

# ВЫБОР ОСЦИЛЛОГРАФА С ПОЛОСОЙ ПРОПУСКАНИЯ, СООТВЕТСТВУЮЩЕЙ ВАШИМ ЗАДАЧАМ

## CHOOSING AN OSCILLOSCOPE WITH THE RIGHT BANDWIDTH FOR YOUR APPLICATION

Джонни Хэнкок (Johnnie Hancock), Agilent Technologies

### ВСТУПЛЕНИЕ

Полоса пропускания — это тот параметр, на который инженеры при выборе осциллографа обращают внимание в первую очередь. В данной статье дается ряд полезных советов, как правильно выбрать полосу пропускания как для решения задач, связанных с цифровыми, так и аналоговыми сигналами. Но сначала давайте определимся, что же такое полоса пропускания.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОСЫ ПРОПУСКАНИЯ ОСЦИЛЛОГРАФА

Все осциллографы на низких частотах обладают амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), которая снижается при повышении частоты, как показано на рис. 1. Большая часть осциллографов с полосой пропускания менее 1 ГГц имеют АЧХ так называемого гауссового типа, представляющую собой кривую с пологим спадом, начиная примерно с одной третьей полосы частот, соответствующих ослаблению на -3 дБ. Осциллографы с полосой пропускания больше 1 ГГц имеют максимально плоскую частотную характеристику, как показано на рис. 2. В этом случае АЧХ имеет более плоскую форму внутри полосы пропускания и характеризуется более крутым спадом в районе, близком к частоте, соответствующей ослаблению на -3 дБ.

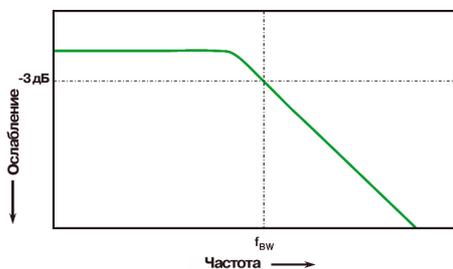


Рис. 1. АЧХ гауссового типа

У каждого из этих типов амплитудно-частотной характеристики есть свои преимущества и недостатки. Осциллографы с максимально плоской характеристикой ослабляют сигналы внутри полосы меньше, чем осциллографы с гауссовой характеристикой, что означает, что они могут осуществ-

лять более точные измерения в пределах полосы пропускания. Осциллографы с гауссовой характеристикой меньше ослабляют сигнал за пределами полосы пропускания, что означает,



### Agilent Technologies

что у них меньше время нарастания, чем у их аналогов с максимально плоской характеристикой при той же полосе пропускания. Вместе с тем, иногда, чтобы удовлетворить критерию Найквиста ( $f_{MAX} < f_S$ ), бывает полезно в большей степени ослаблять сигналы за пределами полосы пропускания, чтобы избавиться от высокочастотных составляющих, которые способствуют наложению спектров. Для более глубокого понимания теоремы дискретизации Найквиста предлагается ознакомиться с пособием компании Agilent Technologies [1].

Какой бы характеристикой ваш осциллограф ни обладал — максимально плоской, гауссовой или какой-либо смешанной — минимальная частота, при которой входной сигнал ослабляется на 3 дБ, считается полосой пропускания ( $f_{BW}$ ). Полосу пропускания и тип амплитудно-частотной характеристики осциллографа можно проверить путем качания частоты с использованием свип-генератора синусоидальных сигналов. Ослабление сигнала на 3 дБ означает, что погрешность измерения амплитуды составляет около 30%. Так что вряд ли стоит ожидать точных результатов измерения амплитуды сигналов, которые имеют частоту, примерно равную полосе пропускания осциллографа.

