

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ В ЦИФРОВОЙ ОСЦИЛЛОГРАФИИ

INTERPOLATION IN DIGITAL OSCILLOGRAPHY

Афонский А.А. (A. Afonskiy), доцент МГТУ им. Н.Э. Баумана, Суханов Е.В. (E. Sukhanov), инженер

ДИСКРЕТНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ПРОБЛЕМА ВОССТАНОВЛЕНИЯ СИГНАЛА

Поскольку цифровые осциллографы, в отличие от своих аналоговых собратьев, измеряют входной сигнал не непрерывно, а только в дискретные моменты времени, то при представлении осциллограммы пользователю возникает проблема. С одной стороны, прибор должен максимально точно отобразить результаты измерений, не рисуя «отсебятины», с другой — человеку трудно визуально воспринять форму сигнала, изображённого просто набором точек. Посмотрите на примеры на рисунках 1 и 2 (эти и все остальные использованные в статье иллюстрации получены с помощью программы АКТАКОМ Oscilloscope Pro версии 2.0.4.5 на осциллографе комбинированного прибора АСК-4106, рис. 3). Разглядеть сходство в точечном орнаменте первого рисунка синусоидальный сигнал, который обозначен на втором непрерывной линией, человеку со здоровой психикой просто невозможно. Так что необхо-

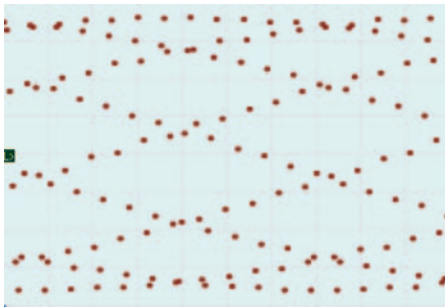


Рис. 1. Изображение осциллограммы дискретными точками

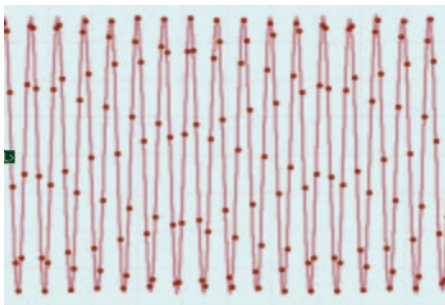


Рис. 2. Изображение осциллограммы с рисунка 1 непрерывной линией

димность для цифрового осциллографа уметь «нарисовать непрерывную линию по отдельным точкам» даже и не оспаривается, вопрос в другом: как это сделать?

ЛИНЕЙНАЯ ИНТЕРПОЛЯЦИЯ

Задача восстановления аналогового сигнала по его дискретным отсчетам, с точки зрения математики, это не что иное, как хорошо известная задача интерполяции непрерывной функции $F(x)$ по конечному числу N её точек X_0, X_1, \dots



Рис. 3. Комбинированный прибор (осциллограф-генератор) АСК-4106

X_i, \dots, X_N . Эти точки, в которых значение функции задано, называются узлами интерполяции. Поскольку в общем случае характер интерполируемой функции заранее неизвестен, то обычно задача интерполяции сводится к задаче кусочной аппроксимации: необходимо подобрать простые аналитические функции, которые будут считаться приближениями к исходной функции между узлами. В самих узлах значения аппроксимирующих функций должны совпадать с заданными значениями исходной функции. Самым простым решением будет аппроксимация линейными функциями вида $f_i(x) = a + b(x - X_i)$. Геометрически такая интерполяция представляет из себя ломаную линию, состоящую из соединённых в узлах прямых отрезков (см. рис. 4).

ИНТЕРПОЛЯЦИЯ ПОЛИНОМАМИ, ПРОБЛЕМА ЗВОНА

Угловато-неряшливый вид линейной интерполяции сразу наводит на мысли, что это не самое точное представление исходного сигнала. Действительно, мы знаем, что полоса пропускания измерительного тракта ограничена, в то время как у изображённой на рисунке 3 остроугольной осциллограммы спектр бесконечен. Следовательно, более справедливым представлением будет аппроксимация более гладкой функцией.

