

Компьютерная обработка результатов измерений

Лекция 1. Общие сведения об измерениях. Виды сигналов и методы их анализа.

Емельянов Эдуард Владимирович

Специальная астрофизическая обсерватория РАН
Лаборатория физики оптических транзиентов



- 1 Физические измерения**
- 2 Величины**
- 3 Сигналы и их виды**
- 4 Литература**



Физические измерения

Экспериментальное определение значения измеряемой величины с применением средств измерений называется **измерением**.

Важнейшей особенностью измерений является *принципиальная невозможность получения результатов измерения, в точности равных истинному значению измеряемой величины* (особенно эта особенность проявляется в микромире, где господствует принцип неопределенности). Эта особенность приводит к необходимости оценки степени близости результата измерения к истинному значению измеряемой величины, т.е. вычислять **погрешность измерения**.



Величины

Мерой называется средство измерений, предназначенное для воспроизведения и хранения значения физической величины. Результатом сравнения оцениваемой вещи с мерой является именованное число, называемое **значением величины**.

Физические величины

- постоянные (инварианты, константы, априорно фиксированные значения);
- изменяющиеся (по определенному закону от t);
- случайные (не имеющие точного значения).



Величины

Физические величины

Основные:

- длина (метр);
- масса (килограмм);
- время (секунда);
- сила электрического тока (Ампер);
- термодинамическая температура (Кельвин);
- количество вещества (моль);
- сила света (кандела).

Вспомогательные:

- плоский угол (градус);
- телесный угол (стериadian).

Производные величины (например, $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А}\cdot\text{с}$).



Величины

Размер величины — ее количественная характеристика. Цель любого измерения — получение информации о размере физической величины. **Размерность** — качественная характеристика измеряемой величины. Если с изменением основной величины в n раз производная изменится в n^p раз, то говорят, что данная производная единица обладает размерностью p относительно основной единицы. Например, размерность объема (м^3) равна трем.

Анализ размерностей помогает установить связи между физическими величинами. Например: определить время падения тела под действием силы тяжести (g) с высоты h . $t = Ch^x \cdot g^y$. Составим уравнение размерностей: $T = L^x \cdot (LT^{-2})^y$. Отсюда $y = -1/2$, $x = 1/2$. Искомое выражение: $t = C\sqrt{h/g}$ (как мы знаем, $C = \sqrt{2}$).



Виды измерений

Прямые при которых искомое значение физической величины получают непосредственно.

Косвенные на основании результатов прямых измерений других физических величин, функционально связанных с искомой величиной (например, измерение сопротивления при помощи вольтметра и амперметра).

Совместные проводимые одновременно для нескольких неодноименных величин для определения зависимости между ними (например, для измерения зависимости сопротивления от температуры, $R = R_0(1 + AT)$, измеряют R при нескольких разных T , откуда вычисляют R_0 и A).

Совокупные при которых искомые значения величин определяют путем решения системы уравнений, получаемых при измерениях этих величин в различных сочетаниях (например, измерение сопротивлений резисторов, соединенных треугольником).



Виды измерений

Равноточные выполненные одинаковыми по точности средствами измерений.

Неравноточные выполненных различающимися по точности средствами измерений и (или) в разных условиях.

Однократные, многократные (в зависимости от возможности проведения повторных измерений).

Статические для величин, принимаемых в соответствии с конкретной измерительной задачей за неизменные на протяжении времени измерения.

Динамические для изменяющейся по размеру физической величины.

Абсолютные основанное на прямых измерениях одной или нескольких основных величин и (или) использовании значений физических констант.

Относительные сравнение с эталонными мерами.



Методы измерений

Метод непосредственной оценки непосредственно по средству измерения со шкалой.

Нулевой метод такое сравнение с мерой, при котором результирующий эффект воздействия управляемой величины и меры сводят к нулю (например, измерение сопротивления при помощи моста Уитстона).

Дифференциальный (разностный) метод измеряемая величина сравнивается с эталоном, значение которого незначительно от нее отличается (например, взвешивание на рычажных весах с гилями).

Метод измерения замещением поочередное измерение величины и замещающей меры (пример: измерение сопротивления при помощи стабильного источника напряжения, амперметра и опорного резистора).

Качество измерений

Точность — близость результатов к истинному значению измеряемой величины.

Достоверность — степень доверия к результатам измерения.

Сходимость — близость результатов при измерении одним и тем же методом в одинаковых условиях.

Воспроизводимость — близость результатов при измерении одним и тем же методом, но в разных условиях.

