



## Качающиеся синусоидальные ЛЧМ-сигналы для измерения импульсной характеристики

Ян Х. Чен

Инженер-проектировщик  
Stanford Research Systems,

Логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал и ЛЧМ-сигнал с переменной скоростью - два очень полезных тестовых сигнала для измерения АЧХ и импульсной характеристики. При генерации спектров розового шума эти сигналы обладают коэффициентом амплитуды  $\geq 6$  дБ, чем последовательности импульсов максимальной продолжительности (MLS). Кроме того, логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал отделяет продукты искажения от линейного отклика, что позволяет проводить измерения импульсной характеристики без искажений, а ЛЧМ-сигнал с переменной скоростью обеспечивает гибкость, поскольку его частотный состав можно настраивать, сохраняя при этом низкий коэффициент амплитуды.

### 1. Введение

Импульсная характеристика и, соответственно, измерения АЧХ являются фундаментальными для характеристики любого аудиоустройства или звуковой среды. В принципе, для проведения этих измерений можно использовать любой стимулирующий сигнал, который обеспечивает энергию во всем интересующем частотном диапазоне. Однако, на практике выбор стимулирующего сигнала имеет важное значение для отношения сигнал/шум (SNR), искажений и скорости измерений звука. Мы описываем два сигнала, которые генерируются синхронно с анализаторами на БПФ (ЛЧМ-сигналы), которые предлагают отличные характеристики отношения сигнал/шум и искажений. Это **логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал** и **ЛЧМ-сигнал с переменной скоростью**. Логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал имеет естественно полезный т.н. розовый спектр и необычную способность *отделять* нелинейные (искажающие) отклики от линейного отклика [1,2]. Полезность ЛЧМ-сигнала с переменной скоростью заключается в его способности формировать *произвольный* спектр, при этом сохраняя низкий коэффициент амплитуды. Поскольку эти сигналы имитируют колеблющиеся во времени синусоидальные сигналы, в общем они известны как качающиеся синусоидальные ЛЧМ-сигналы.

### 2. Почему синусоидальные ЛЧМ-сигналы?

Большинство пользователей, вероятно, знакомы с измерением АЧХ на дискретных частотах. Синусоидальный сигнал генерируется на одной частоте, при этом измеряется отклик на этой же частоте, а затем сигнал переходит на другую частоту. Такие измерения имеют очень высокие отношения сигнал/шум, потому что вся энергия сигнала в любой момент времени концентрируется на одной частоте. Однако, они могут достигать лишь скорости измерения в несколько ближайших частот в секунду в лучшем случае. Этот метод лучше всего подходит для проведения измерений там, где требуется очень высокий SNR, например акустические измерения в шумовой среде или при измерении очень низких уровней сигналов, таких как искажение или эффективность подавляющего фильтра. Напротив, широкополосные стимулирующие сигналы возбуждают сразу несколько частот. Например, сигнал 32 кВц., генерируемый на частоте дискретизации 64 кГц, может возбуждать 16000 различных частот всего за полсекунды. Это приводит к гораздо более быстрым темпам измерений, и хотя энергия более распределена, чем при синусе, во многих ситуациях SNR более чем достаточен для обеспечения хороших измерений сигналов с низким уровнем. Мы покажем несколько таких измерений в разделе 5.