Такое решение даёт, например, метод интерполяции кусочно-кубическими функциями. Идея метода состоит в том, что исходная функция на каждом отрезке $[X_i, X_{i+1}]$ аппроксимируется многочленом третьей степени (т.е.

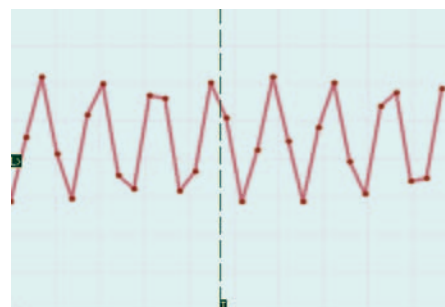


Рис. 4. Линейная интерполяция

функцией вида $f_i(x) = a + b(x - X_i) + c(x - X_i)^2 + d(x - X_i)^3$), при этом в узлах совпадают не только значения соседних многочленов, но и их первые производные (т.е. $f_i(X_{i+1}) = f_{i+1}(X_{i+1})$ и $f'_i(X_{i+1}) = f'_{i+1}(X_{i+1})$). Значения производных интерполирующих многочленов выбираются произвольно, исходя из дополнительной информации о характере исходной функции. Если никакой дополнительной информации нет, то обычно в качестве значений производных используются разделённые разности: $f'(X_i) = (F(X_{i+1}) - F(X_i)) / (X_{i+1} - X_i)$.



Рис. 5. Интерполяция кубическими многочленами Бесселя

Выполнение условия непрерывности производной гарантирует гладкость итоговой осциллограммы, но вызывает неприятный побочный эффект, называемый эффектом звона. Посмотрите на пример, изображённый на рисунке 5. Обратите внимание на появившиеся выбросы перед фронтом и срезом. Если выброс после фронта ещё можно объяснить возникающими после резкого изменения состояния сигнала затухающими колебаниями, то колебания, возникающие заранее перед событием, это физический нонсенс. На самом деле это ложные выбросы и их появление на осциллограмме обусловлено только выбранным характером интерполирующей функции.

Пользуясь произволом в определении значений производных интерполирующих многочленов, можно попытаться минимизировать эти искажения. Например, интерполяционный метод Акимы учитывает при выборе производной в узлах гладкость исходной функции на соседних с этим узлом участках. Для этого производная в каждом узле полагается равной среднему значению от разделённой разности первого порядка справа и слева, причём усреднение выполняется с весами, соответствующими модулю разделённой разности второго порядка с той же стороны. Пример интерполяции Акимы вы можете увидеть на рисунке 6, она выполнена для того же набора узловых точек, что и интерполяция Бесселя на рисунке 4.

**SINC-ИНТЕРПОЛЯЦИЯ (SIN(X)/X),
ОГРАНИЧЕНИЯ ПРИНИМАЕМОСТИ, ФИЛЬТР
ЛАНЦОША**

Интерполяция кусочно-кубическими функциями, или сплайн-интерполяция, как её часто называют, хорошо работает в случаях имеющегося запаса по частоте дискретизации, т.е. в случаях, когда количество точек измерений на



Рис. 6. Интерполяция сплайнами Акимы

период достаточно велико (десятки и более). Но при работе осциллографа в предельных ситуациях, когда частота измеряемого сигнала приближается к частоте Котельникова (см. врезку), т.е. к половине частоты дискретизации,

сплайны дают совершенно неудовлетворительный результат. На рисунке 7 показан пример интерполяции синусоидального сигнала частоты 39 МГц, оцифрованного с частотой 100 МГц. Как видите, интерполяция сплайнами (синяя и зелёная линии), показывая форму сигнала весьма далёкой от исходного синуса. Это и понятно: точек измерений мало и соответственно мало информации о форме сигнала, и нет никакого способа догадаться, что между двумя точками рядом с линией запуска (штриховая вертикальная линия в центре рисунка) сигнал имеет вершину с амплитудой, значительно превышающей ближайшие узловые точки. Или всё же такой способ есть?

