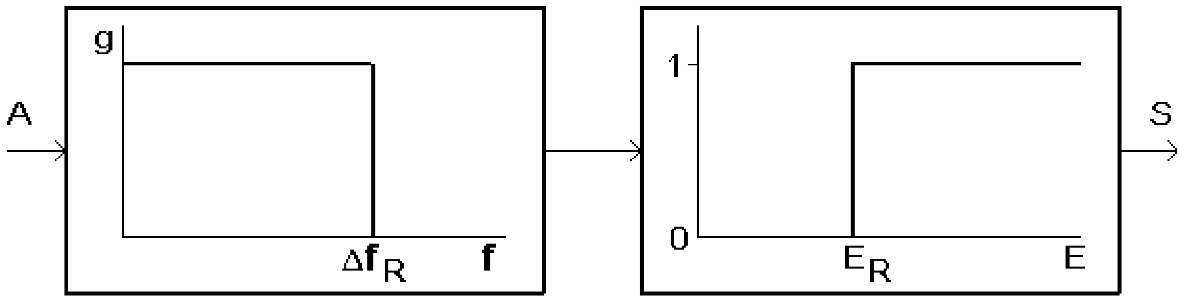

Рис.1. Обобщенная функциональная схема логического регистратора отклонений сигнала: A - аналоговый вход, S - логический выход; первое звено - фильтр гармоник $f>f_R$, второе звено - дискриминатор по энергии на уровне E_R.

Величины Δf_R и E_R определяют пороговую постоянную регистратора: $H_R = E_R / 2\Delta f_R$, которая равна квадрату спектральной плотности амплитуды нулевой гармоники - g_0^2 порогового входного сигнала или квадрату его площади.

отличить один сигнал от другого.

Обобщенная функциональная схема регистратора. Устройство конкретных приборов, регистрирующих сигналы, может быть самым разным, но все они имеют два общих и принципиальных свойства:

а) любой регистратор воспринимает конечный по ширине спектр гармоник сигнала - Δf_R, остальные высшие гармоники фильтруются (бесполезны);

б) для срабатывания регистратора ему необходимо получить от сигнала определенную энергию - E_R.

Следовательно, обобщенная функциональная схема регистратора отклонений сигнала может быть представлена в виде двух последовательных звеньев: фильтра высших гармоник и дискриминатора по энергии, как это показано на рис.1.

В силу отмеченного в пунктах а) и б), область регистрации и возможные состояния сигналов удобней всего изображать на плоскости с координатами "энергия-быстродействие". Как следует из теоремы отсчетов [2], быстродействие может быть определено в обратных ширине полосы частот единицах - через интервал: $\delta t=1/2\Delta f$, показывающий в течение какого - *минимального* времени сигнал способен перейти из одного состояния в другое (в нашем случае это фронт или срез сигнала на выходе фильтрующего звена регистратора при ступенчатом сигнале на его входе). Ниже мы будем пользоваться плоскостью параметров [E, δt], хотя с равным основанием по оси ординат может быть использована и шкала частот: [E, Δf].

На плоскости параметров [E, δt] ограничение мощности передатчика P_S выглядит как прямая линия, проходящая через начало координат. На рис.2,а эта – *предельная* прямая помечена буквой P. На плоскости параметров [E, Δf] эта же предельная линия будет выглядеть как гипербола [3,4].

Рассмотрим теперь возможные режимы работы регистратора, которые определяются соотношением между быстротой сигнала и быстродействием самого регистратора.

"Быстрый" регистратор. Если сигнал имеет значительно меньшую ширину спектра, чем у приемника: $\delta t_S >> \delta t_R$ (или $\Delta f_S << \Delta f_R$), то он не фильтруется и целиком проходит во второе звено. В этом случае срабатывание регистратора определяется *текущей* величиной энергии сигнала и наступает сразу же, как только последняя становится больше E_R.

Тогда на плоскости параметров [E_R,δt_R] различаемые приемником состояния есть вертикальные линии, идущие с шагом E_R вплоть до предельной прямой – P (см. рис.2,а). Для сигнала с быстродействием δt_S, количество таких состояний: $n=E_{SP}/E_R$, где $E_{SP}=P*\delta t_S$. Соответственно, возможная плотность передачи информации во времени:

$$\Delta I_S / \delta t = \log[1 + (P*\delta t_S / E_R)] / \delta t_S, \qquad (1,а)$$

здесь дополнительная единица появляется из учета "состояния отсутствия" сигнала.

