

## Сигнал, данные и информация в физическом эксперименте

### Содержание

- 1. Структура понятия “Информация”
- 2. Реальный сигнал как носитель Информации
- 3. Достижимая плотность Информации

### Введение

Везде, где проводятся измерения тех или иных физических величин, их конечной целью является получение новых, имеющих смысловое содержание, сведений о свойствах изучаемых явлений. Новые сведения получают по цепочке, показанной на рис.1 [1÷3].

Для исключения повторений в коде данных при переходе к минимизированному коду, называемому информацией, важным является начальное знание о вероятностях состояний.

- Носителем смысловых сведений является информация  
Носителем информации являются различные состояния  
Носителем состояний является сигнал  
Носителем сигнала является энергия



## 1.1. Структура понятия “Информация”

- **Сигнал**, поступающий в измерительную аппаратуру, является электронным (и, как правило, аналоговым) отображением физических величин. Классический сигнал может быть представлен обычной математической функцией  $y=f(x)$  с энергией:

- $$dE = y^2(x) \cdot dx. \quad (1,a)$$

- Энергия сигнала может быть выражена и через его спектр -  $g(\chi)$ :

- $$dE = [g^2(\chi)/2] \cdot d\chi, \quad (1,b)$$

- здесь  $\chi$  - обобщенная непрерывная спектральная переменная, обратная 'x'.
- **Состояние 's'** в событии (отсчете сигнала) является базовым понятием в теории информации, поскольку оно (в дискретной и кодированной форме) отражает то состояние, в котором находится измеряемая величина. Наше начальное знание обычно состоит в том, что мы можем оценить лишь число возможных состояний – S этой величины. Это значит, что мы не можем предсказать не только то, какое конкретное состояние 's' будет обнаружено в результате опыта или проведенного вычисления, но и того, каков будет шанс обнаружения того или иного состояния (поэтому разумно считать все шансы равными).
- **Данные**. В ходе опыта (отсчета) осуществляется переход от S возможных к одному, реально зафиксированному состоянию. Это понижает уровень непредсказуемости и приносит
  - $$D = \log_2(S) \quad (2,a)$$
- бит данных (это иерархический – оптимизированный код [3]; натуральные, на линейной дискретной шкале, состояния сигнала несут  $D=S$  данных – иксовые камеры).

## 1.2. Структура понятия “Информация”

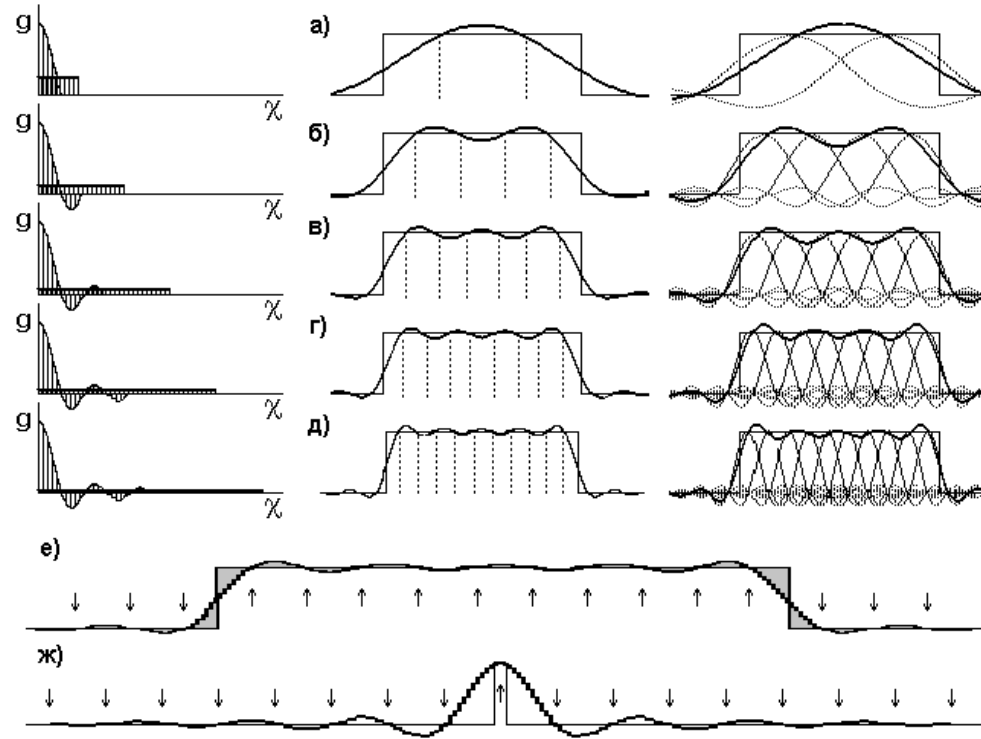
- **Информация.** В классике обычно достаточно одного отсчета, последующие измерения дают повторяющиеся значения. В последовательности отсчетов –  $L$  начинает действовать другая известная формула [4] для количества *информации*:

