

# Осциллографы АКИП-4133 и АКИП-4133 / 1 с полосой пропускания 16 ГГц

Часть 1

УДК 621.317 | ВАК 05.11.08

Я. Россоский<sup>1</sup>

Компания Eltesta (Вильнюс, Литва) разработала широкополосные цифровые осциллографы АКИП-4133 и АКИП-4133 / 1. Они занимают промежуточное положение между двумя традиционными типами осциллографов – реального времени и стробоскопическими. Об особенностях и характеристиках данных приборов рассказывается в статье.

## НЕМНОГО ИСТОРИИ

Являясь наиболее распространенным радиоизмерительным прибором для разработчиков и производителей электронного оборудования, осциллограф позволяет точно и быстро регистрировать, отображать, измерять и анализировать электрические сигналы. Польза осциллографов ограничивается далеко не только миром электроники. В сочетании с соответствующими датчиками-преобразователями осциллографы могут измерять различные физические величины – механические, акустические, оптические и многие другие.

Сегодня все разрабатываемые осциллографы являются цифровыми. Однако, несмотря на большую номенклатуру их технических характеристик, трудно не согласиться с тем, что полоса пропускания является наиважнейшей.

Когда вы выбираете осциллограф для измерения сигналов в полосе частот до 100 МГц, вы определенно понимаете, что здесь понадобится осциллограф с полосой пропускания, по крайней мере, 150 МГц. Для этого диапазона частот вы, пожалуй, обойдетесь затратами меньше 1 тыс. долл. США.

Если же ваши задачи лежат в диапазоне частот до 1 ГГц, без наличия осциллографа с полосой пропускания 1,5 ГГц ваша ситуация будет критической, и это потребует затрат уже свыше 15 тыс. долл. США.

Еще сложнее оказывается положение, когда вам необходимо исследовать процессы, лежащие в диапазоне частот до 10 ГГц или анализировать импульсы длительностью 100 пс! И, хотя такие задачи уже сравнительно давно не являются чем-то экзотическим, скорости стандартной логики перешагнули рубеж 40 ГГц, а современные коммуникационные стандарты требуют еще больших тактовых частот, вам определенно потребуется бюджет, близкий к 180 тыс. долл. США.

Чтобы существенно увеличить полосу пропускания, в начале 1960-х годов были созданы первые стробоскопические осциллографы, полоса пропускания которых уже к середине 1970-х годов достигла 18 ГГц. При этом наиболее широкополосные универсальные аналоговые осциллографы с полосой пропускания 1 ГГц появились только в 1979 году. С середины 1980-х годов аналоговые осциллографы повсеместно заменялись на цифровые запоминающие, в то время как цифровые стробоскопические выпускаются до сих пор.

Цифровые запоминающие осциллографы с полосой пропускания 15 ГГц и выше появились в конце первого десятилетия 2000-х годов, то есть приблизительно 10 лет назад. В настоящее время стробоскопические осциллографы достигли полосы пропускания 100 ГГц, а цифровые осциллографы – даже 110 ГГц. Таким образом, если в начале 1980-х годов соотношение полосы пропускания стробоскопических и аналоговых осциллографов составляло 18:1, то сегодня полосы пропускания стробоскопических и цифровых запоминающих осциллографов практически сравнялись.

Ко второй половине 1990-х годов выкристаллизовалось понятие цифрового осциллографа реального времени, базирующееся на критерии Найквиста. Согласно теореме Найквиста (применительно к осциллографии) сигнал после его регистрации может быть корректно реконструирован и отображен без искажений, если полоса пропускания осциллографа меньше половины частоты дискретизации, причем дискретные значения должны быть получены через равные промежутки времени.

Создание новых аналого-цифровых преобразователей (АЦП) с частотой дискретизации десятки гигагерц представляло собой серьезную техническую проблему, поэтому стробоскопические осциллографы долгое время являлись незаменимыми. Даже сегодня у рядового потребителя отсутствует практическая возможность

<sup>1</sup> ЗАО Eltesta, исполнительный директор, info@eltesta.com.

приобрести АЦП с частотой дискретизации выше 10 ГГц у наиболее известных производителей электронных компонентов.

С расширением полосы пропускания и повышением частоты дискретизации на первые позиции выдвинулась проблема стоимости приборов, связанная не только с требованиями высоких технических характеристик, но и с определенной политикой основных производителей. Соотношение стоимостей цифрового осциллографа реального времени и стробоскопического осциллографа, имеющих одинаковые число каналов и полосу пропускания, уже превышает три раза.

### РЫНОК ОСЦИЛЛОГРАФОВ С ПОЛОСой ПРОПУСКАНИЯ БЛИЗКОЙ К 16 ГГц

В настоящее время серийно стробоскопические осциллографы с полосой пропускания 15–30 ГГц выпускают только три компании – Keysight Technologies, Tektronix и Pico Technology, причем последняя продает приборы, разработанные и производимые предприятием Eltesta. Компания Teledyne LeCroy с рынка стробоскопических осциллографов ушла.

Схожая ситуация наблюдается на рынке цифровых осциллографов с полосой пропускания, близкой к 16 ГГц. Там присутствуют Keysight Technologies, Teledyne LeCroy, Tektronix и Rohde & Schwartz, а в настоящее время к ним присоединились Pico Technology и АО «ПриСТ», распространяющие продукцию компании Eltesta.

Отдельно необходимо упомянуть класс широкополосных анализаторов сигналов, ориентированных только на коммуникационные измерения. Здесь присутствуют компании Keysight Technologies, Anritsu и MultiLane. По нашему мнению, такие приборы не являются осциллографами уже хотя бы потому, что минимальная частота синхронизации у них превышает 500 МГц, т. е. эти приборы не могут считаться универсальными.

Следует отметить, что осциллограф АКИП-4133 (рис. 1) с полосой пропускания 16 ГГц получил название «широкополосный осциллограф» (wide-bandwidth oscilloscope). В процессе его разработки рассматривались также такие названия, как Near real-time oscilloscope и SXRTO (Sampler-extended real-time oscilloscope).

### РЕАЛЬНОЕ ВРЕМЯ, ЭКВИВАЛЕНТНОЕ ВРЕМЯ И НЕ ТОЛЬКО

В настоящее время известны следующие основные методы захвата широкополосных сигналов с помощью осциллографов:

- режим дискретизации в реальном времени (real-time sampling);
- режим дискретизации со случайным стробированием в эквивалентном времени (random equivalent-time sampling, random interleaved sampling);

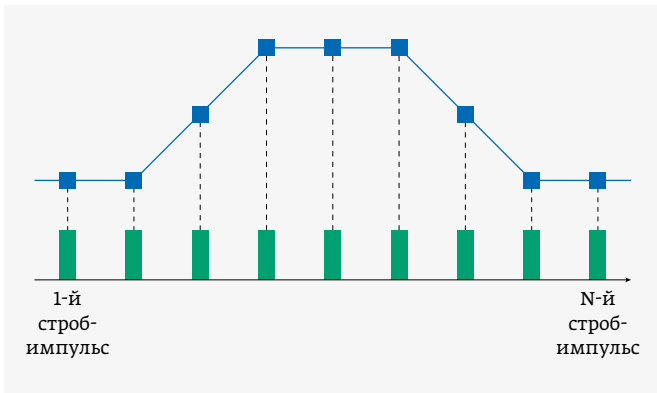
- режим дискретизации с последовательным стробированием в эквивалентном времени (sequential equivalent-time sampling, традиционные стробоскопические осциллографы);
- технология с чередованием полос пропускания (digital bandwidth interleave);
- режим когерентной чередующейся выборки (coherent interleaved sampling);
- режим прецизионной временной базы (low jitter или precision time base).