Пример: измерение толщины индикатором часового типа. Цена деления индикатора: 10 мкм. В результате измерений получили ряд данных: 1.71, 1.69, 1.60, 1.70, 1.72, среднее значение: (1.68 ± 0.05) мм. Если отбросить явно ошибочное 1.60, получим: (1.71 ± 0.01) мм. Для оценки воспроизводимости измерим штангенциркулем (с ценой деления 0.05 мм). Если в пределах погрешности получим 1.70 · 1.72 мм, то метод измерения дал хорошую воспроизводимость.

При измерении температуры терморезистором АЦП может обеспечить цену деления $0.03^\circ C$, однако, точность и воспроизводимость измерений будет определяться характеристиками самого терморезистора и измерительной схемы. Точность можно оценить по эталонному термометру в единичном измерении; воспроизводимость — по множеству измерений с прохождением контрольной точки "сверху" и "снизу".

Формы представления результатов

Общая форма представления

Точечная оценка результата измерения, характеристики погрешностей измерения, указание условий измерения.

Характеристики погрешностей указывают в абсолютных или относительных единицах. Этими характеристиками могут быть: среднее квадратическое отклонение погрешности; среднее квадратическое отклонение случайной погрешности; среднее квадратическое отклонение систематической погрешности; нижняя граница интервала погрешности измерений; верхняя граница интервала погрешности измерений; нижняя граница интервала систематической погрешности измерений; верхняя граница интервала систематической погрешности измерений; вероятность попадания погрешности в указанный интервал.



Формы представления результатов

Требования к оформлению результата

- Наименьшие разряды оценки и погрешности должны совпадать.
Например: вместо $x = 1.23 \pm 0.5$ пишем $x = 1.2 \pm 0.5$; вместо $y = 5.1 \cdot 10^4 \pm 25$ пишем $(51.000 \pm 0.025) \cdot 10^3$.
- Характеристики погрешностей выражаются числом, содержащим не более двух значащих цифр, причем с округлением в большую сторону.
Например: вместо $x = 1.014 \pm 0.111$ пишем $x = 1.01 \pm 0.12$.
- Допускается характеризовать погрешность числом с одной значащей цифрой (с округлением по классическому правилу).

Примеры: (8.334 ± 0.012) г, $P = 0.95$. 32.014 мм, характеристики погрешностей и условия измерений по РД 50-98-86, вариант 7к. $(32.010 \dots 32.018)$ мм, $P = 0.95$, измерение индикатором ИЧ 10 кл. точности 0 на стандартной стойке с настройкой по концевым мерам длины 3 кл. точности; измерительное перемещение не более 0.1 мм; температурный режим измерений $\pm 2^\circ C$. 72.6360 мм; $\Delta_h = -0.0012$ мм, $\Delta_b = +0.0018$ мм; $P = 0.95$.

Представление результатов

Табличное

Позволяет избежать многократной записи единиц измерения, обозначений измеряемой величины, используемых множителей. В таблицы, помимо основных измерений, могут быть включены и результаты промежуточных измерений.

Для удобства импортирования данных и одновременно наглядности чтения удобно хранить в формате TSV (tab separated values) или CSV (comma separated values). SED позволит легко преобразовать TSV/CSV в таблицу \LaTeX .

Графическое

На основе графика легко можно сделать вывод о соответствии теоретических представлений данным эксперимента, определить вид функциональной зависимости измеряемой величины.



Представление результатов

Таблица 3.4: Зависимость спектрального разрешения от геометрии прибора.

θ	α	β	$\cos \alpha$	$\cos \beta$	M	$\cos \theta$	D	B	L_b
11	75.3	53.3	0.2537	0.5976	0.4245	0.9816	0.7122	0.5960	64.8
10	74.3	54.3	0.2706	0.5835	0.4637	0.9848	0.7318	0.6336	59.3
9	73.3	55.3	0.2874	0.5693	0.5048	0.9877	0.7523	0.6710	
8	72.3	56.3	0.3040	0.5548	0.5479	0.9903	0.7740	0.7079	
7	71.3	57.3	0.3206	0.5402	0.5935	0.9925	0.7966	0.7450	
6	70.3	58.3	0.3371	0.5255	0.6415	0.9945	0.8205	0.7818	
5	69.3	59.3	0.3535	0.5105	0.6925	0.9962	0.8461	0.8185	
4	68.3	60.3	0.3697	0.4955	0.7461	0.9976	0.8730	0.8546	
3	67.3	61.3	0.3859	0.4802	0.8036	0.9986	0.9017	0.8912	
2	66.3	62.3	0.4019	0.4648	0.8647	0.9994	0.9323	0.9275	
1	65.3	63.3	0.4179	0.4493	0.9301	0.9998	0.9649	0.9639	