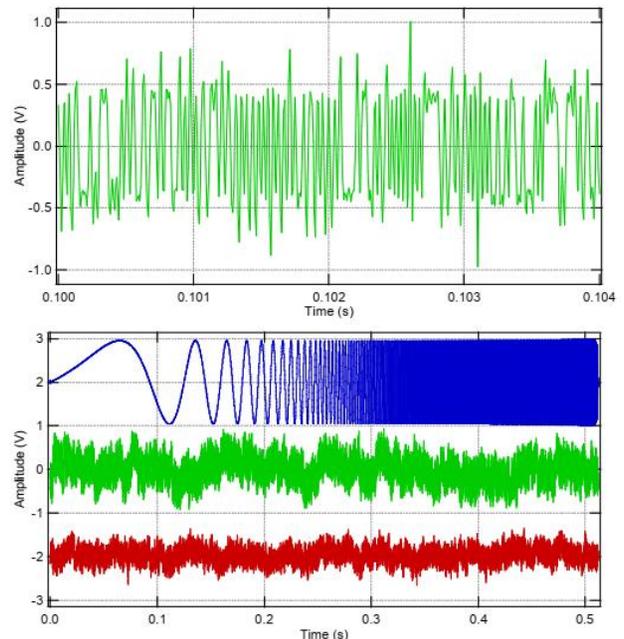


Рисунок 1. а) Крупный план сигнала MLS, показывающий большие отклонения из-за внезапных переходов, присущих сигналу. Коэффициент амплитуды составляет около 8 дБ вместо теоретического 0 дБ. б) Три сигнала с розовыми спектрами. Сверху вниз, логарифмически-синусоидальный ЛЧМ, отфильтрованных MLS и отфильтрованный гауссовский шум. Коэффициент амплитуды ухудшается сверху вниз. Все сигналы имеют пиковую амплитуду 1 В. Сигналы смещены для наглядности.

Показателем качества, который отличает различные широкополосные стимулирующие сигналы, является коэффициент амплитуды - отношение пикового уровня к среднеквадратическому уровню сигнала. Сигнал с низким коэффициентом амплитуды содержит большую энергию, чем сигнал с высоким коэффициентом амплитуды и той же пиковой амплитудой, поэтому желателен низкий коэффициент амплитуды. Последовательность импульсов максимальной продолжительности (MLS) теоретически отвечает всем требованиям, поскольку она имеет математический коэффициент амплитуды 0 дБ, самый низкий из возможных коэффициентов амплитуды. Однако на практике резкие переходы и воспроизведение сигнала с ограниченной полосой пропускания приводят к коэффициенту амплитуды около 8 дБ (рис. 1а). Фильтрация MLS для получения более полезного розового спектра дополнительно увеличивает коэффициент амплитуды до 11-12 дБ. Шум еще хуже. Гауссов шум имеет коэффициент амплитуды около 12 дБ (белый спектр), который увеличивается до 14 дБ при розовой фильтрации.<sup>1</sup> С другой стороны, логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал имеет измеренный коэффициент амплитуды всего 4 дБ (рис. 1б) и имеет естественно розовый спектр. Коэффициент амплитуды ЛЧМ-сигнала переменной скорости является так же низким, измеренные значения около 5dB для розового целевого спектра. Эти Коэффициент амплитуды на 6-8 дБ лучше, чем у MLS с розовой фильтрацией. То есть, MLS необходимо воспроизводить более, чем в два раза громче, чем эти ЛЧМ-сигналы или в среднем более, чем в четыре раза дольше при той же громкости для того же отношения сигнал/шум.

### 3. Генерация качающихся синусоидальных ЛЧМ-сигналов

К преимуществам низкого коэффициента амплитуды добавляются уникальные свойства логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала для устранения искажений и ЛЧМ-сигнала с переменной скоростью для получения произвольного спектра. Чтобы понять, как возникают эти свойства, необходимо знать, как эти сигналы построены. Во-первых, это логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал. Логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал это, по сути, синусоидальная волна, частота которой экспоненциально возрастает со временем (например, удваивается каждые 10 мс). Это записывается так [2]:

$$x(t) = \sin \left( \frac{2\pi f_1 T}{\ln(\frac{f_2}{f_1})} \left[ \exp\left(\frac{\ln(\frac{f_2}{f_1})t}{T}\right) - 1 \right] \right) \quad (1)$$

где  $f_1$  - начальная частота,  $f_2$  - конечная частота, а  $T$  - длительность ЛЧМ-сигнала. Этот сигнал показан на рисунке 2. Объяснение его особых свойств будет дано в разделе 4, когда сигнал будет проанализирован.