Осциллограф АКИП-4133 использует первые два вида дискретизации – в реальном времени и со случайным стробированием в эквивалентном времени. Сделано это, прежде всего, потому, что оба режима обеспечивают универсальность, а также вертикальное и горизонтальное разрешения, типичные для высокопроизводительных широкополосных универсальных осциллографов, однако, по принципиально более доступной цене.

Чтобы понять, каким образом это достигается, необходимо обратиться к структурным схемам цифрового запоминающего осциллографа (ЦЗО). В ЦЗО аналоговый сигнал дискретизируется и оцифровывается с помощью АЦП, превращаясь в мгновенную выборку, которая в дальнейшем запоминается в памяти осциллографа. Разрядность АЦП определяет разрешающую способность по напряжению, или разрешение по вертикали, в то время, как количество выборок, взятых за один или несколько циклов захвата входного сигнала, определяет разрешающую способность по времени, или разрешение по горизонтали, что определяет в итоге интегральную точность



Рис. 1. Цифровые запоминающие осциллографы с полосой пропускания 16 ГГц: четырехканальный АКИП-4133 (два прибора сверху) и двухканальный АКИП-4133/1 (два прибора снизу)



**Рис. 2.** Цикл захвата сигнала в реальном времени

измерений. Если в процессе дискретизации полученное количество выборок недостаточно, цифровая реконструкция формы сигнала не будет являться точным представлением исходного аналогового сигнала, т. е. она не будет верной. Это актуально для дискретизации как в реальном, так и в эквивалентном времени.

### ДИСКРЕТИЗАЦИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

При дискретизации в реальном времени осциллограф производит выборку всего сигнала за один цикл. Поэтому такой режим дискретизации идеально подходит для захвата однократных или редко повторяющихся сигналов (рис. 2).

Осциллограф АК ИП-4133 содержит четыре 12-разрядных АЦП, имеющих максимальную частоту дискретизации 500 МГц. Это означает, что такой осциллограф позволяет зарегистрировать четыре независимых однократных сигнала, содержащих высокочастотные компоненты до 250 МГц.

Необходимо отметить, что именно высокая частота дискретизации в большей степени, чем входные аналоговые узлы, влияет на стоимость прибора, накладывая существенные ограничения при его разработке. Во избежание этого в осциллографе АК ИП-4133 был использован режим дискретизации со случайным стробированием в эквивалентном времени, отличающийся чрезвычайно высоким временным разрешением, равным 400 фс.

### ДИСКРЕТИЗАЦИЯ СО СЛУЧАЙНЫМ СТРОБИРОВАНИЕМ В ЭКВИВАЛЕНТНОМ ВРЕМЕНИ

Несколько несложных расчетов показывает необходимые требования к временному разрешению осциллографа с полосой пропускания 16 ГГц.

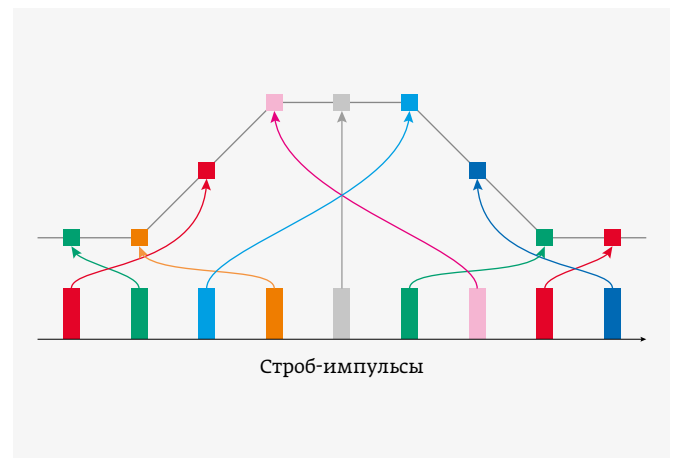
Такой осциллограф пригоден для измерения глазковых диаграмм с тактовой частотой приблизительно в два раза меньшей, чем полоса пропускания осциллографа, то есть 8 ГГц. Период этой последовательности

равен 125 пс и может быть отображен на шести делениях горизонтальной шкалы с приблизительно 20 пс/деление. Для качественного измерения глазковой диаграммы необходимо, по крайней мере, 300 точек, то есть временное разрешение осциллографа должно быть 400 фс. Это в 5 000 раз выше, чем частота стробирования осциллографа в реальном времени.

Другой пример показывает сколько точек могут быть использованы при оценке собственной переходной характеристики при подобном же разрешении. Осциллограф с полосой пропускания 16 ГГц имеет собственное время нарастания переходной характеристики от уровня 10% до уровня 90% приблизительно 22 пс, что будет соответствовать 55 точкам отсчета по горизонтали.

Безусловно, дискретизация со случайным стробированием в эквивалентном времени может быть использована только для повторяющихся сигналов. Однако множество быстродействующих сигналов именно такими и являются, или их можно сделать такими при выполнении тестов, поэтому круг задач, решаемых с применением данного метода, может быть чрезвычайно широким. В режиме случайного стробирования в эквивалентном времени АЦП работает на внутренней 500-МГц тактовой частоте, асинхронной по отношению как ко входному сигналу, так и к сигналу синхронизации (рис. 3). Выборки сигнала делаются независимо от сигнала синхронизации, однако в дальнейшем их положение относительно момента синхронизации определяется с помощью временного интерполятора – высокоточного измерителя однократных временных интервалов.

Интерполятор измеряет временной интервал между синхроимпульсом и следующим за ним строб-импульсом с разрешением 400 фс и, хотя строб-импульсы являются последовательными, они случайны по отношению ко



**Рис. 3.** Цикл захвата сигнала при случайном стробировании в эквивалентном времени

входному сигналу. Отсюда и термин, который получила эта технология, – «случайное стробирование».

Отметим еще два преимущества осциллографа АКИП-4133 по сравнению, например, с традиционными стробоскопическими осциллографами. Во-первых, прибор имеет внутреннюю синхронизацию, а во-вторых – он не требует опережающего сигнала синхронизации и позволяет работать с предзаписью. Возможность сбора и просмотра информации, предшествующей запуску, является неопределимым свойством такого прибора при поиске неисправностей и позволяет разработчику эффективно находить их причины, чего не обеспечивает традиционный стробоскопический осциллограф.

### СРАВНИТЕЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ОСЦИЛЛОГРАФОВ

В табл. 1 приведены сравнительные характеристики трех типов четырехканальных USB-осциллографов – осциллографа реального времени АКИП-76404D, осциллографа реального времени со случайным стробированием в эквивалентном времени АКИП-4133 и стробоскопического осциллографа с последовательным стробированием в эквивалентном времени АКИП-4132/9.

Для сравнения приведем технические и ценовые характеристики настольных четырехканальных широкополосных осциллографов реального времени, поставляемых ведущими производителями:

- Keysight Technologies, DSOV164A: полоса пропускания 16 ГГц; четыре канала; максимальная частота дискретизации 80 Гвыб./с (два канала), 40 Гвыб./с (четыре канала); максимальный объем памяти 2 Гвыб.; цена 226 500 долл. США;
- Tektronix, DPO71604C: полоса пропускания 16 ГГц; четыре канала; частота дискретизации 100/50 Гвыб./с; длина записи на канал 31,25–250 млн точек; цена 256 500 долл. США;
- Teledyne LeCroy, WaveMaster 816Zi-B: полоса пропускания 16 ГГц; четыре канала; частота дискретизации 80/40 ГГц; максимальный объем памяти 32–256 Мбайт; цена 204 970 долл. США.

### СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОСЦИЛЛОГРАФА АКИП-4133

Обобщенная структурная схема осциллографа АКИП-4133 показана на рис. 4. Основными узлами прибора являются система сбора данных, многофункциональная ПЛИС, микроконтроллер с USB- и LAN-интерфейсами, а также источник питания (прибор питается от 12-В сетевого адаптера). Управление работой осуществляется по интерфейсу USB. Система сбора данных содержит четыре идентичных канала, устройство синхронизации и интерполятор. Их работа описана ниже.

### КАНАЛ ВЕРТИКАЛЬНОГО ОТКЛОНЕНИЯ

Центральным элементом каждого из четырех каналов осциллографа является широкополосное устройство выборки и хранения (УВХ), запоминающее аналоговое напряжение на входе канала в момент времени, определяемый приходом строб-импульса с частотой 500 МГц. Полоса пропускания каждого из каналов составляет 16 ГГц. Структурная схема канала вертикального отклонения приведена на рис. 5.

Входной сигнал разветвляется на симметричном полосковом резистивном делителе напряжения. Одна половина сигнала поступает на УВХ, другая – на компаратор синхронизатора. Входное сопротивление канала равно  $(50 \pm 1,5)$  Ом. При максимально допустимом входном

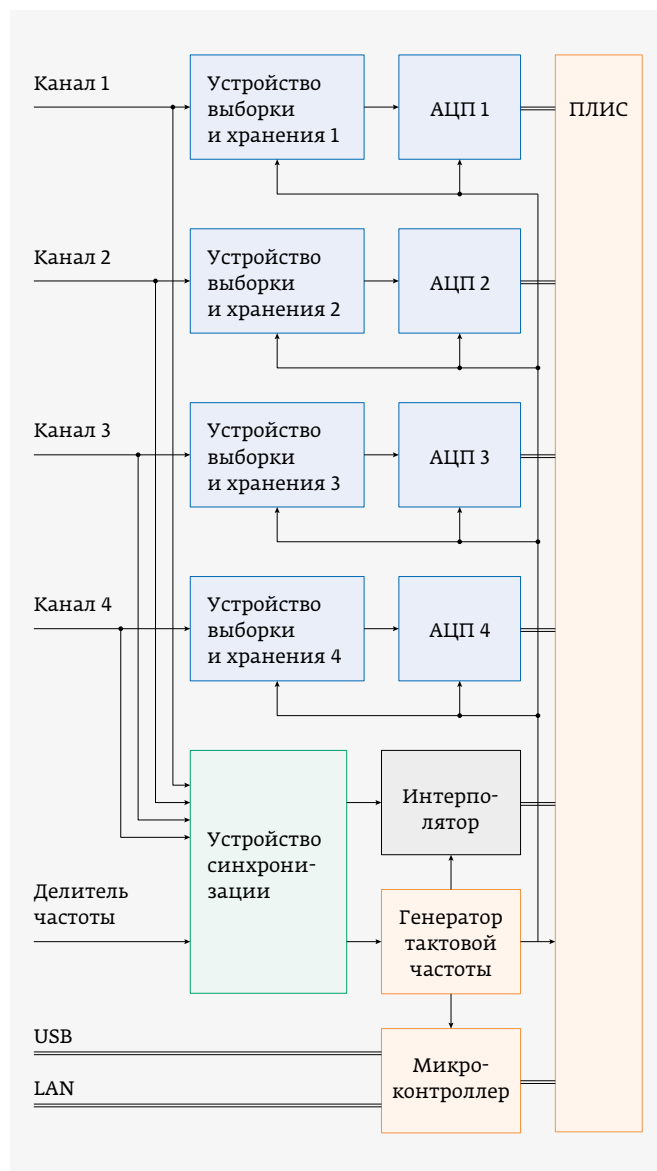


Рис. 4. Обобщенная структурная схема осциллографа АКИП-4133

Таблица 1. Сравнительные характеристики USB-осциллографов различных типов

Параметры	АКИП-76404D	АКИП-4133	АКИП-4132/9
Тип осциллографа	Реального времени	Со случайным стробированием в эквивалентном времени	Стробоскопический с последовательным стробированием в эквивалентном времени
Число каналов	4	4	4
Полоса пропускания	500 МГц	16 ГГц	25 ГГц
Среднеквадратический уровень собственных шумов, мВ	0,32 при отклонении 5 мВ/дел	2,4 при всех отклонениях	2,5 при всех отклонениях
Погрешность измерения постоянного напряжения	±3% от полной шкалы	±2% от полной шкалы	±2% от полной шкалы ±2 мВ
Коэффициенты отклонения	10 мВ/дел – 4 В/дел (1 МОм); 10 мВ/дел – 1 В/дел (50 Ом)	10–250 мВ/дел (50 Ом)	1–500 мВ/дел (50 Ом)
Самая быстрая развертка	Реальное время: 1 нс/дел. Эквивалентное время: 50 пс/дел	20 пс/дел	5 пс/дел
Погрешность измерения временных интервалов	±2 ppm · T <sub>i</sub>	±50 ppm · T <sub>i</sub> + 0,1% · T <sub>s</sub> + 5 пс	±0,2% · T <sub>i</sub> ± 12 пс или ±5% · T <sub>i</sub> ± 5 пс
Предзапись	Да	Да	Нет
Частота стробирования в реальном времени	1/2, 5/5 ГГц	500 МГц	1 МГц
Частота стробирования в эквивалентном времени	50 ГГц	2,5 ТГц (случайное стробирование)	15 ТГц (последовательное стробирование)
Разрядность АЦП, бит	8	12	16
Длина памяти	До 2 Гвыб	250 Квыб	32 Квыб
Внутренняя синхронизация	До 500 МГц	До 5 ГГц	До 100 МГц
Внешняя синхронизация	Нет	До 16 ГГц	До 16 ГГц
Синхронизация с восстановлением тактовой частоты	Нет	До 8 Гбит/с	До 11,3 Гбит/с
Среднеквадратическое значение нестабильности синхронизации, пс	Нет спецификации	<2	<2
Цена (октябрь 2019), руб.	610 830	1 460 560	2 383 200

Примечание: T<sub>i</sub> – длина измеряемого временного интервала, T<sub>s</sub> – время, соответствующее ширине экрана.



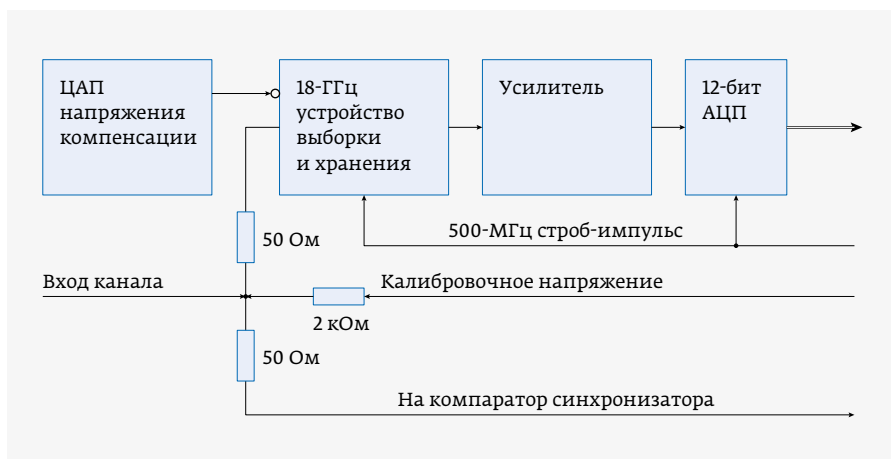


Рис. 5. Структурная схема канала вертикального отклонения

напряжении  $\pm 1,4$  В динамический диапазон входных сигналов составляет  $\pm 0,8$  В.