- $$I = \log_2(1/p_s), \quad (2,6)$$

- где  $p_s$  есть вероятность появления конкретного состояния 's'.
- Количество информации обычно меньше количества данных, поскольку распределение вероятностей состояний в упорядоченных процессах не является равномерным (плоским). Даже, когда у состояний распределение равномерное:  $p_s=1/S$ , то  $I$  может быть меньше  $D$ , если через каждые  $S$  отсчетов последовательность состояний повторяется. Переход от  $D$  (2,а) к  $I$  (2,б) идет, конечно, не скачком, а плавно, но достаточно быстро [3]. Сплошное повторение значений величины означает, что ее  $p_s=1$ , т.е. информация, приобретаемая в повторных отсчетах 'l', нулевая.
- Объем данных, полученных в эксперименте, может быть снижен до количества информации путем **компрессии** [5] – она убирает **повторы** в последовательности данных. Информация, в отличие от данных, не сжимаема (это **минимизированный код**).
- **Дифракция как теорема отсчетов.** Если мы хотим получить отображение от резких краев “широкой” щели на располагаемом за ней экране, то необходимо ее чем-нибудь “осветить”: аналоговой (непрерывной) волной, либо дискретными частицами. Отображением (здесь статическим – пространственным сигналом) является то, что мы регистрируем на экране.

# 1.3. Структура понятия “Информация” – теорема отсчетов

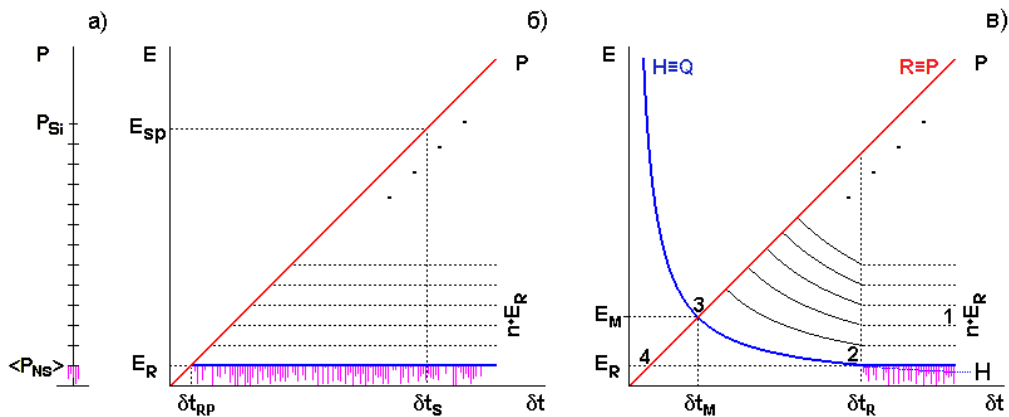
- Математическое (лучевое) отображение щели идеально – оно **ступенчатое**, его спектр бесконечен и имеет вид  $\sin(\chi)/\chi$  (рис.2,д, в левой – 1-й колонке).
- **Дифракция волн.** Реальное аналоговое отображение выглядит как кривая на рис.2,е и физически представляет собой правую и левую картины дифракции “от края”. Два **плавных** (не ступенчатых, колебательных) перехода означают, что в спектре отображения отсутствуют **верхние гармоники** (см. левую колонку рис.2). Верхних гармоник будет отсутствовать ровно столько, сколько их отсутствует в спектре “осветителя”. Физическая картина дифракции на рис.2,е является наглядной иллюстрацией известной [6] теоремы отсчетов. **Отображение совпадает с оригиналом только в отдельных – опорных точках** (показаны стрелками), именно эти точки и **несут информацию** – расстояние между ними равно полупериоду колебаний высшей гармоники “осветителя” (положение остальных точек предсказуемо – информационно они **пустые**). Чем сильнее **обрезан** спектр, тем меньше остается опорных точек, т.е. количество получаемой информации **падает** – рис.2,д)→а).