Информационный "приоритет времени над амплитудой". Как видно из

(1,а), при уменьшении δt_S, несмотря на то, что количество различимых

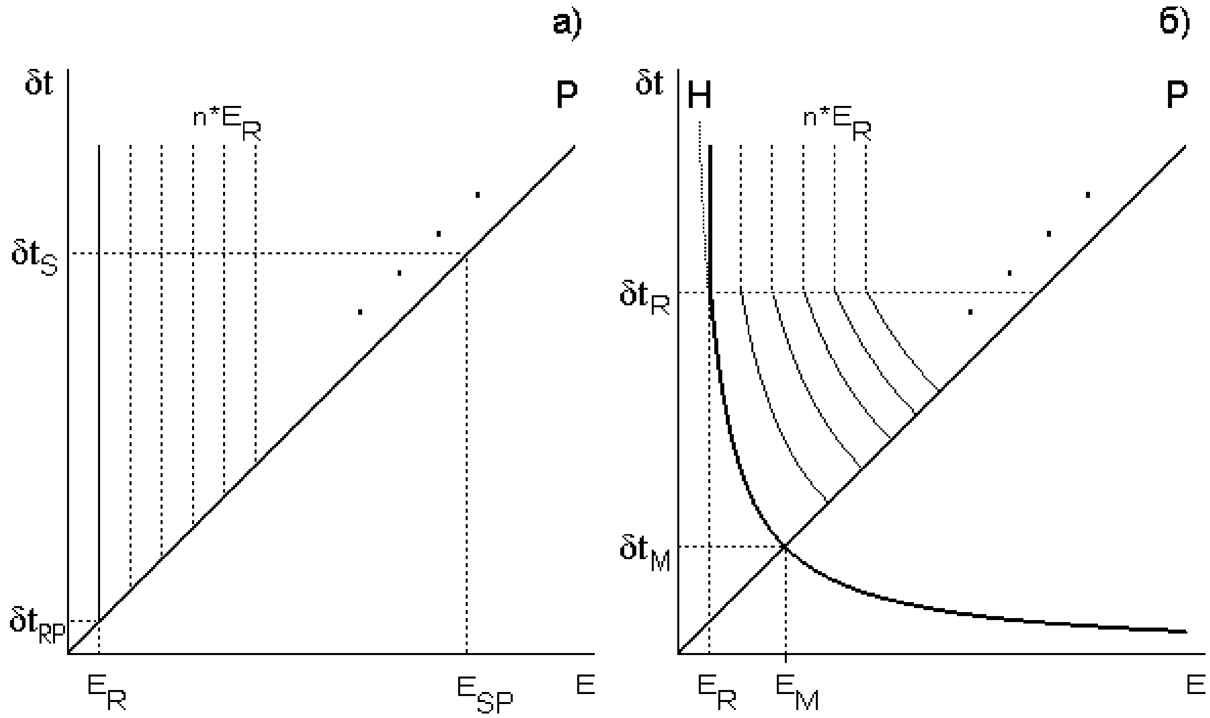

Рис.2. Информационные ограничения при практическом отсутствии шумов задаются сверху пределом мощности сигнала – P, а снизу зависят от быстродействия приемника:

а) если приемник “быстрый” ($\delta t_R << \delta t_S$), то он воспринимает $n=E_{SP}/E_R$ состояний в сигнале (плюс 0), при увеличении быстроты сигнала количество различимых состояний снижается, но темп передачи информации растет (снижении δt_S действует сильнее) и достигает максимума при $\delta t_S = \delta t_{RP} = E_R/P$;

б) если приемник “медленный” ($\delta t_R > \delta t_S > \delta t_M$), то ограничение снизу идет по пороговым гиперболам и число различимых состояний снижается, кроме того, приемник воспринимает информацию с темпом, определяемым δt_R, а не входным сигналом.