Еще один параметр — время нарастания — тесно связан с параметром полосы пропускания осциллографа. Осциллографы с гауссовым типом частотной характеристики имеют время нарастания от уровня 10% до уровня 90%, равное примерно  $0,35/f_{BW}$ . У осциллографов с максимально плоским типом частотной характеристики этот параметр равен примерно  $0,4/f_{BW}$ , в зависимости от крутизны спада характеристики. Однако следует помнить, что время нарастания осцил-

лографа — это отнюдь не то же самое, что минимальная длительность перепада, которая может быть измерена этим прибором. Это минимальная длительность перепада, которую мог бы воспроизвести осциллограф, если бы входной сигнал имел время нарастания равное нулю или бесконечно близкое к нулю. Хотя этот сугубо теоретический параметр невозможно измерить напрямую (так как современные генераторы импульсов не способны сгенерировать импульс с бесконечно малым временем нарастания, стремящимся к нулю), на практике его можно (с достаточной

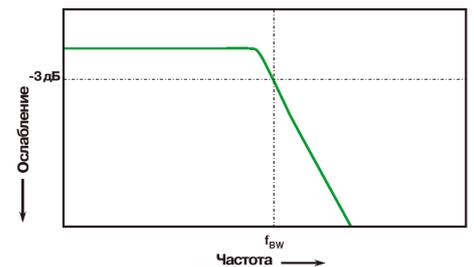


Рис. 2. Максимально плоская АЧХ

степенью точности) оценить, подав на вход осциллографа сигнал, время нарастания которого в 3-5 раз меньше, чем нормированная величина времени нарастания прибора.

### ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ, ТРЕБУЮЩАЯСЯ ДЛЯ ЦИФРОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Как показывает практика, полоса пропускания осциллографа  $f_{BW}$  должна быть минимум в пять раз больше, чем самая высокая тактовая частота ( $f_{clk}$ ) в тестируемой системе.

Простая эмпирическая формула:

$$f_{BW} \geq 5 \times f_{clk}$$

Если осциллограф удовлетворяет этому критерию, он способен захватывать сигнал вплоть до пятой гармоники с минимальным ослаблением сигнала. Эта составляющая сигнала очень важна для определения формы анализируемого сигнала в целом.

Однако если требуется осуществлять точные измерения высокоскоростных перепадов, эта формула не учитывает высокочастотные составляющие, входящие в состав быстро нарастающих или спадающих фронтов.

## Шаг 1: Выяснить наибольшую скорость нарастания фронта

Более точно определить требуемую полосу пропускания можно, определив максимальную частоту, присутствующую во входном сигнале, которая, в общем случае, не является максимальной тактовой частотой в системе. Величина максимальной частоты зависит от скорости самых быстрых перепадов в системе. Так что первое, что нужно определить — это время нарастания и спада самых быстрых сигналов в системе. Как правило, эту информацию можно почерпнуть из спецификаций устройств, входящих в состав системы.

## Шаг 2: Вычислить частоту излома $f_{knee}$

Все быстрые фронты обладают бесконечным спектром частотных составляющих. Однако в частотном спектре быстрых фронтов существует такая точка перегиба (излома), что всеми частотными составляющими, частота которых превышает частоту точки излома, можно пренебречь при определении формы сигнала. Доктор Говард В. Джонсон написал на эту тему книгу «Высокоскоростные цифровые разработки. Пособие по черной магии» [2]. Он называет эту частотную составляющую «частотой излома» («knee frequency»,  $f_{knee}$ ). В этом случае можно применить простую формулу для вычисления фактической максимальной частотной составляющей  $f_{knee}$ .

$$f_{knee} = 0,5/t_r, \quad (1)$$

$$f_{knee} = 0,4/t_f, \quad (2)$$

где  $t_r$  — время нарастания.

Для сигналов, у которых время нарастания (спада) рассчитывается по уровням от 10% до 90%, частота излома  $f_{knee}$  вычисляется по формуле (1). Для сигналов, у которых время нарастания (спада) рассчитывается по уровням от 20% до 80%, что очень часто встречается в спецификациях современных цифровых устройств, частота излома  $f_{knee}$  вычисляется по формуле (2).

Требуемая точность	Гауссова характеристика	Максимально плоская характеристика
20%	$f_{BW} = 1,0 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1,0 \times f_{knee}$
10%	$f_{BW} = 1,3 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1,2 \times f_{knee}$
3%	$f_{BW} = 1,9 \times f_{knee}$	$f_{BW} = 1,4 \times f_{knee}$

Очень важно не путать это время нарастания с прописанным в спецификации осциллографа временем нарастания: в данном случае речь идет о фактической скорости нарастания фронтов сигналов в системе.