Представление результатов

Таблица 2. Спектрографы скрещенной дисперсии в фокусе Кассегрена. Обозначения: D – диаметр телескопа; d – диаметр коллимированного пучка; θ_b – угол блеска; disp – последовательность диспергирующих элементов по ходу лучей (ech – эшелле, gr – решетка, pr – призма, filt – фильтр); R – спектральное разрешение); Obs – обсерватория. *) копии спектрографа Harvard Coll. Obs., использовавшегося на телескопе $D = 1.52$ м)

Год	D (м)	d (см)	$\tg \theta_b$	disp	R	Obs
1971	0.9	5.5	2	ech/gr	16000	Pine Bluff Obs. [175]
1976	0.91	5	2	pr/ech	40000	Goddard SFC [119]
1977	0.61	9	2	ech/gr	43000	Mt. John Obs. [80]
1978	0.9		2	pr/ech/pr	40000	Royal Greenwich [121]
1978	1.0	*	2	ech/gr	52000	Ritter Obs. [107]
1980	1.0	*	2	ech/gr	52000	Lowell Obs. [107]
1980	1.0		2	ech/gr	30000	Siding Spring Obs.
1981	1.0	7.7	2	ech/gr	54000	Vienna Obs. [196]
1982	0.61	*	2	ech/gr		Las Campanas [107]
1982	0.61	5	3.2	filt/ech	150000	Whipple Obs. [87]
1986	1.22		2	ech/gr	50000	Rangapur Obs.



Представление результатов

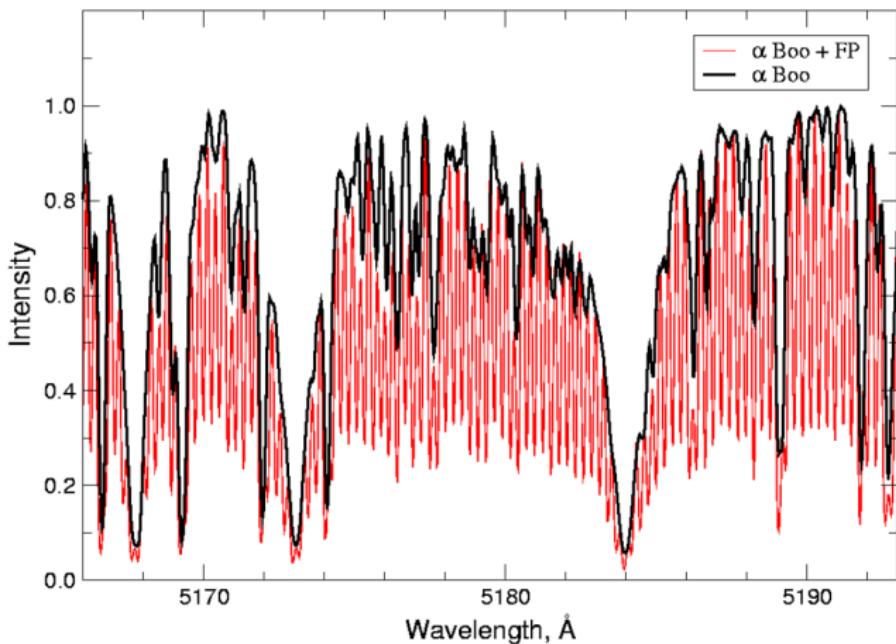


Рис. 4.7: Спектр Арктура с использованием эталона Фабри-Перо (тонкая линия) и без его применения (жирная линия).

Представление результатов

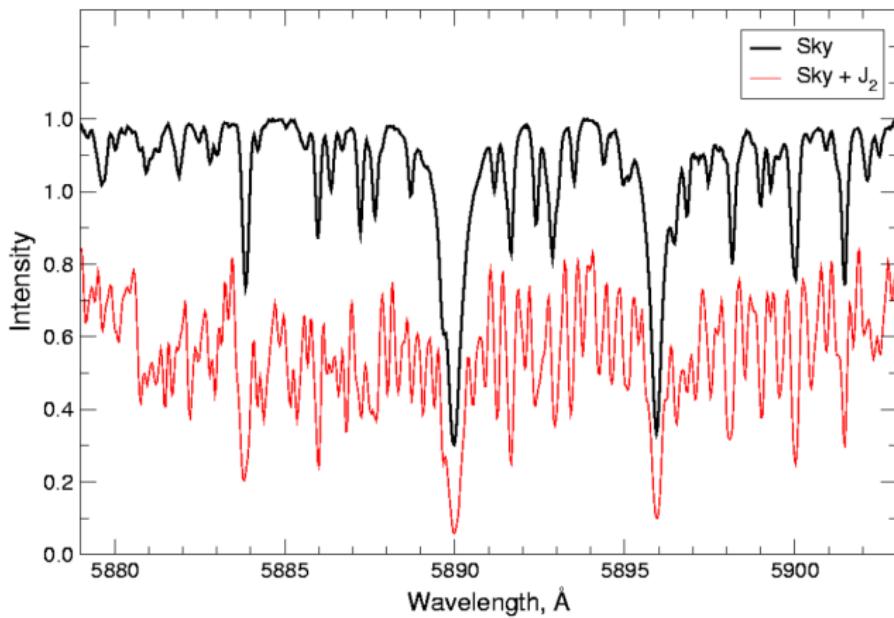


Рис. 4.8: Спектр неба с использованием абсорбционной ячейки на парах йода (тонкая линия) и без нее (жирная линия).