- Такое же количество **опорных** точек содержит и спектр сигнала – информационно он **не сплошной**.
- **Дифракция частиц.** При дифракции частиц одно измерение приносит только **одну точку** на огибающей. Чтобы получить цельную картину дифракции, необходим достаточно длительный набор данных ( $L \gg 1$ ), хотя основная масса **пустых** точек в этой картине **значащей информации не несет** (эти отсчеты информационно избыточны). Но без **пустых** нельзя выделить **опорные** точки.

## 2.1. Реальный сигнал как носитель Информации

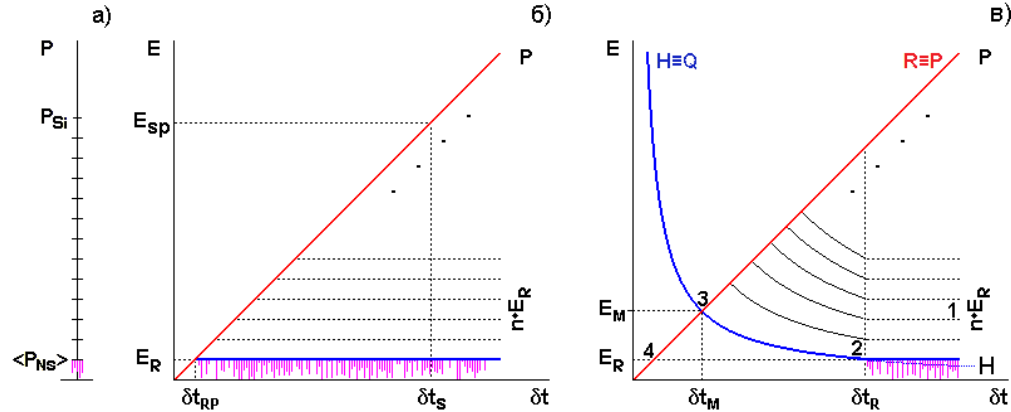
- По Шеннону [4] ограничителем снизу на шаг между состояниями сигнала – рис.3,а, является классический шум, а диапазон состояний определяется максимальной мощностью сигнала  $P_S$ . Однако, шум далеко не всегда довлеет во входных узлах ядерной электроники, особенно для сигналов с ФЭУ.
- На рис.2 было наглядно показано, что для количества информации важна еще и ширина спектра регистрируемого сигнала. Но даже при идеальных – ступенчатых входных импульсах сигнал на выходе дискриминатора имеет заметный разброс во времени (“гуляние”).
- Гораздо более неприятно то, что попытка отвлечься от среднеквадратичного шума  $\langle P_{Ns} \rangle$  на рис.3,а приводит к бесконечному количеству возможных состояний. Более того, по Винеру [7] количество переносимой сигналом информации на единичном отрезке:  $I = \log(Y/\delta y)/\delta x$ , будет бесконечно трижды, т.к.  $Y$  в отдельных точках может принимать бесконечно большое, а  $\delta y$  и  $\delta x$  – бесконечно малые значения.



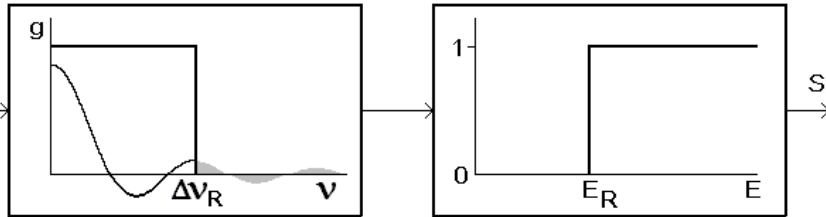
- Реальный сигнал.** Устранение всех бесконечностей, идущих от классического математического анализа (КМА), может быть достигнуто введением:
  - предельного ограничения на максимальную величину  $Y$ :
 
$$Y \leq \sqrt{R}, \quad (3,а)$$
    - а это линейная плотность энергии сигнала;
  - порогового ограничения на произведение:
 
$$\delta x \cdot \delta y \geq \sqrt{Q}, \quad (3,б)$$
    - а это спектральная плотность энергии, или площадь сигнала [3]. Эти ограничения, введенные на количество информации, являются физическими – они позволяют учитывать закономерности появления, передачи и восприятия реальных сигналов.