состояний снижается, возможная плотность передаваемой информации тем не менее возрастает (поскольку логарифм меняется медленнее, чем $1/\delta t_S$). Наибольшая плотность информации будет достигнута при повышении быстроты сигнала, т.е. снижении δt_S до величины $\delta t_{RP}=E_R/P$, где различаются только 2 состояния:

$$(\Delta I_S / \delta t)_{MAX} = \log[2]*P / E_R. \qquad (1,б)$$

Если сигнал сопоставим по ширине спектра с приемником, то на плоскости параметров $[E_R,\delta t_R]$ зона, где регистратор является "быстрым", а сигнал "медленным" лежит выше горизонтальной прямой, проходящей через точку δt_R на оси ординат - рис.2,б (штриховая линия).

“Медленный” регистратор. Если же сигнал имеет большую ширину спектра, чем приемник (выходит за пределы основной полосы частот последнего): $\delta t_S<\delta t_R$ (или $\Delta f_S>\Delta f_R$), то только часть энергии сигнала (содержащаяся в его нижних гармониках) пройдет во второе звено:

$$E_{REG} = (g_{LOW}^2 / 2) * \Delta f_R, \qquad (2,а)$$

здесь g_{LOW} - спектральная плотность амплитуды сигнала в области низших гармоник. Для реальных сигналов спектральная плотность амплитуды в области самых нижних гармоник практически постоянна, поэтому (2,а) эквивалентно условию

$$E_{REG} = g_0^2 * 2\Delta f_R, \qquad (2,б)$$

где $g_0=g_{LOW}/2$ – спектральная плотность амплитуды нулевой гармоники.
По мере роста Δf_S все большая и большая часть энергии сигнала будет отфильтрована, т.е. потеряна для регистрации. Как следствие, все больше и больше информации, содержащейся в коротких деталях сигнала, будет утеряно.

<u>Пороговое соотношение неопределимости</u>**.** Для регистрации короткого сигнала “воспринимаемая” энергия E_{REG} должна быть больше или равна E_R. Это можно записать в виде неравенства, вытекающего из (2,б):

$$g_0^2 \geq E_R / 2\Delta f_R, \qquad (3,а)$$

Это значит, что для коротких (для него) сигналов приемник имеет пороговую информационную постоянную

$$H_R = E_R / \Delta f_R = E_R * \delta t_R \qquad (3,б)$$

с размерностью <u>*действия*</u>.

Для сигнала величина g_0^2 есть квадрат его площади [2]; она также (3,а) имеет размерность действия, в данном случае это действие сигнала: $g_0^2=H_S$. Тогда пороговое условие принимает весьма простой вид:

$$H_S \geq H_R. \qquad (3,в)$$

Соответственно, область сигналов, *регистрируемых* медленным приемником, на рис.2,б будет располагаться справа от (пороговой) гиперболы, проходящей через точку $[E_R,\delta t_R]$, поскольку $E_S \approx g_0^2 * \Delta f_S = H_S/\delta t_S$.

Легко также видеть из рис.2,б, что условие (3,в) справедливо и для быстрого регистратора, поскольку вертикальная прямая E_R=const проходит *справа* от пороговой гиперболы - Н. Таким образом, условие (3,в) задает *обобщенный порог* приемника (точнее, является необходимым условием).

Интервал обнаружения порогового сигнала. Как видим, короткие (для приемника) сигналы все же могут быть зарегистрированы за счет роста их площади (квадрат площади сигнала - H_S должен быть больше H_R - квадрата "пороговой площади" [3]). Однако, медленный регистратор срабатывает не в интервале наличия сигнала, а заведомо *позже* - по прошествии интервала:

$$\delta t_R = H_R / E_R = 1 / 2\Delta f_R, \tag{4}$$

требуемого для "набора пороговой площади". Для чувствительных, но медленных регистраторов интервал обнаружения может быть достаточно большим. Хорошим примером является "регистрация" вспышки молнии глазом – сама вспышка длится доли микросекунды (но она очень яркая), а глаз воспринимает ее через десятки миллисекунд.

Биполярные короткие сигналы. Входной сигнал в интервале, меньшем δt_R, интегрируется приемником (поскольку величина $1/\delta t_R$ находится вне пределов спектральной полосы приемника). Если в интервале, меньшем δt_R, появится несколько входных сигналов, то для регистратора они будут суммироваться не по амплитудам огибающих, а *по площадям*.

Представим, что имеется короткий биполярный сигнал или два коротких одинаковых сигнала противоположной полярности, отстоящих на расстояние, *существенно меньшее* δt_R. В подобной паре оба сигнала не будут зарегистрированы, даже если они надпороговые (каждый имеет большую площадь), ибо их *суммарная площадь* в интервале обнаружения нулевая.