Особое свойство ЛЧМ-сигнала с переменной скоростью проистекает из простой идеи использования скорости развертки для управления частотной характеристикой [3]. Чем больше желаемый отклик тем медленнее развертка на этой частоте (рис. 3). Чтобы сгенерировать ЛЧМ-сигнал с переменной скоростью, проще всего перейти в частотную область. Это влечет за собой определение как величины, так и фазы сигнала, а затем выполнение обратного БПФ для получения желаемого сигнала во временной области. Величина ЛЧМ-сигнала переменной скорости - это просто величина желаемой целевой частотной характеристики  $|H_{user}(f)|$ . Фазу определить немного сложнее. Что нам нужно сделать сначала, это указать групповое время запаздывания (ГВЗ)

сигнала  $\tau_G$ , а затем получаем фазу из ГВЗ. Групповое время запаздывания для ЛЧМ-сигнала переменной скорости является [3]

$$\tau_G(f) = \tau_G(f - df) + C |H_{user}(f)|^2 \quad (2)$$

$$\text{где } C = \frac{\tau_G(f_2) - \tau_G(f_1)}{\sum_{f=0}^{f_s/2} |H_{user}(f)|^2} \quad (3)$$

<sup>1</sup> Истинный гауссовский шум имеет бесконечный коэффициент амплитуды; экскурсия шума здесь была ограничена  $\pm 4$  с.

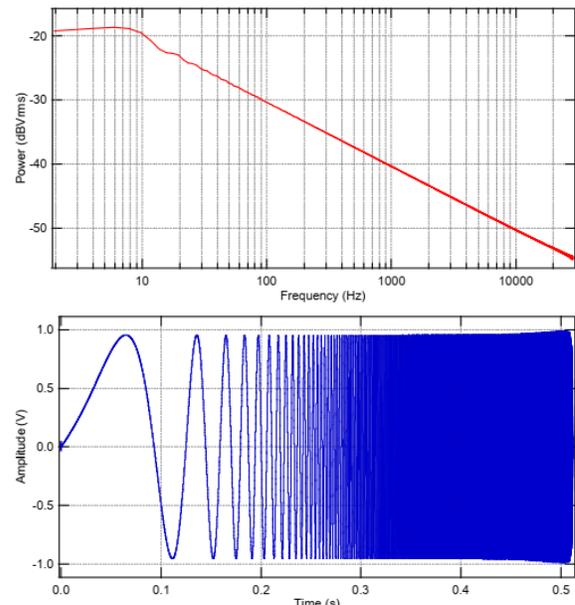


Рисунок 2. а) Спектр мощности логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала. Он розовый, за исключением самых низких частот. б) Запись времени логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала. Частота сигнала увеличивается экспоненциально, прежде чем повториться.

То есть ГВЗ на  $f$  - это ГВЗ в предыдущем интервале частоты, плюс величина, зависящая от квадрата величины целевого отклика. ГВЗ в первом частотном диапазоне является  $\tau_G(f_1)$ . Начальное и конечное ГВЗ,  $\tau_G(f_1)$  и  $\tau_G(f_2)$  представляют время начала и окончания развертки соответственно и указываются пользователем. Они должны попасть в интервал времени ЛЧМ-сигнала  $T$

$$0 \leq \tau_G(f_1) < \tau_G(f_2) \leq T \quad (4)$$

Поскольку сигнал генерируется в частотной области, фактическое время начала и окончания будет протекать слишком мало во временной области. В зависимости от ваших требований, вы можете начать развертку немного после 0 и остановить развертку немного раньше  $T$ .

Вспоминая, что ГВЗ

, фаза (в радианах) может быть получена интегрированием времени группового

запаздывания

$$\phi(f) = -2\pi \int \tau_G(f) df \quad (5)$$

Лучше всего это делать используя численные методы.

#### 4. Анализ качающихся синусоидальных ЛЧМ-сигналов

Качающиеся синусоидальные ЛЧМ-сигналы проанализированы с использованием техники двух-канального БПФ (рис. 4), чтобы определить АЧХ тестируемого устройства (ТУ),

$$H_{DUT}(f) = \frac{Y(f)}{X(f)} \quad (6)$$

где  $Y(f)$  - БПФ входного канала, а  $X(f)$  - БПФ опорного канала. Деление на отклик канала связи (при условии, что он ненулевой) устраняет как амплитудные, так и фазовые неоднородности, присутствующие в тестовом сигнале.<sup>2</sup> Это автоматически учитывает любую предполагаемую или случайную неравномерность в стимулирующем сигнале, а также обнуляет любое присутствующее ГВЗ. Импульсная характеристика ИУ, таким образом, БПФ  $H_{IU}(f)$ .