## Шаг 3: Рассчитать требуемую полосу пропускания

Третьим шагом нужно определить, какая полоса пропускания требуется для измерения этого сигнала, в зависи-

мости от уровня точности, который необходимо достичь при измерении времени нарастания или спада фронта. В таблице 1 приведены коэффициенты для различных степеней точности как для осциллографов с гауссовой, так и с максимально плоской частотной характеристикой. Напоминаем, что осциллографы с полосой пропускания 1 ГГц и ниже обладают гауссовой частотной характеристикой, а модели с полосой пропускания выше 1 ГГц — максимально плоской.

Рассмотрим небольшой пример.

Допустим, требуется определить минимальную полосу пропускания осциллографа, видимо, с гауссовым типом частотной характеристики для целей измерения времени нарастания в 500 пс (по уровням 10-90%).

Если сигнал обладает примерным временем нарастания (спада) 500 пс (по уровням 10-90%), то по формуле (1) максимальная фактическая частота сигнала ( $f_{knee}$ ) составляет примерно 1 ГГц:

$$f_{knee} = 0,5/(500 \cdot 10^{-12} \text{ с}) = 1 \cdot 10^9 \text{ Гц} = 1 \text{ ГГц}.$$

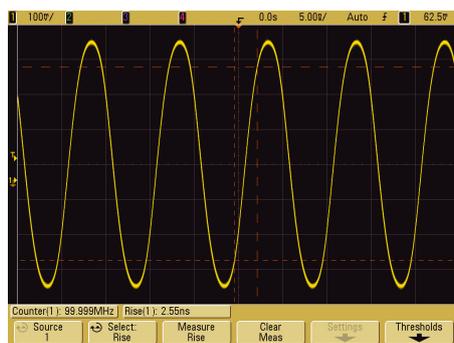


Рис. 3. Осциллограмма 100 МГц тактового сигнала на экране осциллографа MSO6014A с полосой 100 МГц

Если погрешность измерения времени нарастания (спада) фронта допускается на уровне  $\pm 20\%$ , тогда подойдет осциллограф с полосой пропускания 1 ГГц. Но если нужна точность в пределах  $\pm 3\%$ , то лучше использовать осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц (см. таблицу).

Проведем реальные измерения параметров цифрового тактового сигнала, используя осциллографы с различной полосой пропускания.

## СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ ЦИФРОВОГО ТАКТОВОГО СИГНАЛА

На рис. 3 представлена осциллограмма цифрового тактового сигнала с частотой 100 МГц и длительностью фронта 500 пс (10-90%), полученная с помощью осциллографа Agilent MSO6014A с полосой пропускания 100 МГц. Как вы видите, осциллограф просто проходит по основной гармонике этого сигнала и отображает этот сигнал в виде приближенной синусоидальной волны. Осциллограф с полосой пропускания 100 МГц является хорошим решением для многих 8-битных

разработок на базе микропроцессорных устройств с тактовыми частотами от 10 МГц до 20 МГц, но для сигнала 100 МГц этой полосы пропускания явно недостаточно.

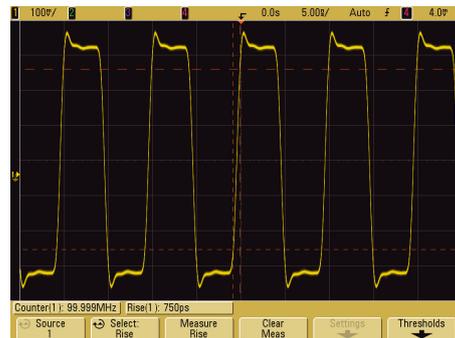


Рис. 4. Осциллограмма 100 МГц тактового сигнала на экране осциллографа MSO6054A с полосой 500 МГц

На рис. 4 показана осциллограмма этого же сигнала, полученная с использованием осциллографа Agilent MSO6054A с полосой пропускания 500 МГц. Видно, что этот прибор захватил сигнал вплоть до пятой гармоники, что было нашим первым правилом по выбору полосы пропускания. Но когда мы начинаем измерять длительность фронта, осциллограф показывает примерно 750 пс. В этом случае осциллограф производит недостаточно точное измерение длительности фронта. На самом деле, он показывает значение, близкое к его собственному времени нарастания (700 пс), а не реальное время нарастания входного сигнала, составляющее около 500 пс. Если точное измерение длительности фронта сигнала действительно важно, нужно выбрать осциллограф с большей полосой пропускания.