Осциллограф АК ИП-4133 обеспечивает три режима полосы пропускания. Их переходные характеристики приведены на рис. 6. В режиме широкой полосы пропускания прибор имеет полосу пропускания 16 ГГц при типовом среднеквадратическом значении уровня собственных шумов менее 2,2 мВ. В этом режиме УВХ работает в своем традиционном режиме выборки и хранения. В режиме средней полосы осциллограф обладает полосой пропускания 450 МГц при уровне шумов 0,65 мВ. В режиме узкой полосы в тракте используется дополнительный

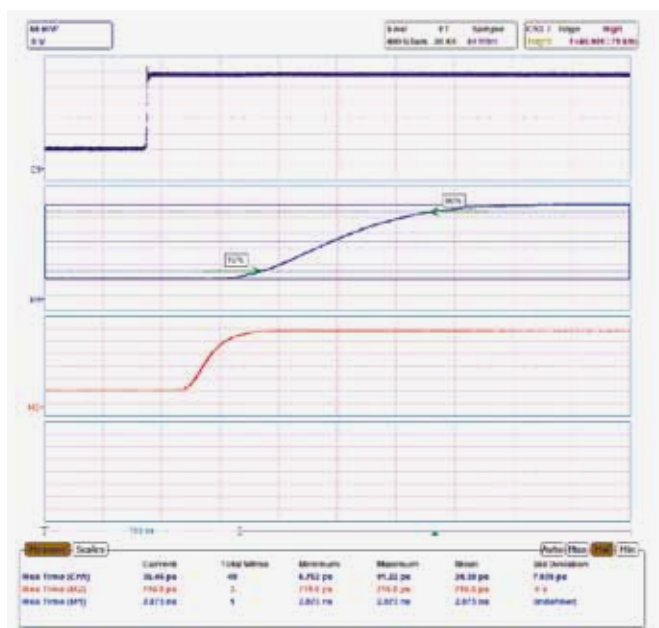


Рис. 6. Три формы переходных характеристик осциллографа АК ИП-4133 в зависимости от полосы пропускания. Сверху вниз: широкая, узкая и средняя

усилитель, обеспечивающий полосу пропускания 100 МГц при уровне шумов 0,45 мВ.

На рис. 7 приведены частотные характеристики, измеренные в различных рабочих каналах четырех осциллографов. Из графиков видно, что полоса пропускания, определяемая как диапазон частот, в пределах которого ослабление сигнала не превышает  $-3$  дБ относительно величины сигнала на опорной частоте 10 МГц, во всех каналах превышает 16 ГГц.

Скорость воспроизведения импульсного сигнала в осциллографе характеризуется временем нарастания переходной характеристики, ко-

торое определяют как время нарастания изображения импульса от уровня 10% до уровня 90% амплитуды. Осциллограф с полосой пропускания 16 ГГц должен обладать расчетным временем нарастания, близким к 22 пс.

Для проверки этого параметра необходимо использовать перепад напряжения с длительностью фронта 7–8 пс, что на практике осуществить достаточно сложно. На рис. 8 приведена суммарная переходная характеристика осциллографа АК ИП-4133 и генератора импульсов АК ИП-3308/3 с формирователем перепада напряжения, имеющим длительность фронта приблизительно 20 пс. Суммарное время нарастания пары осциллограф / генератор составляет 30,31 пс.

Как устройство выборки и хранения, так и усилители, используемые в осциллографе, отличаются высокой линейностью. 12-разрядный АЦП позволяет изменять коэффициенты отклонения от 10 до 250 мВ/дел, сохраняя при этом типовое значение погрешности измерения

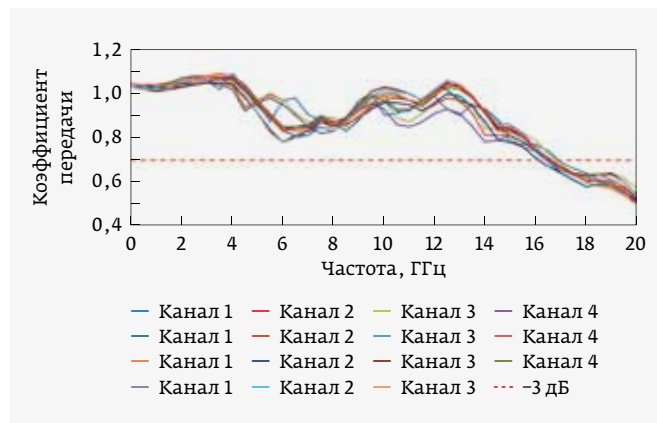
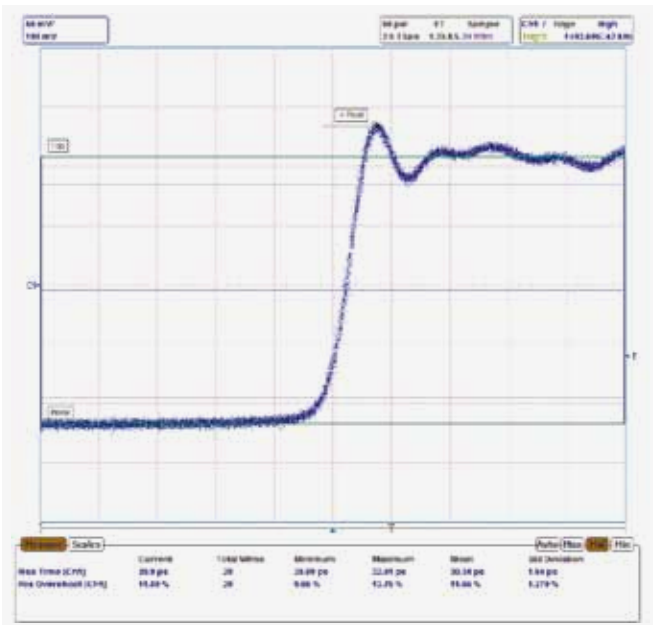


Рис. 7. Частотные характеристики, полученные при 16 измерениях в различных каналах четырех осциллографов АК ИП-4133



**Рис. 8.** Суммарная переходная характеристика осциллографа АК ИП-4133 и генератора импульсов АК ИП-3308/3 с формирователем, имеющим длительность фронта 20 пс. Суммарное время нарастания 30,31 пс

напряжения менее  $\pm 1,5\%$  от полного номинала шкалы. На рис. 9 приведена осциллограмма автоматического измерения амплитуды прямоугольного импульса. При установленной на источнике сигнала амплитуде импульса, равной 700 мВ, измеренное значение составляет 703,1 мВ, что соответствует погрешности 0,44%.

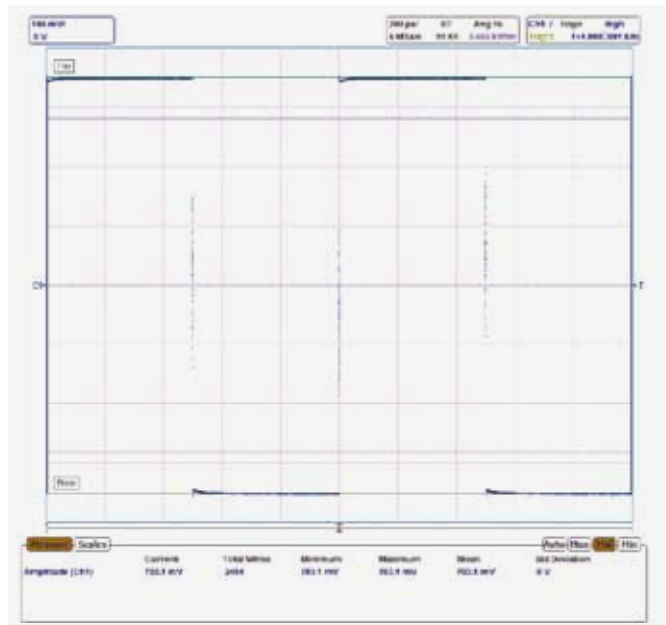
Дифференциальная структура устройства выборки и хранения позволила просто и эффективно обеспечить подачу напряжения компенсации. Оно изменяется от  $-1$  до  $+1$  В для любого коэффициента отклонения с типовой погрешностью  $\pm 1\%$ , при этом уход нуля не превышает 1 мВ.