Теперь мы можем увидеть, как логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал может создать импульсную характеристику без искажений. ГВЗ в логарифмически-синусоидальном ЛЧМ-сигнале (которое будет удалено), является

$$\tau_G(f) = T \frac{\ln(\frac{f}{f_1})}{\ln(\frac{f_2}{f_1})} \quad (7)$$

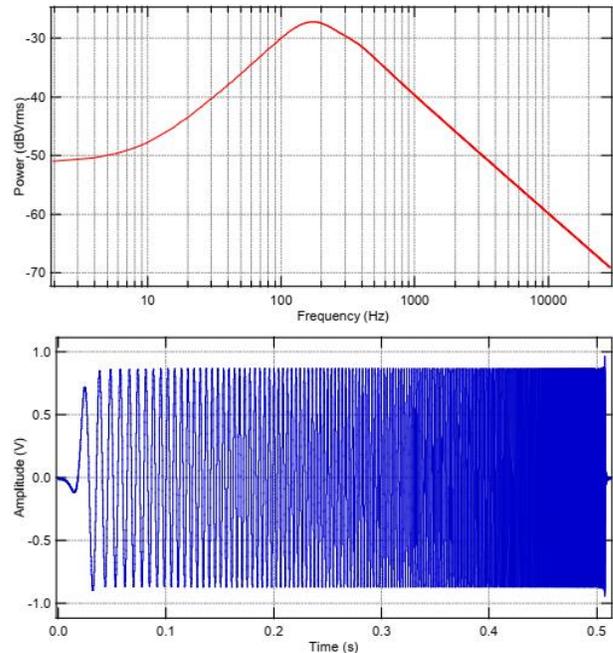


Рисунок 3. а) Спектр мощности сигнала ЛЧМ переменной скорости. В этом примере целевым эквалайзером был шум ANSI. б) Запись во времени одного и того же ЛЧМ-сигнала с переменной скоростью. Сигнал задерживается на частотах с большим акцентом и ускоряется на частотах с небольшим акцентом для достижения низкого коэффициента амплитуды (в данном случае 4,4 дБ).

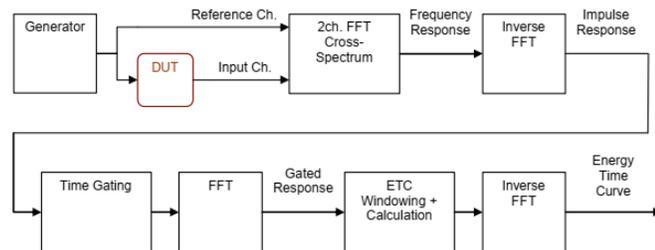


Рисунок 4. Диаграмма, показывающая прохождение сигнала при 2-канальном БПФ-измерении, например, в анализаторе звука SR1, используемом в этой статье. В акустических измерениях обычно используются временные стробирующие сигналы и расчет кривой энергии-времени (ETC).

<sup>2</sup> Также важно, чтобы БПФ видел согласованный спектр стимулирующего сигнала, особенно если есть задержки между опорным и входным каналами. Использование шумоподобного стимулирующего сигнала с несогласованным спектром от кадра к кадру

Это представляет собой *время*, за которое производится (фундаментальная) частота  $f$ . Время, за которое производится  $N$ -я гармоника,  $f_N$ , является временем, когда фундаментальная частота равна  $f_N/N$ . Таким образом, ГВЗ гармоники равно

$$\tau_{GN}(f_N) = T \frac{\ln(\frac{f_N}{f_1})}{\ln(\frac{f_2}{f_1})}. \tag{8}$$

После двухканального БПФ-анализа ГВЗ фундаментальной частоты обнуляется, что означает, что ГВЗ на каждой частоте вычитается согласно (7). Таким образом, ГВЗ гармоник становится

$$\Delta\tau_{GN}(f_N) = \tau_{GN}(f_N) - \tau_G(f_N) = -T \frac{\ln(N)}{\ln(\frac{f_2}{f_1})}. \tag{9}$$

Обратите внимание, что это зависит только от *порядка* гармоники  $N$ , но никак не от частоты  $f_N$ ! Таким образом, после анализа все частоты, возникающие из конкретного порядка гармоники, поступают *в одно и то же время*, создавая импульсную характеристику, которая предшествует линейной импульсной характеристике на время  $|\Delta\tau_{GN}|$  (Рис. 5а). Это вполне закономерный результат, уникальное свойство логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала.