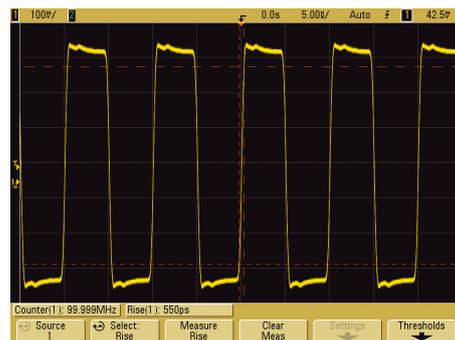


Рис. 5. Осциллограмма 100 МГц тактового сигнала на экране осциллографа MSO6104A с полосой 1 ГГц

При использовании осциллографа Agilent MSO6104A с полосой пропускания 1 ГГц мы видим гораздо более точную картину, что показано на рис. 5. При измерении длительности фронта прибор показывает около 550 пс, то есть отклонение составляет всего 10%, что может быть вполне приемлемым — особенно при ограниченном бюджете. Однако и это измерение осциллографом с полосой пропускания

ния 1 ГГц можно назвать минимально допустимым. Если мы хотим осуществить измерение параметров сигнала со временем нарастания 500 пс с погрешностью, не превышающей  $\pm 3\%$ , нужно использовать осциллограф с полосой пропускания 2 ГГц или выше, как мы рассчитали в примере, приведенном ранее.

При использовании осциллографа, имеющего полосу пропускания 2 ГГц, мы, наконец, получаем точное представление этого тактового сигнала с очень точным измерением длительности нарастания — примерно 495 пс, как показано на рис. 6.

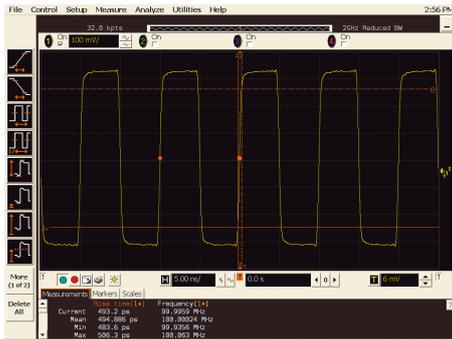


Рис. 6. Осциллограмма 100 МГц тактового сигнала на экране осциллографа DS080204В с полосой 2 ГГц

Одной из самых полезных функций осциллографов серии Infiniium с большой полосой пропускания является возможность ее расширения. Так что если на текущий момент вам достаточно полосы пропускания 2 ГГц, вы можете приобрести именно такую модель, а затем, если потребуются в будущем, расширить ее вплоть до 13 ГГц, купив соответствующие опции.

### ПОЛОСА ПРОПУСКАНИЯ, ТРЕБУЮЩАЯСЯ ДЛЯ АНАЛОГОВЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ

Несколько лет назад большинство производителей осциллографов рекомендовало, чтобы полоса пропускания осциллографа как минимум в три раза превышала максимальную частоту сигнала. Хотя этот коэффициент «3х» и не подходит для цифровых приложений, основанных на цифровом тактовом сигнале, он все так же годится для аналоговых приложений, например, для анализа модулированных ВЧ сигналов. Чтобы понять, откуда берется это соотношение «3:1», предлагается взглянуть на реальную частотную характеристику осциллографа с полосой пропускания 1 ГГц.

На рис. 7 показана амплитудно-частотная характеристика, полученная путем качания частоты (сви́риванием) в диапазоне от 20 МГц до 2 ГГц, для осциллографа Agilent MSO6104A с полосой пропускания 1 ГГц. Как можно увидеть, точно на частоте 1 ГГц сигнал ослабляется приблизительно на 1,7 дБ, что с большим запасом лежит в рамках предела  $-3$  дБ, который

определяет полосу пропускания прибора. Однако чтобы осуществлять точные измерения аналоговых сигналов, необходимо использовать ту часть полосы частот осциллографа, где сигнал относительно плоский и с минимальным ослаблением. На частоте 300 МГц, примерно равной 1/3 от полосы пропускания осциллографа 1 ГГц, осуществляется теоретически нулевое ослабление сигнала (0 дБ).