## 2.2. Реальный сигнал – акт регистрации

- Особенно важно, что из этих ограничений следует принципиальная ограниченность скорости переключения сигнала: минимум величины  $\delta x$  достигается в точке пересечения пороговой и предельной линий. Для рис.3,б ( $R \equiv P, x \equiv t$ ):
  - $\delta x_R = E_R / R,$  (4,а)
- а для рис.3,в ( $Q \equiv H, x \equiv t$ ) имеем:
  - $\delta x_M = \sqrt{Q / R},$  (4,б)
- что говорит об абсолютной ограниченности спектра реального сигнала (чего нет в рис.3,а).



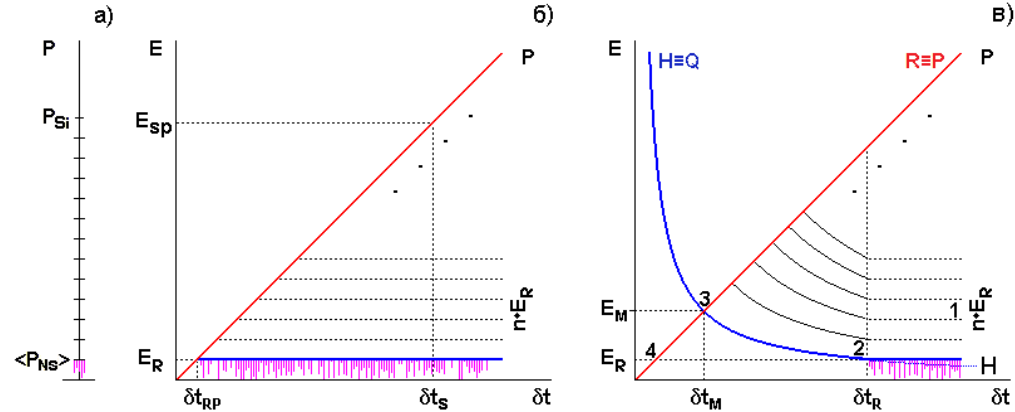
- Можно выделить 2 крайних варианта регистрации:
  - 1) **медленный** сигнал, тогда практически весь его спектр уже, чем  $\Delta v_R$  и не фильтруется;
  - 2) **быстрый** сигнал, гармоники которого фильтруются (интегрируются) практически полностью, оставляя лишь малую окрестность нулевой гармоники, квадрат которой есть площадь сигнала; для него справедлива пороговая формула (3,б).
- Промежуточным является сигнал, заметная часть спектра которого обрезается фильтром (рис.4), такой сигнал является частично интегрированным. Понятие медленного и быстрого сигнала является относительным, оно означает лишь **быстрое** или **медленное** восприятие.



**Акт регистрации сигнала.** В первой фазе восприятия сигнала – рис.4 осуществляется фильтрация его высших гармоник (выше, чем  $v_R$ ), во второй фазе выдается логический сигнал обнаружения, если энергия за фильтром становится больше некоторой  $E_R$ .

## 2.3. Реальный сигнал – порог и предел

- Быстрому восприятию соответствует **рис.3,б**. Горизонтальной линией показан порог (в данном случае – по энергии  $E_R$ ), а наклонной ( $P$ ) – предельное ограничение. В принципе, порог по энергии может создавать и классический шум (показан фиолетовым), вопрос лишь в том, чья характеристическая энергия выше. Если следовать **рис.3,а**, то может показаться, что для увеличения информационной способности сигнала надо стараться увеличивать диапазон состояний над порогом, т.е. двигаться вправо – в сторону больших  $\delta t$ . На самом деле, точка **наивысшей** плотности информации  $\Delta I/\Delta t$  лежит слева – в точке пересечения пороговой и предельной линий, где сигнал имеет всего **2** уровня.
- Медленному восприятию соответствует левая часть **рис.3,в**; линия порога по квадрату площади сигнала ( $Q=H$ ) здесь становится гиперболой (т.2÷т.3). Квадрат площади динамического сигнала ( $x=it$ ) есть его действие; если на участке т.2÷т.3 оно выше порога 'H', то сигнал будет воспринят. Но чем короче сигнал, тем большей энергией он должен обладать.