### 5. Примеры качающихся синусоидальных ЛЧМ-сигналов

Для проведенных здесь измерений мы использовали наш новый аудиоанализатор SR1. В состав этого анализатора входят генераторы логарифмически-синусоидальных ЛЧМ-сигналов и ЛЧМ-сигналов переменной скорости, а также двухканальный анализатор БПФ (на самом деле их два). На рисунках 5 и 6 мы используем логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал для измерения поведения эллиптического фильтра нижних частот с частотой среза 6 кГц. На рис. 5а показана импульсная характеристика фильтра с

гармоническими импульсами, аккуратно разделенными во времени. В этом примере  $f_2/f_1 = 4095$  и  $T = 128$  мс, и все гармонические импульсы прибывают в ожидаемое время. Посредством синхронизации импульсной характеристики для включения или исключения импульсов искажения мы получаем

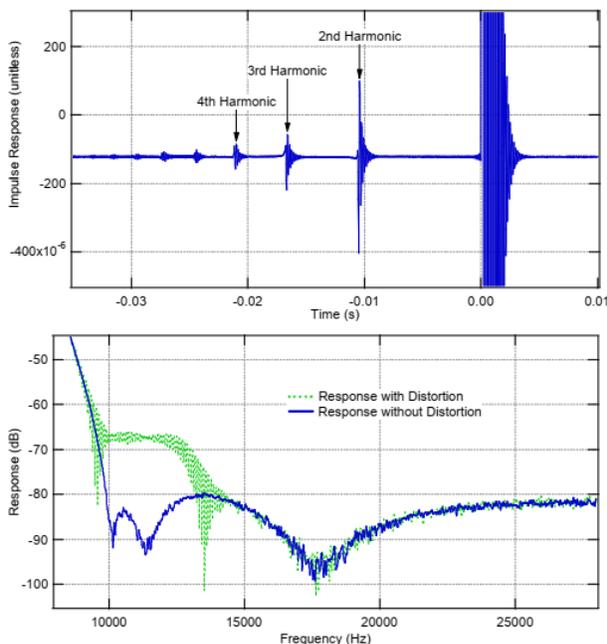


Рисунок 5. а) Измеренная электрическая импульсная характеристика эллиптического фильтра нижних частот с логарифмически-синусоидальным ЛЧМ-сигналом. Основной отклик (без искажений) происходит после  $t = 0$ . Нелинейные отклики состоят из пиков, которые *предшествуют* основному отклику, а отклики более высокого порядка возникают раньше. б) Строблируя импульсную характеристику, мы можем исследовать частотную характеристику полосы подавления с продуктами искажения (зеленый) и без (синий). Ясно видно вторжение энергии 2-й гармоники на уровне -65 дБ до удвоенной частоты ФНЧ.

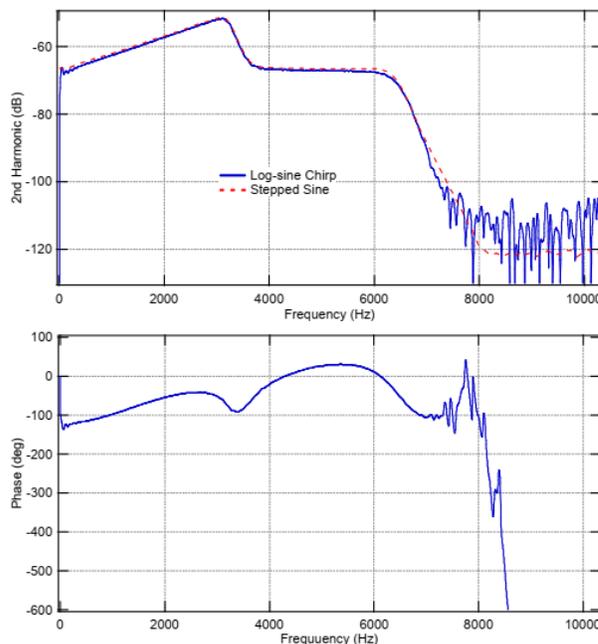


Рис. 6. а) Искажение второй гармоники эллиптического фильтра нижних частот, измеренное с помощью логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала (синий) и стандартной ступенчатой синусоидальной развертки (красный). Оба измерения относятся к входным данным. Данные логарифмического синусоидального ЛЧМ-сигнала очень хорошо отслеживают обычные измерения вплоть до -100 дБ. б) Фазовая характеристика второй гармоники с удаленной задержкой, измеренная с помощью логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала.