Выбор типа графика

График подходит для изображения динамики какой-то зависимости, наглядной визуализации экстремумов, перегибов и прочих характерных мест (например, фотометрическая кривая).

Столбцевая диаграмма позволяет визуализировать различие в нескольких наборах данных (например, падение покупательной способности рубля с течением времени).

Круговая диаграмма лучше всего подходит для демонстрации вклада отдельных частей в целое (например, химический состав атмосферы звезды).

Гистограмма похожа на график с дискретным аргументом (например, $0, 1, 2, \dots$ или $0 - 9, 10 - 19, 20 - 29, \dots$). Гистограммы отлично характеризуют изображения.



Визуализация в виде таблицы

Идеал — полное отсутствие таблиц в тексте. Исключения: данные в таблице — текст или пиктограммы.

Если в таблице слишком много данных, ее никто не будет читать.
Исключение — справочники (но они нынче в электронном виде).

Программное обеспечение

Хорошо: L^AT_EX, GNUpot, GNU Octave, R . . .

Плохо: LibreOffice (Writer, Calc).

Ужасно: проприетарное ПО (M\$ Word и т.п.).

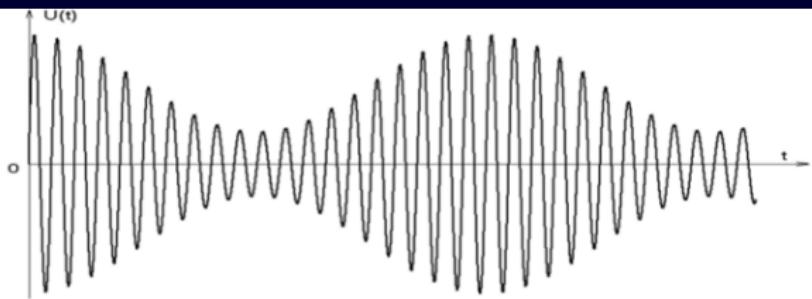


Сигналы и их виды

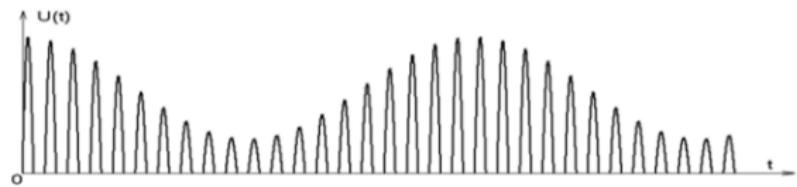
Если некоторая изменяющаяся величина измеряется непрерывно (или квазинепрерывно), мы имеем дело с потоком информации, или **сообщением**. В теории информации физический процесс, значения параметров которого отображают передаваемое сообщение, называется **сигналом**.

Модуляция–демодуляция. Зашумление. **Помехи:** аддитивные, мультипликативные, фазовые.