Количество "пороговых" состояний. Предположим, что сигнал несет только подпороговые "детали", тогда они, как и сам сигнал, будут потеряны при регистрации. Точно также не будут восприняты детали, лежащие между гиперболами Н и 2Н на рис.2 (хотя сам сигнал уже будет воспринят) потому, что невозможно определить *разность* между пороговым сигналом и сигналом, лежащим ниже гиперболы 2Н. Следующий "слой" неразличимости лежит в границах от 2Н до 3Н и так далее.

Следовательно, линии n*H (n - целое число) задают информационные *состояния сигнала* (начиная с порогового) и только они являются различимыми. На рис.2,б ограничиваемая пороговой и предельной асимптотами область, где реальный сигнал удовлетворяет информационным ограничениям, заполнена линиями (гиперболы), идущими с шагом Н.

Информационная пропускная способность. На пороговой гиперболе сигнал имеет только 2 состояния (он есть или его нет). Это значит, что на *каждом интервале* δt он может нести 1 бит информации, а на интервале $L*\delta t$ - L бит (независимо от того сколько раз он появился - один или L-раз).

При движении вправо по горизонтали от точки $[E_R,\delta t_R]$ до предельной прямой количество возможных состояний сигнала, как нетрудно убедиться, равно $n=(\delta t_R/\delta t_M)^2$, где $\delta t_M=\sqrt{H/P}$ есть ордината точки пересечения пороговой гиперболы и предельной прямой на рис.2,б.

Если сигнал становится быстрее ($\delta t_S<\delta t_R$), то количество состояний снижается до $n=\delta t_S*\delta t_R/\delta t_M^2$, соответственно, возможная плотность информации

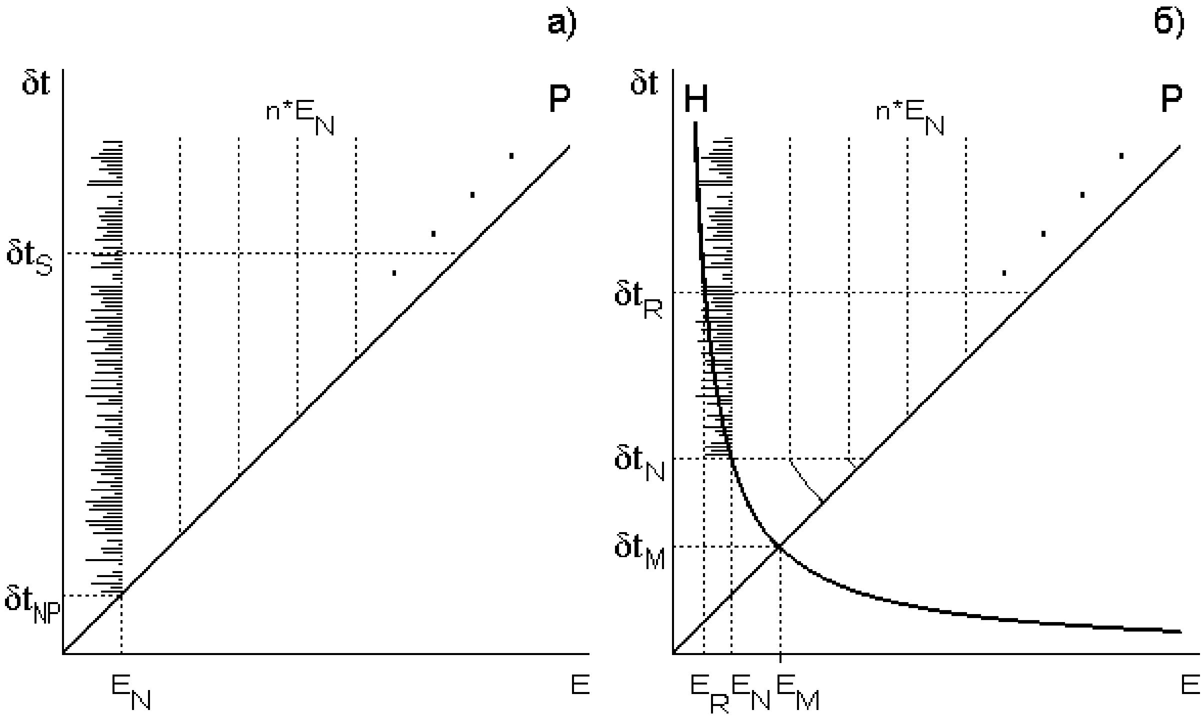

Рис.3. Информационные ограничения при подавляющем влиянии шумов задаются сверху пределом мощности сигнала – P, а снизу зависят от E_N шума и H приемника:

а) при пренебрежимо малых E_R и δt_R (весьма малом H) количество регистрируемых состояний определяется формулой Шеннона (7), а темп передачи информации зависит только от быстроты сигнала - δt_S (вплоть до $\delta t_S=\delta t_{NP}$);

б) если же приемник медленный, но чувствительный ($\delta t_R > \delta t_S$, но $E_R < E_N$), то шум действует вплоть до уровня порога - δt_N, а далее положение и количество регистрируемых состояний определяется гиперболами, идущими с шагом $H=E_R*\delta t_R$.

Ниже горизонтали δt_N рост быстродействия сопряжен с возрастанием энергозатрат на передачу одного бита информации.

во времени:

$$\Delta I_R / \delta t = \log[1 + (\delta t_S * \delta t_R / \delta t_M^2)] / \delta t_R. \quad (5)$$

В отличие от (1,а), значение δt в знаменателе (5) равно δt_R (потому, что на регистрацию сигнала тратится интервал δt_R). При уменьшении δt_S величина под знаком логарифма снижается, а знаменатель в (5) неизменен, в результате, информационная способность тракта передачи уменьшается.

Информационные ограничения, создаваемые шумом

Все известные физические носители сигналов обладают определенным уровнем шума, т.е. содержат некоторую неупорядоченную фоновую энергию.

Для электрических сигналов имеется два основных вида шумов: тепловой, средняя мощность которого [5]:

$$\langle P \rangle = 4k * T * \Delta f_N, \quad (6,а)$$

где k - постоянная Больцмана,

T - абсолютная температура,

Δf_N - полоса частот (индекс N от ‘noise’);

а также дробовой шум, порождаемый дискретностью носителей заряда, со средней мощностью [6]:

$$\langle P \rangle = 2e * \Delta U * \Delta f_N, \quad (6,б)$$

где e - заряд электрона,

ΔU - проходимая носителями разность потенциалов.

В обоих случаях параметром шума является некоторая величина энергии - E_N; для теплового шума это $4k*T$, а для дробового - $2e*\Delta U$. Из (6) ясно, что E_N это средняя энергия шумовой линии на "быстротном" интервале $\delta t_N = 1/2\Delta f_N$.

Если задаться "типовыми" значениями: $T=300^0$ K и $\Delta U=1$ В, то энергия теплового шума на интервале быстродействия будет равна: $E_N=1{,}6*10^{-20}$дж, а у дробового шума она будет выше в 19 раз. Поэтому при генерации сигналов ($\Delta U >> 1$ В) основной вклад дает дробовой шум, а при их приеме ($\Delta U << 1$ В) - тепловой.

Быстрый чувствительный регистратор. При постоянных условиях (T=const, ΔU=const) энергия E_N=const - постоянна, поэтому в обоих случаях на плоскости [E, δt] линия шума есть вертикальная прямая – рис.3,а (так же, как при приеме медленных сигналов - рис.2,а). На этой прямой средняя мощность $\langle P_N \rangle$ и среднее действие $\langle H_N \rangle$ не являются константами и определяются из уравнений, аналогичных (6,а,б):

$$\langle P_N \rangle / \Delta f_N = E_N = \langle H_N \rangle * \Delta f_N. \quad (7,а,б)$$

С учетом (7,а), для быстрого регистратора достаточно высокой чувствительности, по аналогии с (1,а) получаем формулу Шеннона [1]:

$$\Delta I_N / \delta t = \log(1 + (P / \langle P_N \rangle)) / \delta t_S. \quad (8,а)$$

Это вполне логично, поскольку именно размытость шумовой линии задает здесь ширину интервалов между вертикальными линиями состояний - $n*E_N$.