Да, такой способ имеется. Хотя мы и не можем увеличить количество точек на период, но мы можем учесть дополнительные соображения, которые помогут нам восстановить форму сигнала. Мы можем уверенно предположить, что спектр измеряемого сигнала ограничен частотой Котельникова. Действительно, ведь если это не так, то нарушены условия применимости прибора, сделанные измерения заведомо не-

корректны, и мы их можем вовсе не обрабатывать, а сразу выкинуть. Следовательно, для построения интерполяционной кривой мы можем воспользоваться формулой интерполяции Sin(X)/X, являющейся следствием теоремы Котельникова:

$$f(x) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} F(X_i) \cdot \frac{\text{Sin}\left(\pi \frac{x - X_i}{X_{i+1} - X_i}\right)}{\pi \frac{x - X_i}{X_{i+1} - X_i}}$$

Заметив, что в нашем случае разность между узловыми точками $X_{i+1} - X_i$ постоянна и равна периоду дискретизации, а также используя традиционное обозначение

$$\text{Sinc}(X) \equiv \frac{\text{Sin}(\pi X)}{\pi X}, \text{Sinc}(0) \equiv 1,$$

можем записать формулу sinc-интерполяции в более кратком виде:

$$f(x) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} F(X_i) \cdot \text{Sinc}\left(\frac{x - X_i}{T}\right)$$

Темно-красная линия на рисунке 6 построена именно с помощью этого вида интерполяции, и её преимущество перед сплайн-интерполяцией в этом случае очевидно.

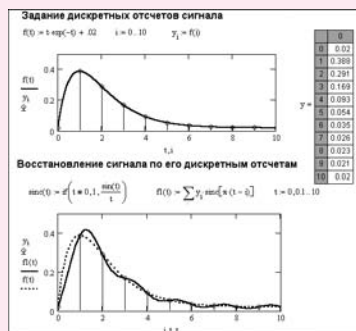
О выборе числа отсчетов и восстановлении сигналов

Принципиально важным теоретически и практически является вопрос о выборе числа отсчетов сигнала для его преобразования в цифровую форму и дальнейшего восстановления сигнала по его отсчетам. Как часто надо делать равномерные выборки произвольного сигнала, чтобы после преобразования в цифровую форму, а затем снова в аналоговую была сохранена форма сигнала? Ответ на этот важный вопрос дает теорема об отсчетах или теорема Котельникова (за рубежом именуемая также теоремой Найквиста, теоремой об отсчетах и т.д.): «Если спектр сигнала $e(t)$ ограничен высшей частотой f_B , то он без потери информации может быть представлен дискретными отсчетами с числом, равным $2 \cdot f_B$ ». При этом сигнал восстанавливается по его отсчетам $e(k \cdot dt)$, следующим с интервалом времени $dt = 1/f_B$, с помощью фильтра, реализующего восстановление по формуле:

$$e(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} e(k \cdot dt) \frac{\sin(\pi(t - k \cdot dt) / dt)}{\pi(t - k \cdot dt) / dt}. \quad (5.1)$$

Для восстановления непрерывного сигнала по его выборкам достаточно располагать функцией $\text{sinc}(t) = \sin(t)/t$ с учетом ее особого значения $\text{sinc}(t) = 1$ при $x=0$. Рисунок показывает пример дискретизации некоторого сигнала (нарастающая, а затем спадающая экспоненты) с периодом квантования dt и затем восстановления сигнала по выражению (5.1). Несмотря на малое число отсчетов (их 11) восстановленная форма сигнала весьма близка к форме исходного сигнала.

Чтобы восстановить исходный сигнал по его отсчетам надо иметь численные значения их и значение интервала дискретизации dt . Все эти данные нетрудно хранить в запоминающем устройстве. Если увеличить dt при восстановлении сигнала по формуле (5.1) в k раз, то восстановленный



Демонстрация дискретизации и восстановления сигнала в системе компьютерной математики Mathcad

сигнал без изменения формы будет растянут в k раз и его можно отобразить на экране достаточно низкочастотной ЭЛТ с простым низкочастотным усилителем.