- Ступенчатый входной сигнал амплитудой  $A$  интегрируется фильтром в пределах от  $(t - \tau)$  до  $t$  ( $0 \leq t \leq \tau$ ), где  $\tau$  есть постоянная времени фильтра, обратная  $\Delta v_R$ . Тогда время достижения энергии за фильтром уровня  $E_R$  составит:
  - $t_R = (E_R \cdot 3\tau^2/A^2)^{1/3} \quad (t_R \leq \tau). \quad (5,а)$
- В общем виде, когда  $t_R > \tau$  ( $\tau \rightarrow 0$ ), получаем:
  - $t_R = \tau + [(E_R - \tau \cdot A^2/3)/A^2]. \quad (5,б)$
- Что касается плотности информации  $\Delta I/\Delta t$  в последовательности сигналов, то здесь имеются 2 варианта:
  - 1) если интегрирование происходит в среде **передачи** сигналов (а само восприятие **быстрое**), то темп  $\Delta I/\Delta t$  можно сделать повышающимся от т.2 к т.3, тогда максимум  $\Delta I/\Delta t$  будет по-прежнему в точке пересечения пороговой и предельной линий;

## 2.4. Реальный сигнал – виртуальные состояния

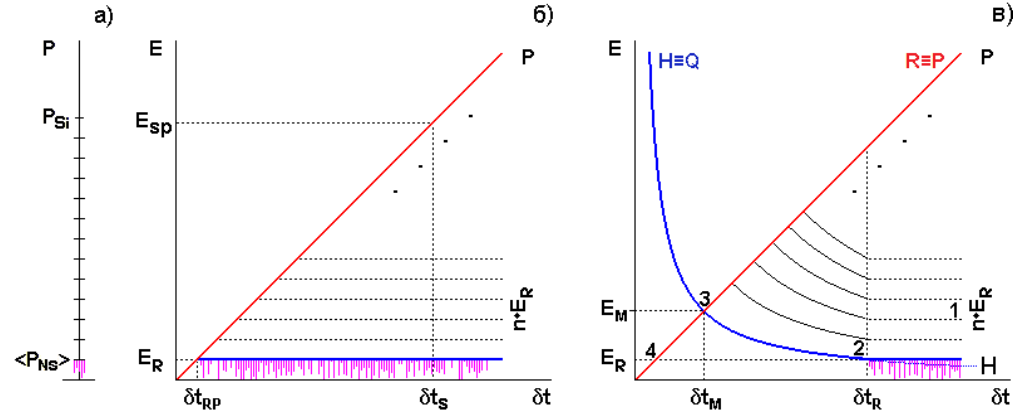
- 2) если же медленным является само восприятие, тогда два близко расположенных во времени сигнала воспринимаются как один с суммарным действием:

$$\sqrt{N_{1+2}} = \sqrt{N_1} \pm \sqrt{N_2} \quad (6)$$

- и  $\Delta I/\Delta t$  остается на уровне т.2. Здесь площадь  $\sqrt{N}$  имеет знак (т.е. возможна интерференция, когда 2 одинаковых, но разнополярных сигнала невидимы).

- Информация виртуального.** В ядерно-физическом эксперименте имеется также вклад измерения виртуальных "пребывающих в скрытом виде и могущих проявиться" состояний.

- Виртуальные состояния.** В классических сигналах (рис.2) допустимы ступенчатые – скачкообразные переходы между ними. Однако, в физической реальности, воспринимаемые сигналы **частично** (в макро-) или **полностью** (в микро-мире) интегрированы [3] и не содержат высших гармоник. Поэтому переход регистрируемого сигнала из одного состояния в другое может происходить быстро, но должен происходить **плавно**.