### СИСТЕМА ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

Одной из ключевых проблем при разработке столь широкополосного осциллографа, как АК ИП-4133, стало создание синхронизатора, обладающего предельно низким значением нестабильности синхронизации. Трудности, прежде всего, были связаны со следующими причинами.

Во-первых, АК ИП-4133 не является осциллографом реального времени, удовлетворяющим критерию Найквиста во всей полосе пропускания. Поэтому использование так называемого программного режима синхронизации не представлялось возможным.

Во-вторых, не предполагалась разработка синхронизатора, как законченной БИС, что значительно удорожило бы разработку. В итоге синхронизатор был создан на базе



**Рис. 9.** Автоматические измерения амплитуды прямоугольного импульса с погрешностью менее 0,5%

наиболее быстродействующих интегральных микросхем, обладающих скоростями переключения 6–10 ГГц и крутизной выходных перепадов свыше 4 В/нс.

Структурная схема синхронизатора приведена на рис. 10. Осциллограф обеспечивает внутреннюю синхронизацию в полосе частот до 5 ГГц для любого из четырех каналов (рис. 11). Входные быстродействующие компараторы позволяют регулировать уровень синхронизации и гистерезис, обеспечивая чувствительность лучше 50 мВ.

В режиме прямой внутренней синхронизации возможно выбрать любую из полярностей синхронизации, а также использовать двухполярный режим, который позволяет регистрировать так называемые псевдоглазковые диаграммы. Такой режим может быть использован для частот до 2,5 ГГц.

Для расширения диапазона внутренней синхронизации до 5 ГГц в осциллографе предусмотрен режим с делителем частоты. Этот режим особенно актуален при измерениях на таких популярных тактовых частотах, как 2,5 и 3,25 ГГц.

Отличительной особенностью осциллографа АК ИП-4133 является возможность синхронизации предельно короткими импульсами. Это актуально как при регистрации простых импульсных сигналов, так и при анализе высокочастотных последовательностей. На рис. 12 приведен пример синхронизации коротким импульсом длительностью менее 81 пс. Импульсы такой длительности являются самыми короткими в последовательности, имеющей тактовую частоту 12,5 Гбит/с.

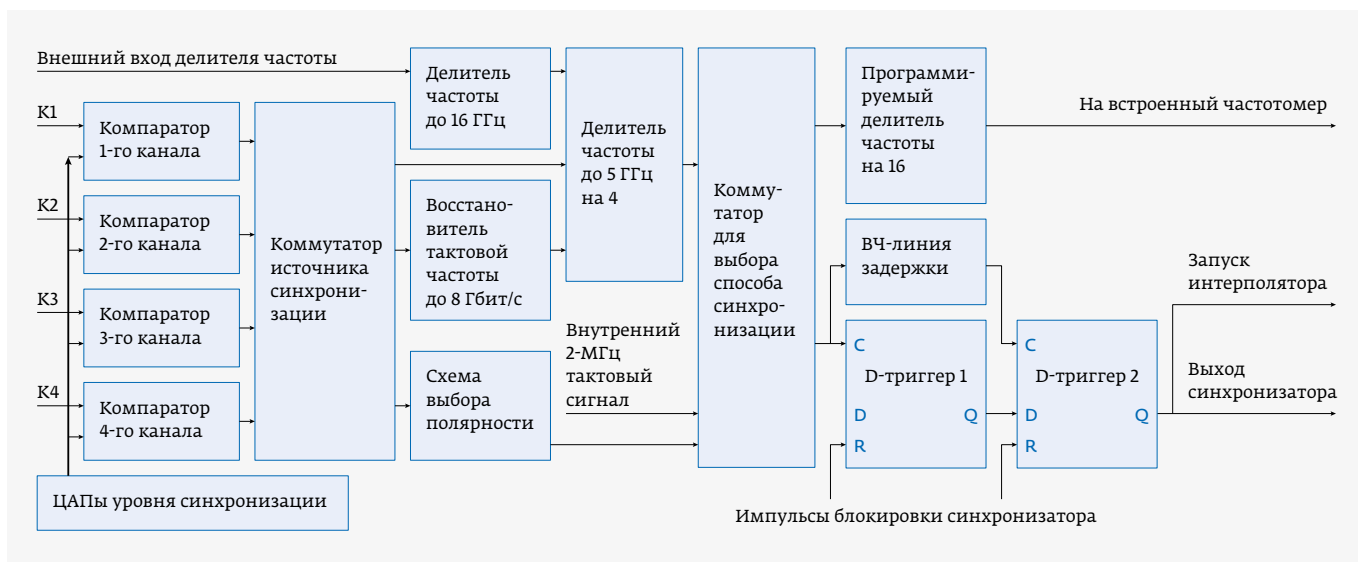


Рис. 10. Структурная схема синхронизатора

В режиме внутренней синхронизации существует возможность восстановления тактовой частоты псевдослучайной последовательности (ПСП). Такой режим необходим для отображения последовательности в форме глазковой диаграммы и ее дальнейшего анализа. Осциллограф АКИП-4133 позволяет восстанавливать тактовые частоты последовательностей от 10 Мбит/с до 8 Гбит/с, тем самым обеспечивая перекрытие наиболее популярных тактовых частот коммуникационных стандартов.

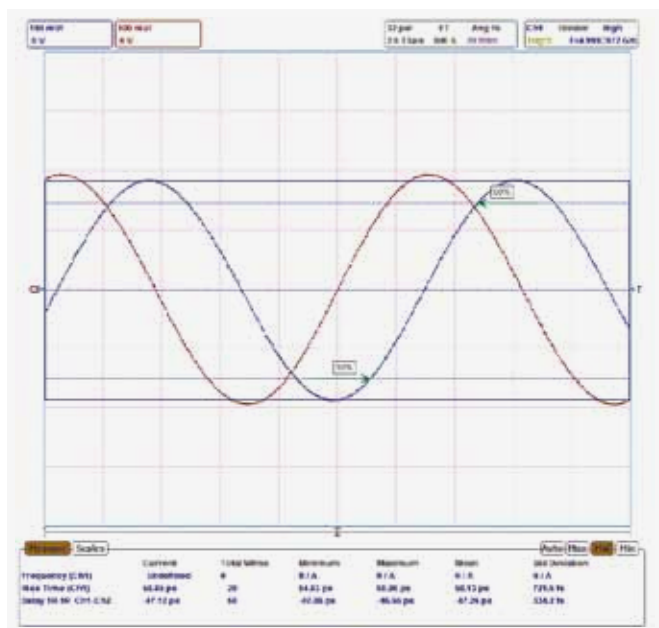


Рис. 11. Гармонические сигналы с частотой 5 ГГц при внутренней синхронизации

На рис. 13 приведена глазковая диаграмма 8-Гбит/с последовательности, зарегистрированная в режиме внутренней синхронизации с восстановлением тактовой частоты.

Во всей полосе пропускания 16 ГГц синхронизация обеспечивается при использовании дополнительного внешнего входа делителя частоты. Используемый в осциллографе делитель частоты обладает программируемым коэффициентом деления от 1 до 16, а также малым аддитивным фазовым шумом, помогающим добиться низкого уровня нестабильности синхронизации. На рис. 14 показана осциллограмма гармонического сигнала с частотой 16 ГГц, снятая в режиме экранного накопления.