Для восстановления сигнала не обязательно пользоваться фильтром на основе базиса Котельникова. Возможно применение и более простых фильтров, вплоть до обычного конденсатора или RC-фильтров нижних частот. Правда, при этом нужно несколько увеличивать частоту выборок.

Более подробно см. на сайте нашего журнала в энциклопедии измерений (www.kipis.ru/info).

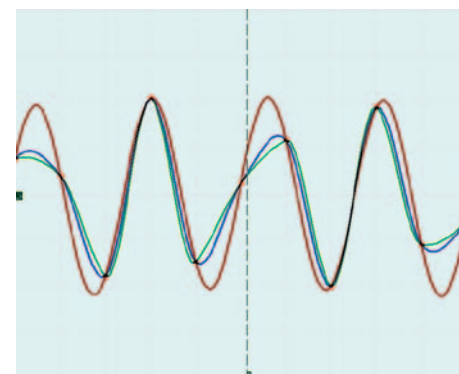


Рис. 7. Интерполяция при низкой частоте дискретизации. Частота сигнала 39 МГц, частота дискретизации 100 МГц. Синяя линия — интерполяция многочленами Бесселя, зелёная — интерполяция методом Акимы, красная — sinc-интерполяция

К сожалению, и этот метод не лишён недостатков. Во-первых, как видно из его базовой формулы, он требует для вычисления каждой промежуточной точки суммирования бесконечного ряда слагаемых, учитывающих все возможные дискретные измерения сигнала в прошлом и будущем, что, конечно, физически нереализуемо. И, во-вторых, даже если мы волевым решением ограничимся только имеющимися в осциллограмме точками, вычислительная сложность метода значительно выше, чем при интерполяции сплайнами. Если для вычисления кусочных многочленов количество операций растёт линейно с увеличением длины осциллограммы, то для sinc-интерполяции, как и для родственного ей преобразования Фурье, объём вычислений растёт как квадрат этой длины.

На практике обычно и с первой, и со второй проблемами борются использованием оконных функций, ограничивающих область вычислений интерполируемой точки некоторыми ближайшими окрестностями, причём вес ближайших узловых точек выше, чем дальних. Подходящими оконными функциями могут быть выбраны такие, как треугольное окно или окно Гаусса. В программе АКТАКОМ Oscilloscope Pro для этой цели применяется оконная функция

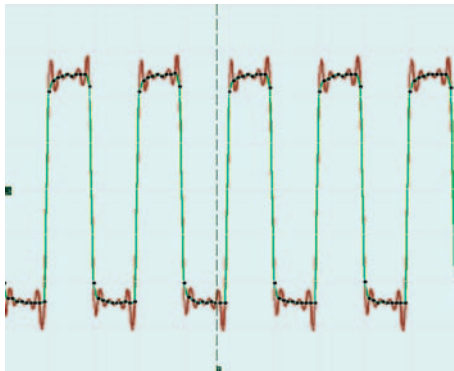


Рис. 8. Интерполяция прямоугольного сигнала. Частота сигнала 5 МГц, частота дискретизации 100 МГц. Зелёная линия — интерполяция методом Акимы, красная — sinc-интерполяция

Ланцоша, также построенная на использовании sinc-функции. Коэффициенты этой функции вычисляются следующим образом:

$$K_i = \begin{cases} \text{Sinc}(x) \cdot \text{Sinc}(x/r), & \text{для } x \neq 0 \\ 1, & \text{для } x = 0 \end{cases}, x = \left(\frac{i - N/2}{N/2} \right), i = 0, 1, \dots, N$$

Здесь параметр r — это «радиус фильтра», показывающий размер окна.