При увеличении быстроты сигнала возможная плотность передачи информации возрастает и наибольшая плотность будет достигнута, если δt_S снизить до величины $\delta t_{NP}=E_N/P$, где различаются только 2 состояния:

$$(\Delta I_N / \delta t)_{MAX} = \log[2]*P / E_N. \tag{8,б}$$

Медленный чувствительный регистратор. Если $\delta t_S<\delta t_R$ (или $\Delta f_S>\Delta f_R$), и $E_R<E_N$, то как видно из рис.3,б, картина в целом повторяет показанную на рис.2,б. Выше горизонтали δt_N линии состояний идут вертикально, а ниже – переходят в гиперболы, идущие с шагом $H=E_R*\delta t_R$. Заметим, что как и на рис.2,б, темп (частота) распознавания сигналов определяется величиной δt_R, т.е. может быть низкой по сравнению с возможной частотой входных сигналов - $2/\delta t_S$.

Граница классического шума. Пороговая постоянная приемника H зависит от его физических размеров: чем они меньше, тем она ниже. При переходе к “нанотехнологиям” неизбежно появится *природное* физическое ограничение на уменьшение величины H в виде постоянной Планка - h.

Как видно из рис.3,б, граница обрезания классического шума проходит по пороговой гиперболе, заменив ‘H’ на ‘h” получаем ограничение на полосу частот классического шума:

$$2\Delta f_N = E_N / h. \tag{9,а}$$

Для теплового шума $E_N=4kT$ (6,а), тогда условие обрезания можно записать в следующем виде:

$$h\Delta f_N / kT = 2. \tag{9,б}$$

Именно отношение $h\Delta f_N / kT$ входит, как обрезающий параметр, в известную формулу Планка [7] для нахождения верхней границы спектра *теплового излучения* (шума) в полости.

Для температуры $T=300^oK$ граница обрезания классического теплового шума находится на уровне: $\Delta f_N=1,3*10^{13}$ Гц. Этот диапазон частот всего на 2-3 десятичных порядка выше освоенного современной техникой передачи сигналов, поэтому он представляется достижимым в недалеком будущем. При $T=300^oK$ на границе обрезания энергозатраты на передачу информации составляют $1,6*10^{-20}$ Дж/бит, а мощность на входе приемника находится на уровне $4,2*10^{-7}$ Вт. Однако, ниже указанной границы (ниже δt_N на рис.3,б) энергия, затрачиваемая на каждый бит передаваемой информации, в силу наличия порога, должна существенно возрастать.

Регистрация микросигналов

Хотя это не входит прямо в задачу данной работы, остановимся кратко на регистрации сигналов в микромире, поскольку там в наиболее отчетливой форме проявляются пороговые ограничения. Рассмотрим случай когда “приемником” является частица, а сигналом – потенциальный барьер, с которым она взаимодействует.

<u>Квадратичная дельта-функция как подпороговый сигнал</u>. Обычная дельта-функция Дирака есть короткий сигнал, в процессе роста амплитуды и “обужения” которого сохраняется постоянной площадь и, как следствие,