Однако не все осциллографы обладают подобным типом частотной характеристики.

На рис. 8 показаны результаты аналогичного теста, который был проведен на осциллографе с полосой пропускания 1,5 ГГц другого производителя. Как видно из рисунка, частотная характеристика этого прибора отнюдь не является плоской. По сути, тип этой характеристики нельзя отнести ни к гауссовой, ни к максимально плоской. Она, скорее, «максимально бугристая» с большим числом пиков, что может приводить к серьезному искажению сигнала при измерении как аналоговых, так и цифровых сигналов. К сожалению, в спецификации полосы пропускания этого прибора, помимо информации об ослаблении сигнала на 3 дБ на частоте полосы пропускания, ничего не сказано об ослаблении или усилении сигнала на других частотах. Даже на частоте, равной 1/5 от полосы пропускания этого осциллографа, сигналы ослабляются примерно на 1 дБ

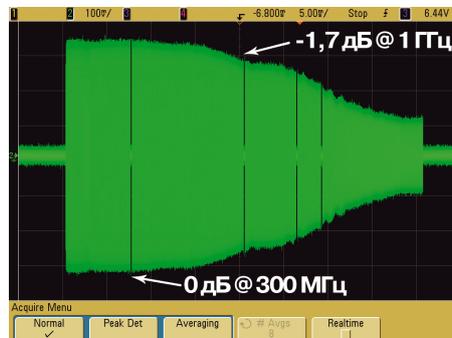


Рис. 7. АЧХ осциллографа Agilent MSO6104A с полосой 1 ГГц

(10%). Поэтому в данном случае следование правилу «3:1» вряд ли будет оправданным. При выборе осциллографа имеет смысл приобретать модель заслуживающего доверия производителя и обращать пристальное внимание на относительную плоскостность амплитудно-частотной характеристики прибора.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для цифровых приложений следует выбирать осциллограф, полоса пропускания которого как минимум в 5 раз выше, чем наибольшая частота тактового сигнала в тестируемом устройстве. Но если требуется осуществлять точные измерения скорости перепада, необходимо определить также максимальную

реальную частоту, имеющуюся в данном сигнале.

Для аналоговых приложений необходимо выбирать осциллографы с полосой пропускания в три раза превышающей максимальную частоту аналогового сигнала в системе. Но это правило, выведенное опытным путем, работает только для осциллографов, которые обладают относительно плоской частотной характеристикой в полосе низких частот.

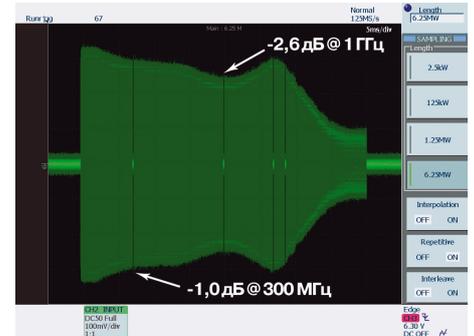


Рис. 8. АЧХ осциллографа с полосой пропускания 1,5 ГГц (не Agilent)

И, наконец, выбирая осциллограф, необходимый для текущих приложений, не следует забывать о завтрашнем дне. Если бюджет это позволяет, лучше приобрести прибор с определенным запасом по полосе пропускания, что сэкономит деньги, когда она понадобится в будущем.

Более подробную информацию о выборе осциллографа с наиболее подходящей полосой пропускания можно получить, ознакомившись со статьей [3].

### ЛИТЕРАТУРА

1. Evaluating Oscilloscope Sample Rates vs. Sampling Fidelity. Agilent Technologies, Application Note № 1587, [www.agilent.com](http://www.agilent.com).
2. High-Speed Digital Design, A Handbook of Black Magic, Howard Johnson, Martin Graham, 1993, Prentice Hall PTD, Prentice-Hall, Inc, Upper Saddle River, New Jersey 07458.
3. Choosing an Oscilloscope with the Right Bandwidth for your Application. Agilent Technologies, Application note № 1588, [www.agilent.com](http://www.agilent.com).

*Bandwidth is the specification that most engineers consider first when they select an oscilloscope. In this article the author provides some helpful hints on how to select an oscilloscope with the appropriate bandwidth for both digital and analog applications.*