Третий недостаток sinc-интерполяции является продолжением его основного достоинства — ограниченности спектра восстанавливаемого сигнала. На рисунке 8 представлен прямоугольный сигнал с частотой 5 МГц, оцифрованный с частотой 100 МГц. Это максимальная частота дискретизации реального режима для

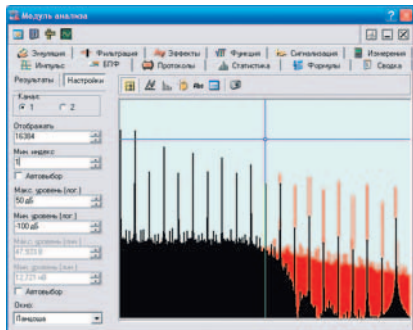


Рис. 9. Спектр интерполированных сигналов. Диапазон графика по горизонтали от 0 до 100 МГц. Курсором отмечена частота 50 МГц — половина частоты дискретизации. Для уменьшения размытия гармоник использовано окно Ланцоша. Красным изображён спектр прямоугольного сигнала после интерполяции методом Акимы, чёрным — спектр того же сигнала после sinc-интерполяции. Заметен резкий спад в полосе частот выше частоты Котельникова.

Спектр сигнала

Разложение функции на гармонические составляющие, то есть вычисление коэффициентов Фурье, принято называть спектральным анализом. А воссоздание функции, представленной рядом Фурье, называют спектральным синтезом. Гармонику периодической функции или сигнала с $k=1$ называют основной или первой гармоникой сигнала. Она задает его частоту повторения f_1 . Остальные гармоники называют высшими, их частоты равны $f_k = k \cdot f_1$, где $k=2,3,4, \dots$. Член $a_0/2$ это постоянная составляющая сигнала — ее можно трактовать как нулевую гармонику. Таким образом, спектр периодических сигналов, представимых рядом Фурье дискретный — он содержит набор фиксированных частот f_k , где $k=1,2,3, \dots$. Ясно, что такой ряд лишь одно из достаточно простых и возможных разложений $y(t)$ по ортогональному тригонометрическому базису.

Как видно из (1.9) сложные периодические сигналы могут содержать множество (теоретически бесконечное число) гармонических составляющих с разной амплитудой (1.10) и фазой (1.11). С помощью ряда Фурье мы может установить, сколько гармоник сигнала нужно для представления сложного сигнала с заданной погрешностью. Словом, мы можем узнать какими амплитудно-частотной (АЧХ) и фазо-частотной (ФЧХ) характеристиками должен обладать тракт того или иного устройства преобразования и передачи сигналов.

Еще в 1807 Фурье теоретически обосновал возможность гармонического синтеза произвольных периодических зависимостей, удовлетворяющих условиям Дирихле на промежутке $(-\pi, \pi)$. Ряд для представления таких зависимостей [3, 4]

$$y(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \sin(kx) + b_k \cos(kx)) \quad (1.3)$$



получил название ряда Фурье. Коэффициенты ряда (1.3) находятся по формулам Эйлера-Фурье:

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \cos(kx) dx \quad (1.4)$$

и

$$b_k = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} y(x) \sin(kx) dx \quad (1.5)$$

Важными сферами применения рядов Фурье стали радиотехнические устройства и системы. В них периодические сигналы обычно представляют как функции времени $y(t)$ на отрезке $[0, T]$ или $[-T/2, T/2]$ с периодом $T=1/f_1$, где f_1 — частота первой гармоники периодического сигнала. В этом случае ряд Фурье, после несложных преобразований, записывается в виде:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos(2\pi k f_1 t) + b_k \sin(2\pi k f_1 t)) \quad (1.6)$$

где

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \cos(2\pi k f_1 t) dt \quad (1.7)$$

и

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T y(t) \sin(2\pi k f_1 t) dt \quad (1.8)$$

В этом случае коэффициенты a_k (1.7) и b_k (1.8) ряда (1.6) описывают косинусную и синусную составляющие k -ой гармоники сигнала с периодом T и частотой $f_1=1/T$. Часто используется иная форма ряда Фурье, упрощающая его вычисления:

$$y(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^N M_k \cos(2\pi k f_1 t + \varphi_k), \quad (1.9)$$

Здесь амплитуды гармоник M_k и их фазы φ_k определяются выражениями:

$$M_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2} \quad (1.10)$$

и

$$\varphi_k = -\arctan(b_k/a_k). \quad (1.11)$$

Более подробно см. на сайте нашего журнала в энциклопедии измерений (www.kipis.ru/info).