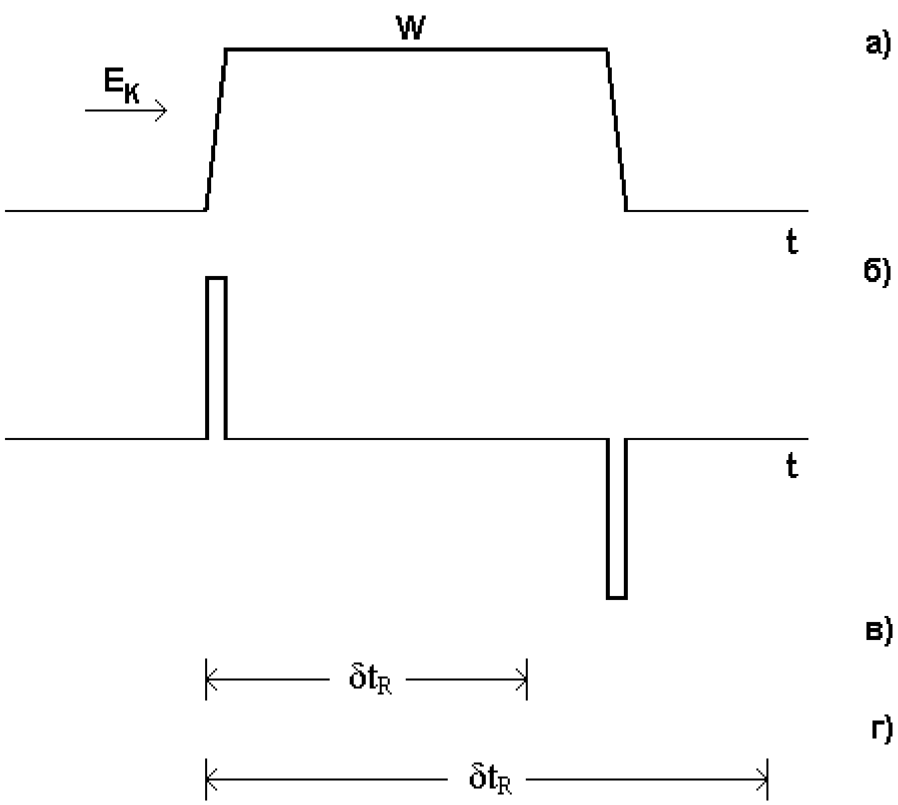

Рис.4. Взаимодействие частицы с потенциальным барьером – а) может в терминах теории сигналов быть представлено как считывание частицей информации на фронте и срезе барьера - б) о величине его энергии.

Если время регистрации меньше, чем продолжительность барьера – в), то частица затормозится; если же больше – г), то частица пройдет сквозь барьер (туннельный эффект).

величина его действия. Поэтому дельта-функция Дирака может быть как надпороговой (большая площадь), так и подпороговой (малая площадь).

Представим себе теперь, что процесс роста амплитуды и обужения идет при сохранении неизменной площади *квадрата огибающей*, т.е. энергии сигнала. Этот процесс соответствует на рис.2,б движению вертикально вниз из-за чего спектральная плотность амплитуды сигнала – g(f) постоянно снижается (тогда как у дельта-функции Дирака она постоянна), что неизбежно приводит к тому, что квадратичная дельта-функция становится *подпороговой*.

Классический шум представляет из себя совокупность случайно распределенных во времени квадратичных дельта-функций, именно поэтому он фильтруется по пороговому ограничению.

Потенциальный барьер как сигнал. Рассмотрим простейший случай, когда потенциальный барьер имеет "ступенчатую" форму, т.е. достаточно короткие перепады – рис.4,а. Эти перепады образуются двумя очень короткими сигналами – положительным (образует фронт) и отрицательным (образует срез барьера). Каждый сигнал является *квадратичной* дельта-функцией с энергией W, где W – высота потенциального барьера (рис.4,б,в).

Будем считать, что на барьер двигается частица с кинетической энергией $E_к$, меньшей чем W, т.е. в классической механике она должна остановиться по достижении фронта барьера. В микромире этого, однако, не происходит, т.к. получаемый частицей сигнал торможения (рис.4,б - слева) является подпороговым - его действие меньше 'h' (постоянной Планка). Физический мир устроен так, что действие *накапливается* при движении, поэтому через некоторое время (δt_R - время задержки на регистрацию первого сигнала) оно неизбежно достигнет порогового уровня. Это и будет момент реальной остановки частицы – рис.4,в (приведенное описание несколько упрощено, т.к. в действительности этот "момент" времени размыт и проявляется лишь как средняя величина, тем не менее, запаздывание - δt_R реально существует).

Сказанное можно выразить в виде порогового соотношения:

$$/E_к – W/ * \delta t_R \geq h \qquad (10,a)$$

здесь $/E_к–W/$ есть модуль разности между кинетической энергией частицы и значением потенциала. Численную величину δt_R можно сопоставить с полосой частот регистрации (рис.1): $\delta t_R=1/2\Delta f_R$. Для сравнения приведем еще раз полученное выше необходимое условие регистрации классического сигнала $H_S \geq H_R$ в следующем виде:

$$E_S * \delta t_S \geq H_R. \quad (10,б)$$

Как видим, оба эти условия, хотя и несколько отличаются по форме, по содержанию являются пороговыми *соотношениями неопределимости* и в их правой части фигурирует порог при приеме сигналов.

Если время регистрации δt_R окажется больше, чем продолжительность барьера – рис.4,г), то частица пройдет барьер насквозь (туннельный эффект), поскольку сигналы от перепадов разнополярные и их суммарная площадь в интервале δt_R нулевая (см. раздел “Биполярные короткие сигналы”).