частотную характеристику полосы подавления ИУ с искажениями или без них (рис. 5b). Синяя кривая - это АЧХ фильтра без искажений, а зеленая кривая включает компоненты искажения. Разница между двумя кривыми полностью связана с искажением (преимущественно второй гармоникой, о чем свидетельствует спад на ~ 12 кГц, что вдвое превышает частоту среза фильтра).

Теперь каждая гармоническая импульсная характеристика на Рисунке 5а отражает *полное поведение* продукта искажения (амплитуду и фазу) и может быть проанализирована так же, как и линейная характеристика. На рисунке 6 импульсная характеристика второй гармоники синхронизируется и анализируется (от -14 мс до -4 мс, с 5% -ной фильтрацией приподнятым косинусом, примененным к обоим концам).<sup>3</sup> По общему признанию необычная характеристика искажения второй гармоники точно отслеживает результаты обычного ступенчатого измерения синусоиды, так что это подтверждает точность измерения искажения, измеренного с помощью логарифмически-синусоидального ЛЧМ-сигнала. Фазовый отклик второй гармоники показан на рис. 6b после устранения постоянной задержки. Эти измерения были усреднены менее чем за секунду (128 мс ЛЧМ усреднен 4 раза).

Далее мы продемонстрируем использование ЛЧМ-сигналов переменной скорости для проведения акустического измерения громкоговорителя. Возможность адаптировать частотную характеристику тестового сигнала часто бывает очень полезна. В этом случае мы выбрали целевой эквалайзер ANSI шума (рис. 2а), который напоминает частотный спектр программного материала. Мы также выбрали его, потому что мощность падает ниже 100 Гц, а из-за временного стробирования мы не ожидали значимых данных ниже нескольких сотен герц в любом случае. Используемая схема измерения была аналогична Рис. 4, за исключением того, что выход усилителя следовал на опорный канал аудиоанализатора SR1 (рис. 7). Это приведет к удалению частотной характеристики усилителя, оставив измеренный отклик как у 2-полосного динамика (ТУ) и калиброванный микрофон. Питание динамика было установлено на 2 В<sub>ср</sub> (1 Вт на 4 Ом), а измерительный микрофон был размещен на расстоянии около 10 футов.

На рисунке 8а показана часть импульсной характеристики, измеренной с помощью ЛЧМ-сигнала переменной скорости, который имеет целевой эквалайзер шума ANSI для имитации программного материала. Импульсная характеристика начинается примерно с 9,5 мс из-за расстояния между микрофоном и динамиком. Первое эхо (отражение от пола) следует примерно еще через 2,5 мсек. b) Необработанная частотная характеристика динамика, включая эхо, отображается зеленым цветом. Кривая синего цвета - это стробированный квазибездыховый отклик, который показывает гораздо более плавный и значимый отклик. Стробирование применялось между 8 и 12 мс, с фильтром приподнятого косинуса 5% на обоих концах. Из-за того, что первое эхо появляется всего через 2,5 мс, отклик ниже примерно 400 Гц неточен.

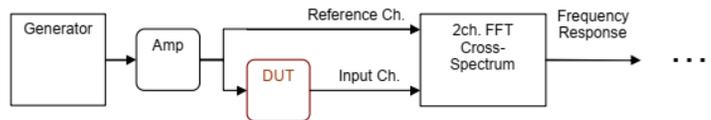


Рисунок 7. Модифицированный поток сигналов, когда выход усилителя мощности запитывает опорный канал. Это устраняет дефекты амплитуды и фазы усилителя из измерений громкоговорителя.