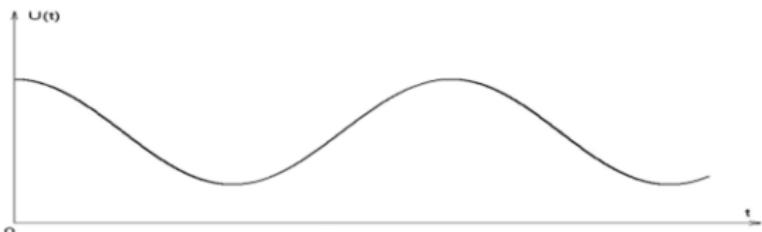
Сигналы и их виды



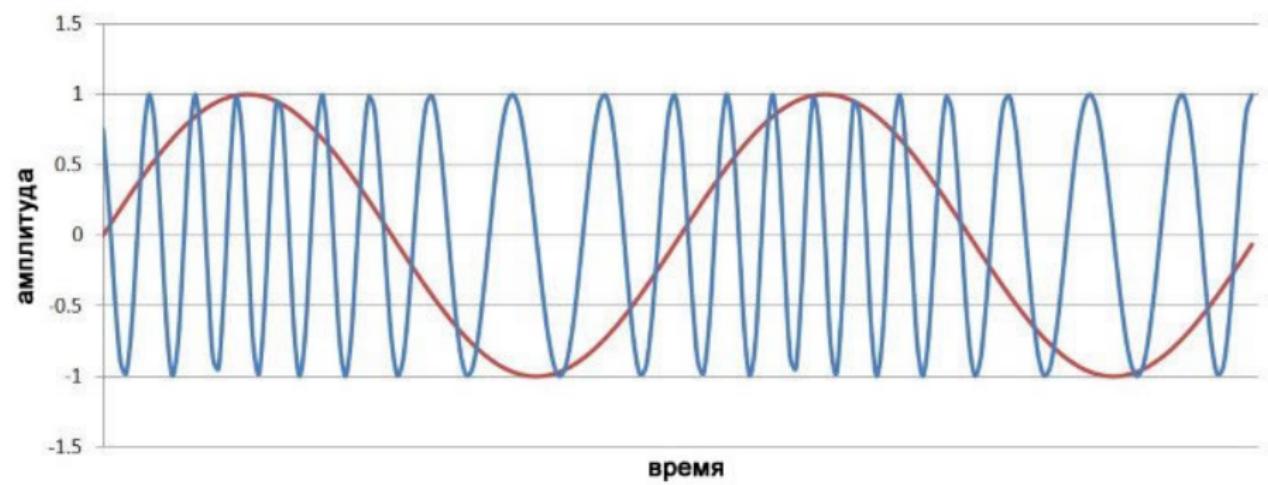
a



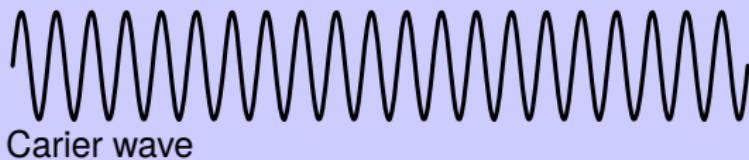
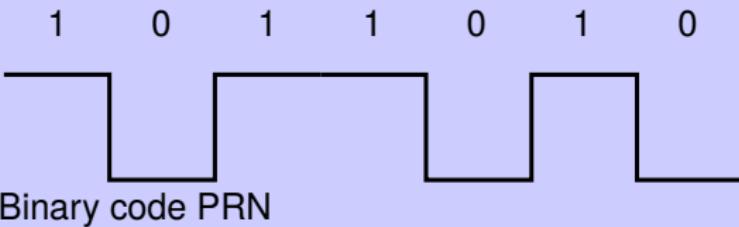
б