осциллографа АСК-4106, но этот прибор имеет ещё и стробоскопический режим, поэтому его полоса пропускания выше необходимых по Котельникову 50 МГц и тоже составляет 100 МГц. В результате sinc-интерpolator, обрезая в осциллограмме все компоненты спектра выше 50 МГц, показывает значительные звонные искажения сигнала (тёмно-красная линия), особенно заметные по сравнению с интерполяцией по методу Акимы (зелёная линия).

На рисунке 9 вы можете сравнить спектры сигналов (см. врезку) после ин-

терполяции Акимы и после sinc-интерполяции.

ПЛЮСЫ И МИНУСЫ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ИНТЕРПОЛЯЦИИ. АВТОМАТИЧЕСКИЙ ВЫБОР МЕТОДА

Подведём итоги. Самый простой и быстрый способ интерполяции — линейная интерполяция, просто соединяющая узловые точки прямыми отрезками. При подробном рассмотрении формы сигнала качество картинки неудовлетворительное, но в случаях, когда частота исследуемого сигнала невелика по сравнению с частотой дискретиза-

ции, а количество точек, изображаемых на экране, напротив, сравнимо с его разрешением, использование этого метода оправдано из-за самой высокой скорости работы.

Интерполяция сплайнами несколько медленнее линейной, но качество воспроизведения сигнала значительно выше. Используя различные методы сплайн-интерполяции, например, Бесселя для более гладкого восстановления сигнала или Акимы для минимизации ложных осцилляций, можно качественно и быстро восстанавливать низкочастотные сигналы.

Наконец, sinc-интерполяция представляет наилучшие возможности восстановления высокочастотных сигналов по минимуму узловых точек. Однако, является самой медленной из рассмотренных (например, на современном компьютере sinc-интерполяция полной осциллограммы из 64000 точек в программе АКТАКОМ Oscilloscope Pro занимала чуть более трёх секунд, при этом сплайн-интерполяция той же осциллограммы — всего 250 миллисекунд). Кроме того, заведомо ограничивает спектр восстанавливаемого сигнала, что может приводить к появлению сильного звона на участках сигнала с крутыми фронтами.

Таким образом, зная общие особенности измеряемого сигнала, следует использовать разные методы интерполяции.

В большинстве современных недорогих USB осциллографов такой выбор отсутствует и пользователь, не зная и не имея возможности изменить какие-либо параметры интерполяции, не ви-

дит реальный измеряемый сигнал и, таким образом, неверно интерпретирует результаты измерений. Что приводит в свою очередь к большим ошибкам в решении реальных измерительных задач.

В тоже время, основными достоинствами программного обеспечения АКТАКОМ Oscilloscope Pro последней версии 2.0.4.5 являются как возможность выбора пользователем метода интерполяции, который он считает наиболее



Рис. 10. Осциллографы и комбинированные приборы АКТАКОМ ASK-3002, ASK-3102, ASK-3102 1T, ASK-3102 1M, ASK-3106, ASK-3116, ASK-3106L, ASK-3117, ASK-3107L, ASK-3172, ASK-3174, ASK-4106, ASK-4114, ASK-4174

более подходящим для его условий измерений (либо отключение интерполяции), так и возможность программы автоматически выбирать метод в зависимости от параметров сигнала. Последний режим рекомендуется для начинающих пользователей и установлен в программе по умолчанию.

АКТАКОМ Oscilloscope Pro версии 2.0.4.5 совместимо с осциллографами и комбинированными приборами АКТАКОМ ASK-3002, ASK-3102, ASK-3102 1T, ASK-3102 1M, ASK-3106, ASK-3116, ASK-3106L, ASK-3117, ASK-3107L, ASK-3172, ASK-3174, ASK-4106, ASK-4114, ASK-4174 (рис. 10).