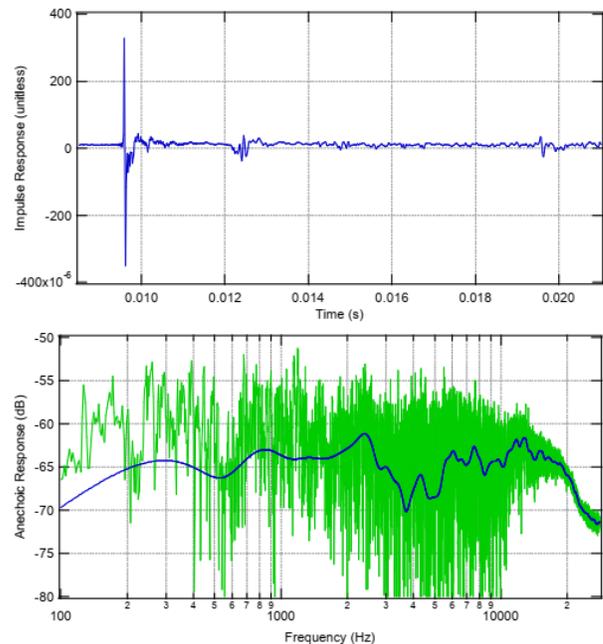


Рис. 8. а) Импульсная характеристика динамика, измеренная с помощью ЛЧМ-сигнала переменной скорости, который имеет целевой эквалайзер шума ANSI для имитации программного материала. Импульсная характеристика начинается примерно с 9,5 мс из-за расстояния между микрофоном и динамиком. Первое эхо (отражение от пола) следует примерно через 2,5 мсек. b) Необработанная частотная характеристика динамика, включая эхо, отображается зеленым цветом. Кривая синего цвета - это стробированный квазибездыховый отклик, который показывает гораздо более плавный и значимый отклик. Стробирование применялось между 8 и 12 мс, с фильтром приподнятого косинуса 5% на обоих концах. Из-за того, что первое эхо появляется всего через 2,5 мс, отклик ниже примерно 400 Гц неточен.

<sup>3</sup> При анализе гармонических импульсов не забудьте разделить частотную ось на *N*. например, отклик на 20 кГц для импульса второй гармоники был сгенерирован основной частотой 10 кГц.

## 6. Заключение

И логарифмически-синусоидальный ЧМ-сигнал, и ЛЧМ-сигнал переменной скорости - мощное дополнение к набору инструментов профессионального звукорежиссера. Эти сигналы можно использовать для очень быстрого измерения по сравнению с традиционными ступенчатыми синусоидальными развертками, и имеют коэффициенты амплитуды значительно лучше, чем у MLS. Логарифмически-синусоидальный ЛЧМ-сигнал также имеет уникальное преимущество возможности разделения характеристики искажений от линейной характеристики, в то время как ЛЧМ-сигнал переменной скорости может генерировать индивидуальный частотный спектр с низким коэффициентом амплитуды. Преимущества этих сигналов были продемонстрированы в реальных тестовых ситуациях с использованием анализатора звука SR1 Stanford Research Systems.

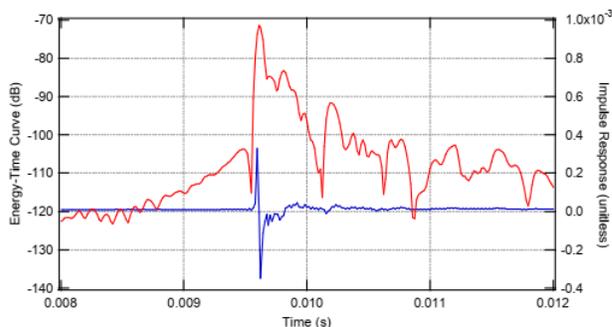


Рисунок 9. Кривая энергии-времени тестируемого динамика (красный) вместе с соответствующей стробируемой импульсной характеристикой (синий), измеренная с помощью ЛЧМ-сигнала переменной скорости. Целевым частотным спектром ЛЧМ-сигнала был шум ANSI. Для расчета ETC использовалось половинное окно Ганна.

## 7. Список использованной литературы

- [1] A. Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept sine technique," *presented at the 1081<sup>th</sup> AES Convention*, Paris, France, February 2000.
- [2] T. Kite, "Measurement of audio equipment with log-swept sine chirps," *presented at the 117<sup>th</sup> AES Convention*, San Francisco, October 2004.
- [3] S. Muller and P. Massarini, "Transfer-Function Measurement with Sweeps," *J. Audio Eng. Soc.*, vol. 49, pp. 443-471, June 2001.
- [4] J. Vanderkooy and S. P. Lipshitz, "Uses and Abuses of the Energy-Time Curve," *presented at the 87<sup>th</sup> AES Convention*, New York, October 1989.