- Это означает, что должна существовать переходная зона, где первое состояние "постепенно исчезает", а второе "постепенно появляется".
- Покажем, как получить численные формулы для описания такого перехода.
- Обратимся к известному представлению логических (дискретных) величин  $A, B, C, \dots$  через алгебраические (непрерывные) величины  $a, b, c, \dots$  [8,9].
- Интуитивно понятно, что если 'a' и 'b' принимают те же значения нуля или единицы, что  $A$  и  $B$ , то преобразования будут иметь вид:

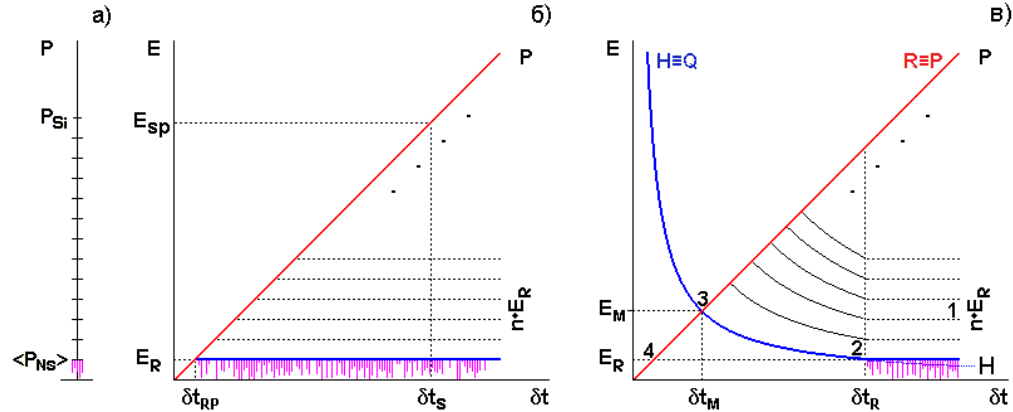


## 2.5. Реальный сигнал – виртуальный шум

- $A \Rightarrow a, \neg A \Rightarrow 1 - a$ , (и для 'b'...) (7,а,б)
- $A \wedge B \Rightarrow a \cdot b$ . (7,в)
- Из правила Моргана [10]:  $\neg(A \vee B) = \neg A \wedge \neg B$ , совместно с (7,б,в), найдем, что:
- $A \vee B \Rightarrow \{1 - [(1-a) \cdot (1-b)]\} = a + b - (a \cdot b)$ . (7,г)
- В переходной (интегрированной) зоне алгебраические переменные  $a, b, c, \dots$  больше нуля, но меньше единицы.
- Функции логического “умножения” и “сложения” (7,в) и (7,г) по форме совпадают с выражениями для вероятности произведения независимых событий и суммы совместных событий:
- $p(A \cdot B) = p(A) \cdot p(B)$ , (8,а)
- $p(A+B) = p(A) + p(B) - [p(A) \cdot p(B)]$ . (8,б)
- Можно трактовать и соотношения (7,а,б), как вероятности, что подразумевает наличие некой случайности (*шума*) в появлении  $A$  или  $\neg A$ .
- Учтя сказанное, получаем:
- $p(A) = a, p(\neg A) = 1 - a$ , (и для 'b'...) (9,а,б)
- $p(A \cdot B) = a \cdot b$ . (9,в)
- $p(A+B) = a + b - (a \cdot b)$ . (9,г)
- Вне переходной зоны 'a' и 'b' равны 0 или 1, соответственно, вероятности равны 0 или 1.
- **Количество информации в виртуальных состояниях.** Положим, что зарегистрировано  $L$ -событий, т.е. получен натуральный (линейный) код длиной  $L$ , в котором случайным образом перемежаются  $l_0$  нулей и  $l_1$  единиц:  $L = l_0 + l_1$ . Это дает возможность оценки вероятности появления виртуального состояния  $p_1 \approx l_1/L$  (среднего  $l_1$  на единицу  $L$ ). Нас интересует, каким количеством (двоичных) знаков описывается число  $p_1$ , т.е. – погрешность его определения, равная  $\sim 1/\sqrt{L}$ . Тогда количество различных значений виртуальных состояний будет  $\sim \sqrt{L}$  и каждое из этих значений приносит
- $D_B = \log_2(L) / 2$ , (10)
- бит данных. Это намного меньше, чем длина натурального кода –  $L$ .
- Получаемая сверх  $D_B$  дополнительная экспериментальная “информация случайного” является деструктивной, она затрудняет нахождение физического результата быстро и точно. Смысл усреднения данных натурального кода состоит в том, что оно позволяет избавиться от случайной составляющей в этих данных, т.е. от *шума*. К процедуре усреднения приходится прибегать и при наличии классического шума.