Общая нестабильность синхронизации осциллографа определяется суммарной нестабильностью синхронизатора и интерполятора. Анализ обеих составляющих показывает, что каждый из этих двух узлов имеет

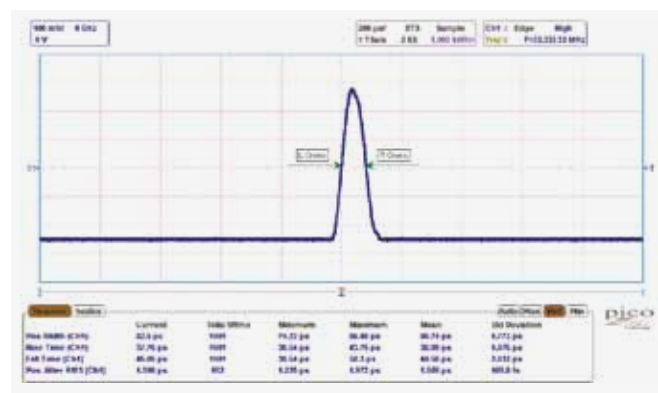
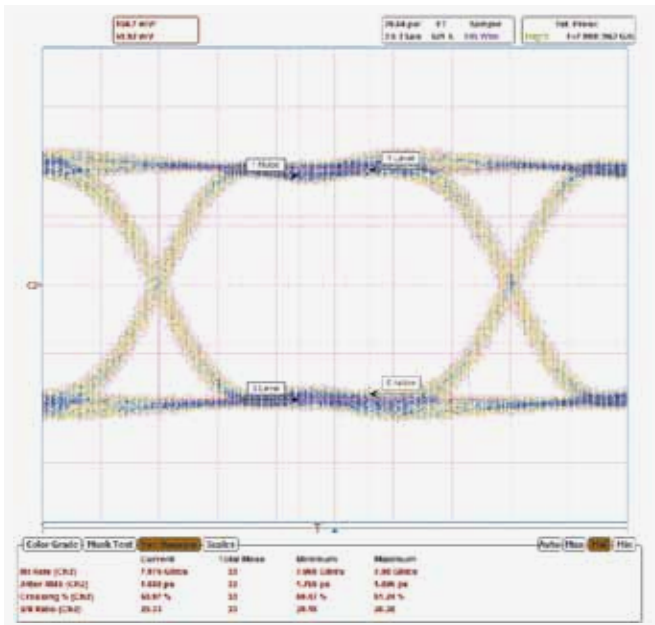


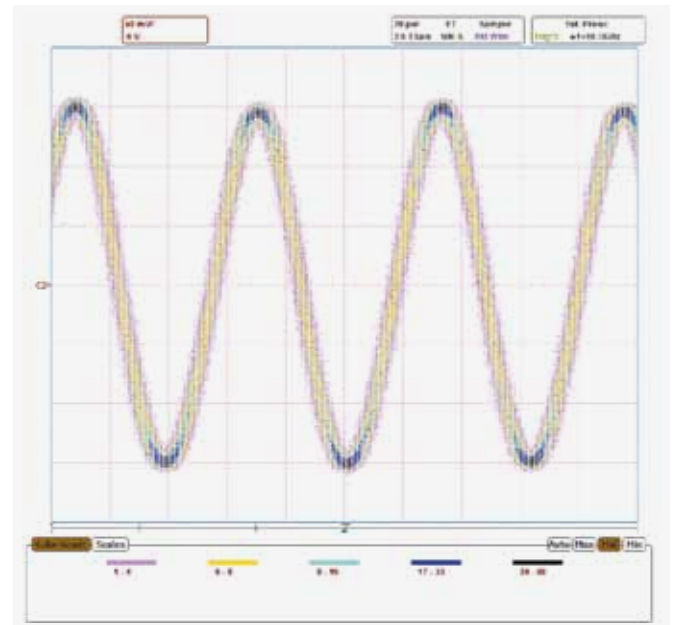
Рис. 12. Внутренняя синхронизация импульсом длительностью 81 пс





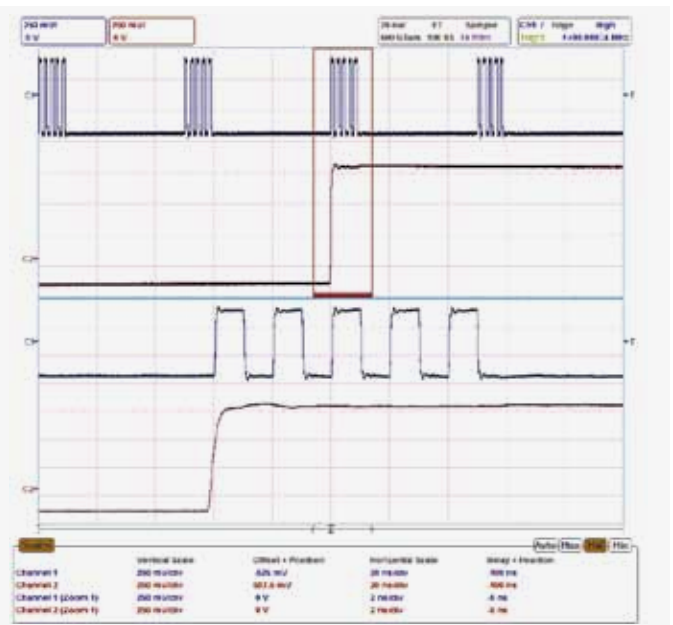
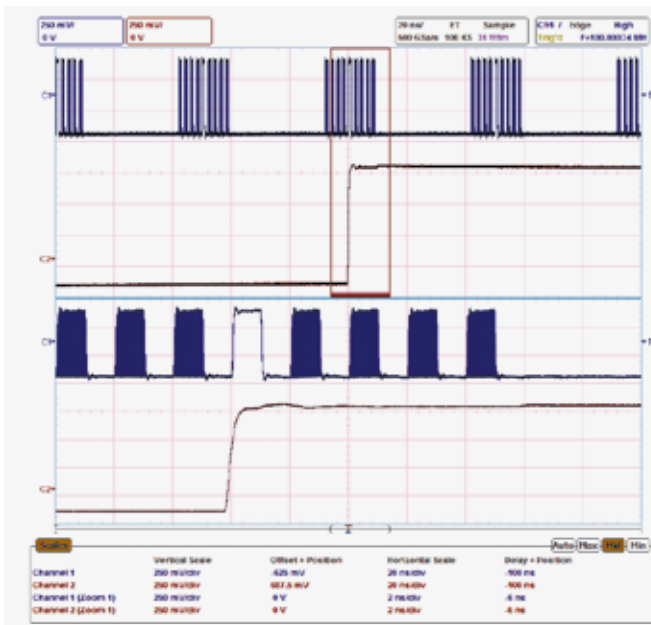
**Рис. 13.** Глазковая диаграмма 8-Гбит/с последовательности, зарегистрированная в режиме внутренней синхронизации с восстановлением тактовой частоты. Среднеквадратическое значение нестабильности синхронизации 1,896 пс

собственную среднеквадратическую временную нестабильность, близкую к 1 пс, что в сумме дает около 1,5 пс. Для минимизации этого значения при разработке серьезное внимание уделялось топологии печатной платы,



**Рис. 14.** Осциллограмма гармонического сигнала с частотой 16 ГГц

особенно исключению влияния шумов и посторонних наводок. Даже на предельных скоростях (например, 4 В/нс) передаваемые сигналы все еще являются восприимчивыми к шумам. Незначительная шумовая составляющая может привести к значительной величине нестабильности синхронизации. Например, аддитивный шум величиной 1 мВ может привести к дополнительной нестабильности



**Рис. 15.** Правильный выбор времени блокировки позволяет получить стабильное отображение 50-Мбит/с последовательности

на одном каскаде порядка 0,25 пс, что на десяти последовательно соединенных каскадах уже дает дополнительное значение, превышающее 0,75 пс. Поэтому большинство полосковых линий передачи сигналов выполнено низкоомными и дифференциальными.