В настоящий момент АКТАКОМ

Oscilloscope Pro последней версии 2.0.4.5 является одним из самых развитых примеров программного обеспечения для USB и LAN приборов на рынке, поставляемых бесплатно в комплекте с самим прибором.

ЛИТЕРАТУРА

1. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс. 2007.
2. Афонский А.А., Суханов Е.В. «Осциллографы Вашей мини USB-лаборатории АКТАКОМ». Журнал контрольно-измерительные приборы и системы, 2008, №1, стр. 13.
3. Афонский А.А., Суханов Е.В. «LabVIEW в USB лаборатории». Журнал контрольно-измерительные приборы и системы, 2005, № 6, стр. 29.
4. Афонский А. А., Дьяконов В. П. Цифровые анализаторы спектра сигналов и логики. Под ред. проф. В. П. Дьяконова. М.: СОЛОН-Пресс. 2009. ☐

Digital oscilloscopes, unlike their analog counterpart, measure the input signal not continuous but at discrete moments of time. On the one hand the device should display the most accurate measurements, on the other — it is difficult to visually perceive the shape of signal displayed as just a set of dots. There is a need to «draw a continuous line on certain dots» but the question is: how to do this? This article tells about different methods of signal interpolation, their benefits and disadvantages.

НОВОСТИ на www.kipis.ru

НОВЫЙ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ГЕНЕРАТОР АКТАКОМ

В модельном ряду АКТАКОМ появился высокочастотный генератор АНР-2140, работающий в диапазоне частот от 10 кГц до 1 ГГц. Несмотря на широкий диапазон частот, АНР-2140 имеет достаточно высокое разрешение по частоте — 10 Гц и высокую точность установки частоты — всего 1 ppm.



актакoм

Генератор АНР-2140 позволяет выдавать сигналы с амплитудной (АМ), фазовой (ФМ) и частотной (ЧМ) модуляцией. Причем, источник модуляции может быть как внутренним, так и внешним. Частота внутренней модуляции может быть вы-

брана 400 Гц или 1 кГц, а для внешней модуляции может быть применена частота от 10 Гц до 50 кГц.

Основные параметры модуляции:

- для амплитудной модуляции: глубина (коэффициент) АМ 0...99,5% с разрешением 0,5%;
- для частотной модуляции: девиация частоты 0...100 кГц с разрешением до 10 Гц;
- для фазовой модуляции: диапазон 0...10 радиан с разрешением 0,01 радиан.

Амплитуда выходного сигнала может быть установлена в диапазоне от -127 дБм до +6 дБм, что соответствует диапазону от 0,2 мкВ до 892 мВ. Шаг установки амплитуды составляет всего 0,1 дБ.

В качестве выходного разъема радиочастотного сигнала используется разъем N-типа с импедансом 50 Ом. Выходной контур обеспечивает защиту от реверсивных входных сигналов мощностью до 25 Вт.

В генераторе АКТАКОМ АНР-2140 предусмотрена возможность сохранения во внутреннюю память

до 100 установок частоты, модуляции и значений выходного уровня. Кроме того, для частотной модуляции предусмотрен выбор трех предустановок девиации частоты: 3,5 кГц; 22,5 кГц; 75 кГц, а для амплитудной модуляции — глубина модуляции 30%. Также имеется возможность сохранить пользовательские настройки выходного уровня (3 предустановки). Информация о параметрах и установках в генераторе АКТАКОМ АНР-2140 выводится на четыре отдельных светодиодных индикатора.

Довольно крупные и яркие светодиодные матрицы отображают информацию о различных параметрах и режимах всегда в наглядном и доступном виде. Основной дисплей имеет девять разрядов: на нем отображается частота выходного сигнала. Дисплей, отображающий выходной уровень, имеет четыре разряда; дисплей модуляции — трехразрядный; а памяти — двухразрядный.

www.aktakom.ru