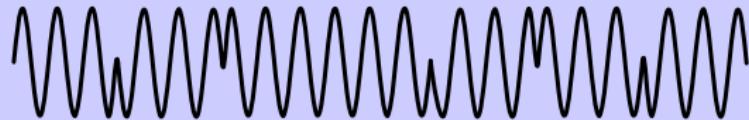
Сигналы и их виды



Сигналы и их виды



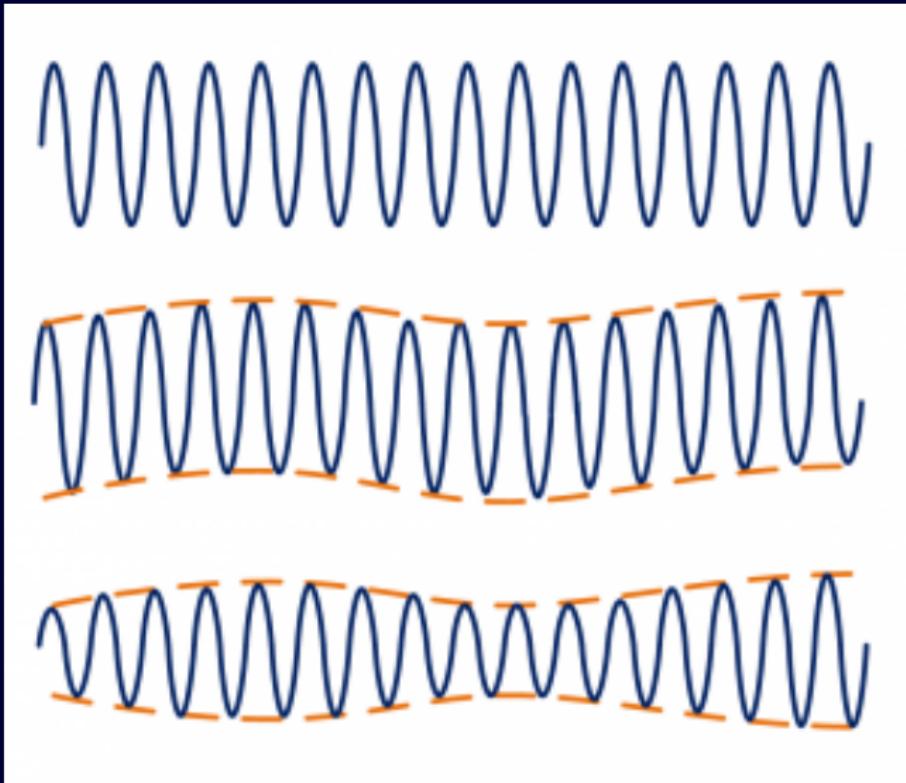
Carier wave



BPSK modulated signal

Сигналы и их виды

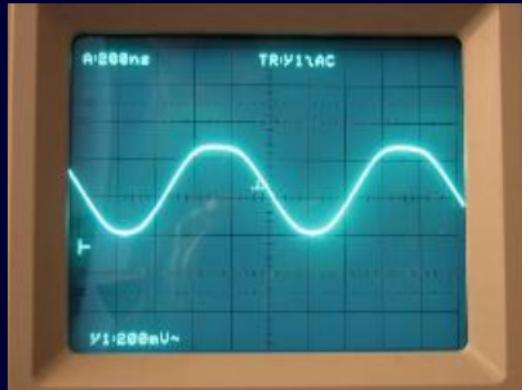
Add/mult



Виды сигналов

Аналоговый

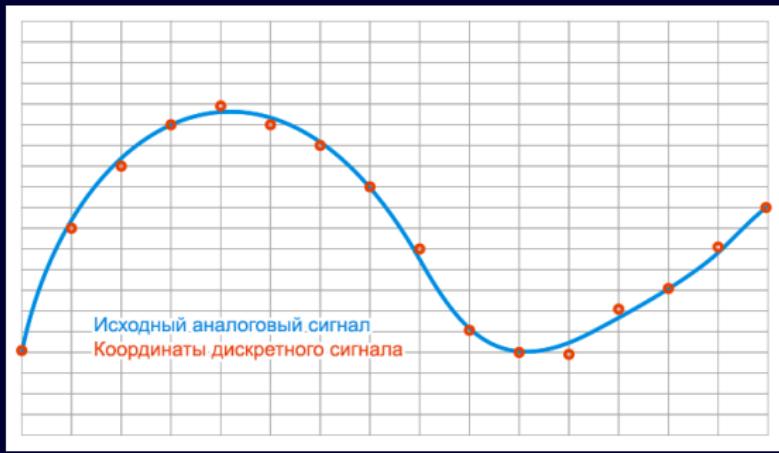
Описывается непрерывной (или кусочно–непрерывной) функцией $x(t)$:
 $t \in [t_0, t_1]$, $x \in [x_0, x_1]$. Аудиосигналы, телевизионные сигналы и т.п.



Виды сигналов

Дискретный

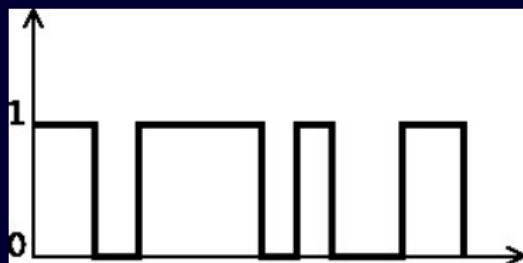
Описывается решетчатой функцией (последовательностью, временным рядом) $x(nT)$: $x \in [x_0, x_1]$, $n = \overline{1, N}$, T – интервал дискретизации. Величину $f = 1/T$ называют частотой дискретизации. Если интервал дискретизации является постоянной величиной, дискретный сигнал можно задать в виде ряда $\{x_1, \dots, x_N\}$.