В заключение упомянем функцию блокировки синхронизации. При изменении времени блокировки эта функция обеспечивает стабильное отображение комплексных, но повторяющихся сигналов, таких, например, как ПСП или ТВ-сигналы, имеющих кадровую и строчную структуру (рис. 15). Осциллограф АК ИП-4133 позволяет изменять время блокировки от 500 нс до 15 с шагом 4 нс.

### ИЗМЕРИТЕЛЬ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ С СУБПИКОСЕКУНДНЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ

В осциллографах, работающих в режимах реального времени и случайного стробирования в эквивалентном времени, тактовая частота дискретизации асинхронна по отношению ко входному сигналу синхронизации. Для правильного сбора данных о временной координате сигнала в этом режиме используется измеритель временных интервалов (интерполятор).

Структурная схема подобного интерполятора показана на рис. 16. Интерполятор измеряет интервал времени между синхроимпульсом и вторым следующим за ним импульсом тактовой частоты. Такой интерполятор имеет две особенности.

Во-первых, это – измеритель однократных, а точнее не повторяющихся временных интервалов, поскольку асинхронность появления сигнала синхронизации и тактового сигнала варьируется от захвата к захвату.

Во-вторых, такой интерполятор обладает высоким временным разрешением, равным 400 фс, что соответствует эквивалентной частоте стробирования 2,5 ТГц. Сигнал,

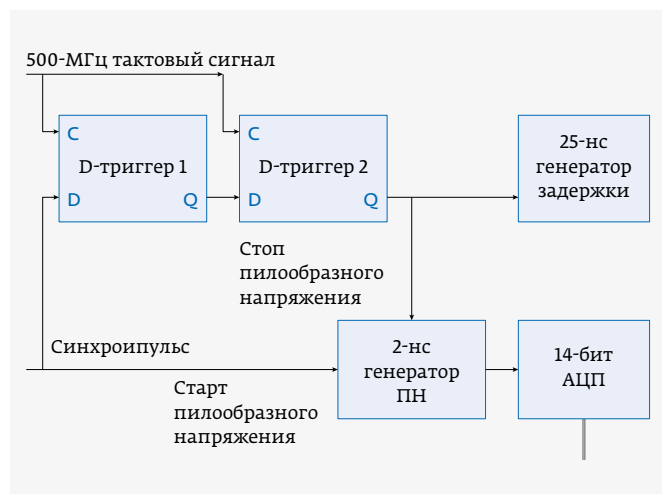


Рис. 16. Структурная схема интерполятора осциллографа АК ИП-4133

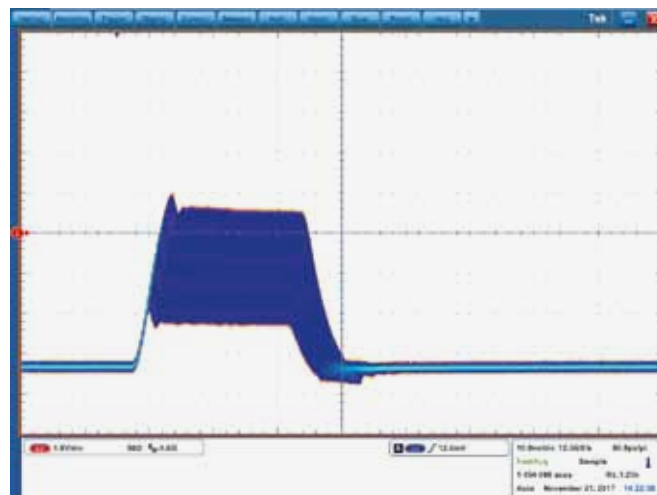


Рис. 17. Осциллограмма работы субпикосекундного интерполятора

поступающий со схемы синхронизатора и имеющий максимальную частоту 2 МГц, определяемую временем блокировки развертки, запускает генератор пилообразного напряжения (ПН) с рабочим ходом приблизительно 5 нс. Это пилообразное напряжение останавливается вторым тактовым импульсом с частотой 500 МГц (рис. 17).

Схема стробирования (остановки) представляет собой два быстродействующих последовательно включенных D-триггера, так что их выходной сигнал оказывается задержанным на величину от одного до двух значений периода тактового сигнала, то есть от 2 до 4 нс. В момент появления асинхронного задержанного сигнала остановки рост пилообразного напряжения прекращается, и через 25 нс остановленное значение пилообразного напряжения измеряется 14-разрядным АЦП последовательного приближения. Калибровка интерполятора обеспечивает 5 000 точек, приходящихся на временной интервал 2 нс,

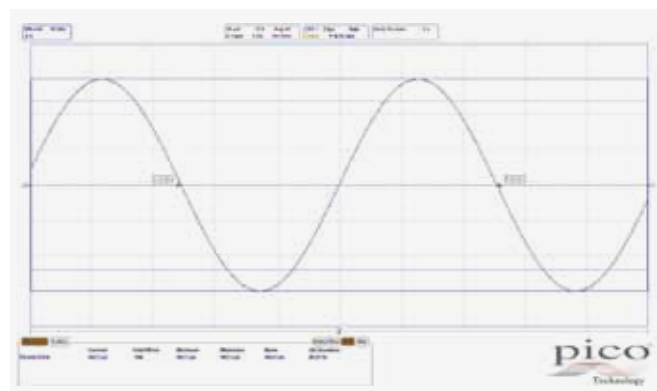
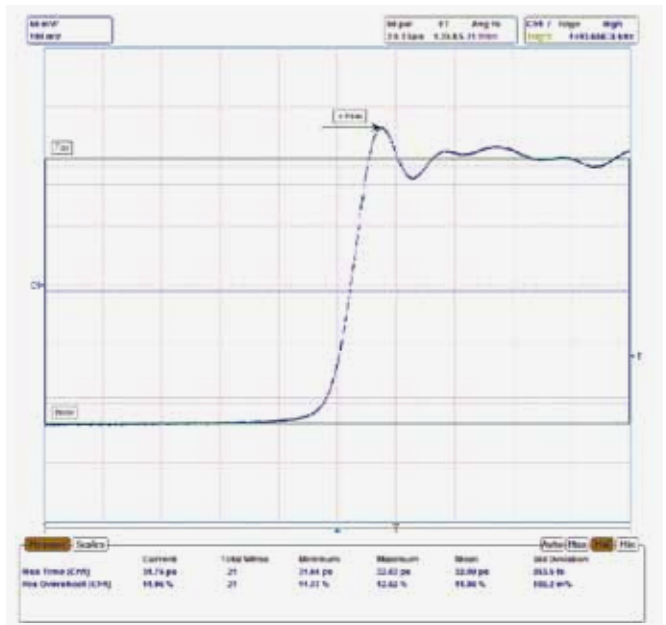
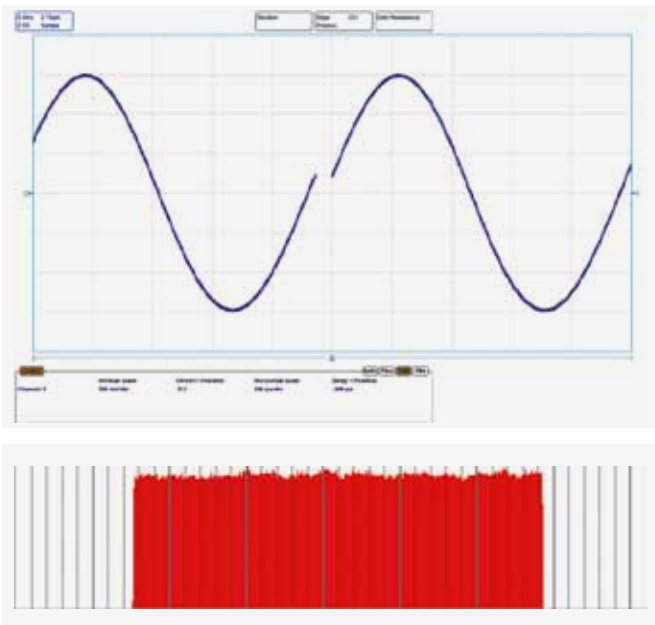