Заключение

Абстрактный классический сигнал в принципе [4] способен нести бесконечное количество информации в каждом отсчете и интервал между отсчетами в нем может быть сколь угодно малым (при условии, что отсчеты не сильно разнятся по амплитуде). Для того, чтобы в тракте передачи количество информации было конечным должны существовать:

а) ограничение на количество состояний в каждом отсчете (ограничение на приращение и величину сигнала);

б) ограничение на малость интервала каждого отсчета (ограничение на быстроту).

Приемник обычно не вносит ограничений сверху на величину сигнала, чаще всего оно определяется передатчиком или передающей средой. Обобщенным *пределом* является максимальная мощность сигнала - P, поступающая на вход приемника.

Для идеального приемника (высокой чувствительности и неограниченного быстродействия) единственным ограничителем снизу является средняя мощность шума - $\langle P_N \rangle$ или, что то же, его характеристическая энергия E_N в полосе частот сигнала. Тогда возможная плотность передаваемой информации определяется формулой (8,б). Если быстрота приемника или входного сигнала ниже, чем отношение (средней) шумовой энергии E_N к пределу мощности P, то информационная пропускная способность заметно ниже и определяется формулой Шеннона (8,а).

При пренебрежимо малом уровне шума и быстром приемнике ограничителем снизу является его энергочувствительность - E_R (1,б). Если приемник медленный, то появляется дополнительное ограничение, задаваемой величиной δt_R. Информационная пропускная способность в этом случае определяется формулой (1,а), сходной с формулой Шеннона, где вместо средней шумовой мощности стоит отношение $E_R/\delta t_R$.

Наконец, последним возможным вариантом приема сигналов является такой, когда и чувствительность и быстродействие *совместно* ограничивают информационную пропускную способность тракта передачи сигналов. В этом случае *порогом* является уровень минимального действия приемника: $H_R=E_R*\delta t_R$. Пороговые ограничения особенно наглядны для пространственных сигналов, где роль абстрактной переменной ‘x’ играет не время, а координата.

Они появляются, например, при расфокусировании изображения на экране.

Пороговое ограничение влияет на прием одинаково как при наличии шума, так и при его отсутствии (поскольку шум в этой зоне интегрируется приемником). Шумовые ограничения являются более “мягкими” по сравнению с пороговыми. Если имеется возможность повторной передачи (повторного измерения) , то информацию *можно извлечь* из под шума. Из под порога этого сделать в принципе невозможно.

Имеется естественное ограничение на диапазон частот классического теплового шума, поскольку порог регистрации не может быть меньше, чем постоянная Планка. В области микромасштабов пороговое ограничение играет главную роль как в задании шага между различимыми состояниями, так и в возможном темпе передачи информации.

Количество состояний над уровнем естественного порога определяется пределом мощности электромагнитного взаимодействия. Ясно, хотя бы из закона Кулона, что в области микромасштабов величины сил и мощностей (на единицу заряда) на много порядков выше, чем в макромире. Это означает, что хотя пороговая область выглядит на рис.3,б как достаточно скромный “треугольник” (потому, что линия предела изображена для очень малой мощности P), на самом деле ее динамический диапазон охватывает много десятичных порядков.

Литература

1. C.E.Shannon, A mathematical theory of communications, Bell Syst. Tech. Journal, 1948, 27, P.379-423.

2. И.С.Гоноровский. Радиотехнические цепи и сигналы. М.: Радио и Связь, 1986.

3. С.Г.Басиладзе, Сигнал, данные и информация в физических измерениях, Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра, 2000, том 31, вып.3.

4. С.Г.Басиладзе, Пороговые и предельные соотношения для сигналов, Препринт НИИЯФ МГУ 2004-20/759, Москва 2004 г.

5. H.Nyquist, Thermal agitation of electric charge in conductors, Phys.Rev., 1928, V.32 No 1. P.110-113.

6. A.Qilespi. Signal, noise and resolution in nuclear counter amplifiers. Pergamon press, 1953.

7. М.Планк. Теория теплового излучения. М. 1935.

Сергей Геннадьевич Басиладзе

Пороговые ограничения, вносимые приемником в тракт передачи сигналов

Препринт НИИЯФ МГУ – 2006-4/803

Работа поступила в ОНТИ 24.04.2006 г.