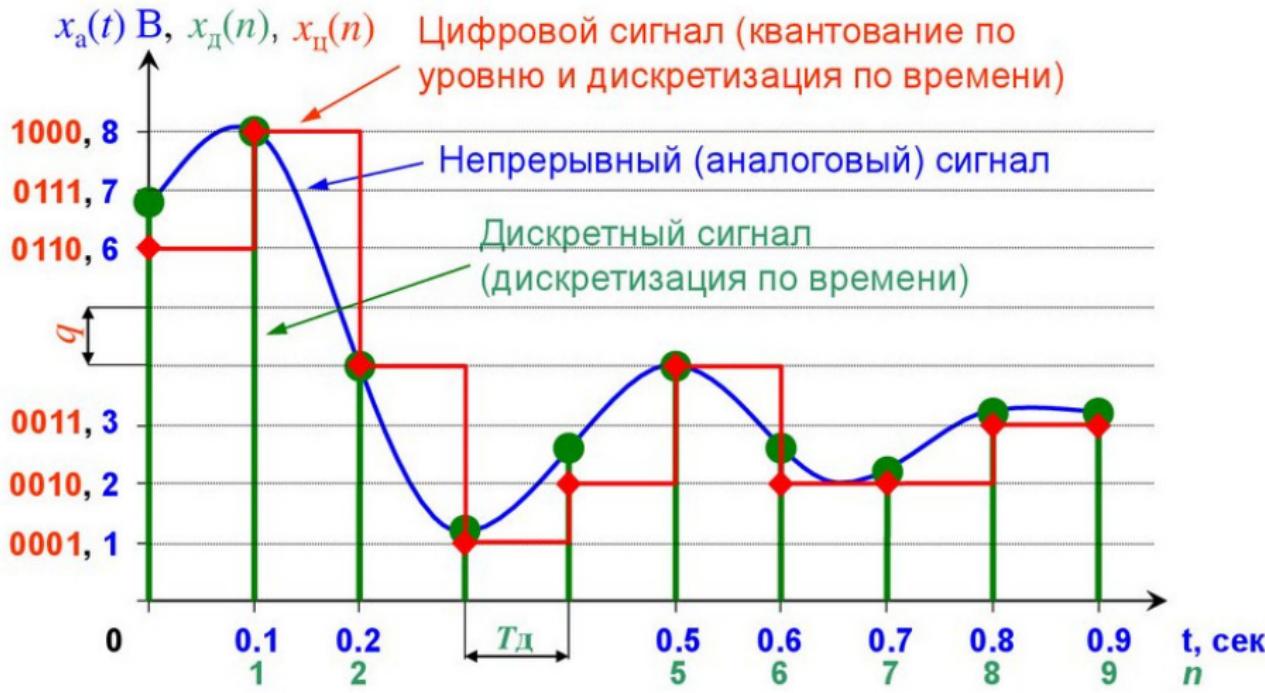
Виды сигналов

Цифровой

Описывается квантованной решетчатой функцией и отличается от обычного дискретного сигнала тем, что каждый уровень квантования кодируется двоичным кодом. Таким образом, если величина $x \in [x_0, x_1]$ квантуется N разрядным кодом, для обратного представления из кода K_x в значение x применяется преобразование: $x = x_0 + K_x \cdot (x_1 - x_0)/2^N$. К цифровым сигналам относятся сигналы, используемые в системах связи с импульсно-кодовой модуляцией.



Виды сигналов



$T_d = 1/f_d$ – шаг дискретизации, f_d – частота дискретизации, q – шаг квантования

Дискретизация

Дискретизация строит по заданному аналоговому сигналу $x(t)$ дискретный сигнал $x_n(nT)$, причем $x_n(nT) = x(nT)$. Операция **восстановления** состоит в том, что по заданному дискретному сигналу строится аналоговый сигнал.

Теорема Котельникова–Найквиста

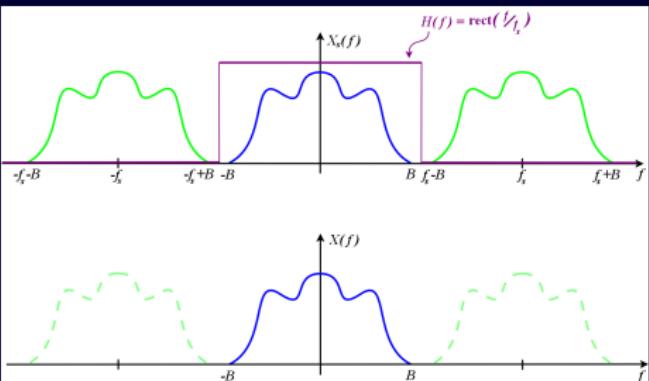
- любой аналоговый сигнал может быть восстановлен с какой угодно точностью по своим дискретным отсчётам, взятым с частотой $f > 2f_c$, где f_c – максимальная частота, которой ограничен спектр реального сигнала;
- если максимальная частота в сигнале равна или превышает половину частоты дискретизации (наложение спектра), то способа восстановить сигнал из дискретного в аналоговый без искажений не существует.