Рис. 18. Осциллограмма измерения периода усредненного 10-ГГц гармонического сигнала с погрешностью 2,2 пс



**Рис. 19.** Осциллограмма раскалиброванного интерполятора демонстрирует 30-пс разрыв во входном сигнале 2 ГГц. Горизонтальная шкала – 100 пс/дел. Внизу – гистограмма, используемая для калибровки интерполятора

или 400 фс на точку. Среднеквадратическое значение временной нестабильности интерполятора составляет не более 1 пс, а нелинейность не превышает 3 пс (рис. 18).

Фактически рассмотренный интерполятор представляет собой преобразователь интервала времени в цифровой код. Такому преобразователю свойственна систематическая ошибка, связанная с несоответствием полного размаха кода преобразования 2-нс временному интервалу. Ее внешнее проявление выглядит, как разрывы на сигнале, повторяющиеся каждые 2 нс (рис. 19). Для ее устранения применяется специальная процедура калибровки, использующая гистограмму распределения выходного кода АЦП интерполятора в зависимости от значения входного напряжения.

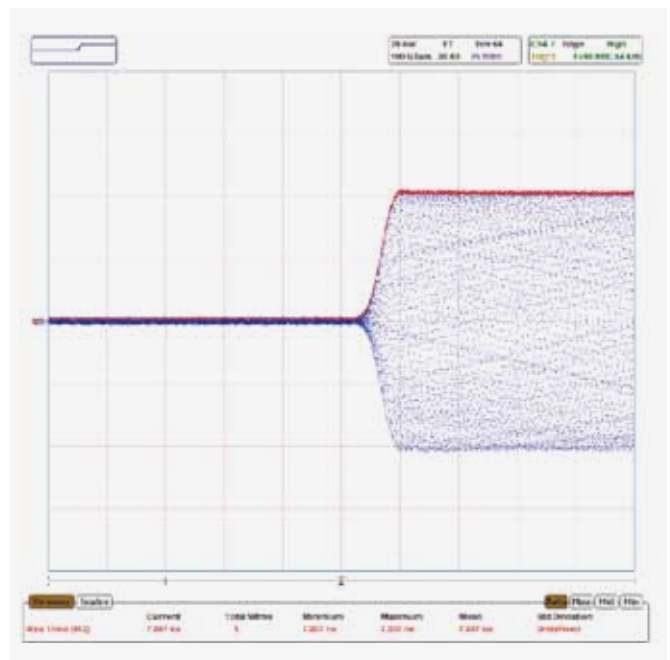
### РЕЖИМЫ ЗАХВАТА СИГНАЛОВ

Наряду с режимом стробирования в реальном времени и режимом случайного стробирования в эквивалентном времени осциллограф обладает целым рядом режимов захвата, значительно расширяющих возможности его применения. В режиме самописца длительность развертки может быть доведена до 1000 с/дел. Режим усреднения эффективно снижает уровень шумов и нестабильности синхронизации, причем число усреднений может изменяться до 4096 (рис. 20).

Режим выделения огибающей сигнала позволяет детектировать максимальное, минимальное или оба этих

**Рис. 20.** Осциллограмма усредненного пикосекундного перепада напряжения. Пиковая величина нестабильности синхронизации не превышает 2 пс

значения сигналов. На рис. 21 показан пример того, как этот режим позволяет детектировать огибающую амплитудно-модулированного сигнала с длительностью фронта 8 нс.



**Рис. 21.** Режим огибающей (красный) позволяет детектировать амплитудно-модулированный сигнал с длительностью фронта 8 нс (синий)

В режиме реального времени осциллограф позволяет осуществлять пиковое детектирование, обеспечивать повышенную разрядность сбора данных, а также использовать так называемый сегментированный режим работы с памятью сигнала.

В режиме пикового детектирования осциллограф отображает максимальное и минимальное значения из всех выборок, содержащихся в двух последовательных интервалах сбора данных. Этот режим применяется для поиска коротких импульсов на длинных развертках.

В режиме повышенной разрядности осциллограф рассчитывает среднее значение всех выборок для каждого интервала регистрации. В этом режиме высокое разрешение (до 16 бит) обеспечивается за счет снижения полосы пропускания.

Сегментированный режим используют при необходимости сбора данных о нескольких редко повторяющихся событиях, для чего память осциллографа делят на сегменты. Это позволяет использовать память только для нужных частей сигнала, игнорируя ненужные, то есть происходит экономия памяти.

### РАСТЯЖКА СИГНАЛОВ ПО ПАМЯТИ

Благодаря длинной памяти режим растяжки позволяет просматривать и сравнивать до четырех увеличенных по вертикали и по горизонтали участков осциллограммы одновременно. При этом имеется возможность смещать

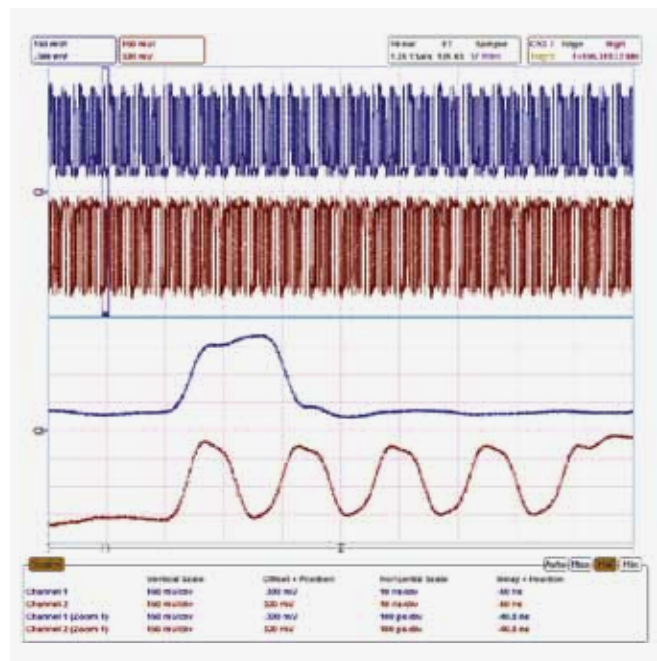


Рис. 22. Одновременное отображение двух нерастянутых и растянутых в 100 раз ПСП-сигналов

растянутые сигналы как по вертикали, так и по горизонтали (рис. 22). Максимальная растяжка по вертикали составляет 100, а по горизонтали – 2048 раз.

## КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



### НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.

Издание осуществлено при поддержке Keysight Technologies

М.: ТЕХНОСФЕРА,  
2019. – 736 с.,  
ISBN 978-5-94836-505-3

Цена 1600 руб.

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ- / СВЧ-устройств.

#### КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; [knigi@technosphera.ru](mailto:knigi@technosphera.ru), [sales@technosphera.ru](mailto:sales@technosphera.ru)