### 3. Достижимая плотность Информации

- Мы начали с классических сигналов и, введя 2 ограничения на плотность энергии, сделали их более приближенными к реальности, получив **новую зону** воспринимаемых интегрировано сигналов. Реальные сигналы дают возможность расчета временного разрешения и разрешающего времени входных узлов наносекундной электроники, от которых прямо зависит количество и качество получаемой в эксперименте информации.



- При переходе к нано-масштабам процессов и явлений реальные сигналы не теряют своей применимости и дают результаты, согласующиеся с условиями дискретизации регистрируемых состояний в квантовой механике. Например, введенные ограничения дают правильное условие пропадания классического шума в точке 2:  $h \cdot \Delta v = k \cdot T$ , это то решение, которое искал Планк для устранения “ультрафиолетовой катастрофы” из классической физики.
- Сказанное дает возможность сделать некоторые прогнозы по развитию электронных средств физического эксперимента и оценить теоретические границы [3] их ограничений (взяв  $H=h$  – постоянной Планка):

	$1_D$	$1_L$	$2_N$	$3_{ЭМ}$	$3_{Гр}$
$\Delta I / \Delta t$ , бит/с :	$(1,4 \cdot 10^{-9})^{-1}$	$3,2 \cdot 10^{11}$	$1,3 \cdot 10^{13}$	$(1,1 \cdot 10^{-22})^{-1}$	$(5,5 \cdot 10^{-44})^{-1}$
$\Delta E / \Delta I$ , Дж/бит:	$1,0 \cdot 10^{-18}$	$3,2 \cdot 10^{-17}$	$1,6 \cdot 10^{-20}$	$9,6 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^9$

- Точка 2 есть та граница, до которой можно ожидать существенного прогресса в улучшении информационных параметров электроники эксперимента. Попытка дальнейшего движения к точке 3 приведет к существенному росту энергии на каждый бит информации. Конечно, возможны и чисто технологические ограничения, которые могут возникнуть раньше тех, которые приведены в таблице.

## 4. Заключение

- Пониженная информационная эффективность экспериментальных данных обусловлена точечностью детектирования частиц, а также случайностью виртуальных (подпороговых [3]) состояний; определенную долю вносит и классический шум в аппаратуре регистрации.
- Считается, что для того, чтобы перейти от “квантового к классическому” нужно устремить  $\hbar$  к нулю. Однако, идя этим путем, можно попасть только в абстрактный мир (КМА) с бесконечно делимыми величинами, с бесконечным числом (различимых!) точек по каждой бесконечной координате. В реальности, чтобы рассчитать временную погрешность дискриминатора в ядерной электронике нужно устремить его постоянную действия не к нулю, а прямо в противоположную сторону (сейчас – до уровня примерно  $10^5 \div 10^6 \hbar$ ). Чем крупнее масштаб, тем более инертными становятся объекты и процессы; их постоянная действия должна не снижаться, а расти. Как видим, процессы восприятия (по действию) в макро- и микро-масштабах имеют определенное сходство, хотя их физика существенно различается.

### Литература

- 1. Басиладзе С.Г. Сигнал, данные и информация в физических измерениях // Физика Элементарных Частиц и Атомного Ядра, Том 31, вып.3. С.634-669. Дубна 2000.
- 2. Басиладзе С.Г. Физика сигнала // Физика элементарных частиц и атомного ядра, Т.40, вып.6. С.1472-1524. Дубна 2009.
- 3. Басиладзе С.Г. Инфология. - М.: Эдитус, 2012.
- 4. Шеннон К. Математическая теория связи / В сб. Работы по теории информации и кибернетике. - М.: ИЛ, 1963.
- 5. Witten I.H., Neal R.M., Cleary J.G. Communications of the ACM, Vol.30, No 6 June 1987. P.520.
- 6. Гоноровский И.С. Радиотехнические цепи и сигналы - М.: Радио и Связь, 1986.
- 7. Винер Н. Кибернетика. М.: Наука, 1983.
- 8. Тошич Ж. Известия АН СССР. Техническая кибернетика, 1967, №36 с.113.
- 9. Калинин В.А. Приборы и техника эксперимента, 2006, №5, с.5÷17.
- 10. Алексенко А.Г., Шагурин И.И. Микросхемотехника, - М.: Радио и Связь, 1982.

С.Г. Басиладзе

## ИНФОЛОГИЯ

Сигнал  
Состояния  
Данные  
Информация