Теорема Котельникова–Найквиста

Фурье: $X_s(f) \stackrel{\text{def}}{=} \sum_{n=-\infty}^{\infty} T \cdot x(nT) e^{-i2\pi nTf}$

В окне: $X(f) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \cdot \underbrace{T \cdot \text{rect}(Tf)}_{\mathcal{F}\{\text{sinc}\left[\frac{\pi}{T}(t-nT)\right]\}} \cdot e^{-i2\pi nTf}$



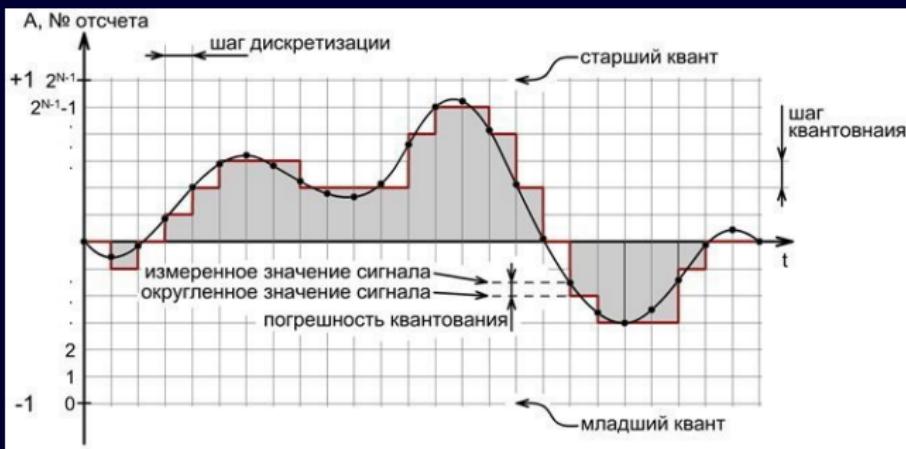
Формула Уиттекера–Шеннона

Восстановить непрерывную функцию из дискретной:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(nT) \cdot \text{sinc}\left[\frac{\pi}{T}(t - nT)\right]$$

Квантование

Для преобразования дискретного сигнала в цифровой вид применяется операция **квантования** или **аналого–цифрового преобразования** (АЦП), которая по заданному дискретному сигналу $x_n(nT)$ строит цифровой кодированный сигнал $x_d(nT)$, причем $x_n(nT) \approx x_d(nT)$. Обратная квантованию операция называется операцией **цифро–аналогового преобразования** (ЦАП).



Квантование

Для преобразования дискретного сигнала в цифровой вид применяется операция **квантования** или **аналого–цифрового преобразования** (АЦП), которая по заданному дискретному сигналу $x_n(nT)$ строит цифровой кодированный сигнал $x_d(nT)$, причем $x_n(nT) \approx x_d(nT)$. Обратная квантованию операция называется операцией **цифро–аналогового преобразования** (ЦАП).

Что мы хотим
получить



Генератор
ШИМ



Сигнал после
фильтра



Основная литература

- Интернет-энциклопедия: <http://wikipedia.org> (Википедия).
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. — М.: Техносфера, 2012. — 1104 с.
- Витязев В.В. Вейвлет-анализ временных рядов: Учеб. пособие. — СПб.: Изд-во С.-Петербург. ун-та., 2001. — 58 с.
- Гонсалес Р., Вудс Р., Эддинс С. Цифровая обработка изображений в среде MATLAB. — М.: Техносфера, 2006 — 616 с.
- Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. Учеб. пособие для вузов. — Изд. 7-е, стер. — М.: Высш. шк., 2001. — 479 с.
- Говорухин В., Цибулин В. Компьютер в математическом исследовании. Учебный курс. — СПб.: Питер, 2001. — 624 с.
- Сергиенко А. Б. Цифровая обработка сигналов. — СПб.: Питер, 2005. — 604 с.
- Чен К., Джиблин П., Ирвинг А. MATLAB в математических исследованиях: Пер. с англ. — М.: Мир, 2001. — 346 с.



Дополнительная литература

- Бахвалов Н. С., Жидков Н. П., Кобельков Г. М. Численные методы. — М.: Высш. шк., 1987. — 630 с.
- Кнут Д. Э. Все про ТЕХ./ Пер. с англ. М. В. Лисиной. — Протвино: АО РДТЭХ, 1993. — 592 с.: ил.
- Львовский С. М. Набор и верстка в системе LATEX. — 3-е изд., испр. и доп. — М.: МЦНМО, 2003. — 448 с.
- Физическая энциклопедия/ Гл. ред. А.М. Прохоров. — М.: Сов. энциклопедия. Тт. I – V. 1988.
- Цифровая обработка сигналов: Справочник/ Л.М. Гольденберг, Б.Д. Матюшкин, М.Н. Поляк. — М.: Радио и связь, 1985. — 312 с., ил.
- <http://www.imageprocessingplace.com/>
- Pan G. W. Wavelets in electromagnetic and device modeling. — John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2003. — 531 p.



Спасибо за внимание!

[mailto](mailto:)

eddy@sao.ru

edward.emelianoff@gmail.com

