

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МИКРОФОНОВ В НЕЗАГЛУШЕННОМ ЛАБОРАТОРНОМ ПОМЕЩЕНИИ, ОСНОВАННАЯ НА ПРИМЕНЕНИИ ШИРОКОПОЛОСНОГО СИГНАЛА ВОЗБУЖДЕНИЯ

Ю.А. Кувыкин<sup>1</sup>

original.rus@mail.ru

А.Н. Ольховский<sup>1</sup>

rusregister.ano@mail.ru

В.В. Супрунюк<sup>1</sup>

vvs@trxline.ru

И.Н. Соколов<sup>2</sup>

i.sokolov@visom.ru

<sup>1</sup> ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России, г. Мытищи,  
Московская обл., Российская Федерация

<sup>2</sup> АО «Висом», д. Туринщина, Смоленская обл., Российская Федерация

---

### Аннотация

Приведена методика определения частотных характеристик микрофонов с применением широкополосного сигнала возбуждения, основанная на методе спектрометрии временных задержек на базе рекурсивного фильтра алгоритма Гёрцеля и дополнительного скользящего комплексного взвешенного усреднения в условиях, отягощенных реверберацией звука. Для минимизации влияния отражений при измерениях использована комбинация результатов измерений по полю и давлению. На основе предложенного алгоритма разработано программное обеспечение постобработки результатов измерений при определении частотных характеристик микрофонов в незаглушенном лабораторном помещении. Создан исследовательский измерительный комплекс и проведена экспериментальная апробация разработанной методики и программного обеспечения с определением методической погрешности частотных характеристик микрофонов на основе широкополосного сигнала возбуждения. Разработанная методика с программным обеспечением рекомендована для определения частотных характеристик измерительных микрофонов по полю в незаглушенных реверберирующих лабораторных помещениях без использования вспомогательного оборудования (заглушенной камеры и камеры малого объема) с учетом приведенных в работе практических рекомендаций

### Ключевые слова

*Микрофон, методика, частотная характеристика, свободное поле, частотно-модулированный сигнал, градуировка, фильтр с бесконечной импульсной характеристикой, спектрометрия временных задержек, скользящее комплексное взвешенное усреднение, программное обеспечение*

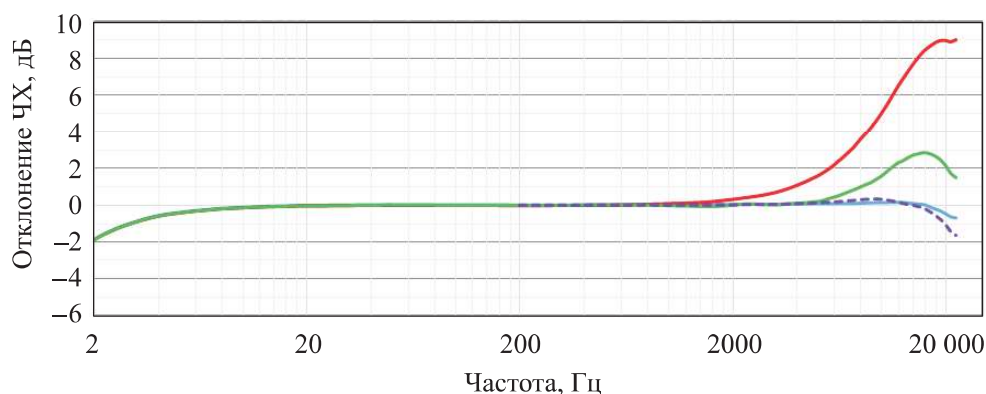
Поступила 16.12.2021

Принята 30.12.2021

© Автор(ы), 2021

**Введение.** Микрофоны широко используются для различных акустических измерений как отдельно, так и в составе шумомеров измерительных комплексов и систем контроля эффективности защиты акустической (речевой) информации от утечки по техническим каналам. Основной метрологической характеристикой измерительного микрофона является коэффициент преобразования, т. е. его чувствительность или уровень чувствительности. В процессе эксплуатации микрофона используется и периодически контролируется его частотная характеристика (ЧХ) — зависимость чувствительности микрофона от частоты звукового давления.

Частотная характеристика микрофона в зависимости от условий применения определяется при производстве, испытаниях в целях утверждения типа и поверки в свободном поле (по полю), в поле давления (по давлению) или диффузном поле. Такую операцию называют градуировкой измерительного микрофона. Микрофон можно использовать для измерений в каждом приведенном поле, но при этом должна применяться соответствующая полю ЧХ. Как правило, для измерений подбирается микрофон с наиболее линейной ЧХ по соответствующему полю. Отклонения ЧХ от значения на базовой частоте 250 Гц микрофона типа 4192 фирмы Брюль и Кьер, полученные на основе данных паспорта производителя, приведены на рис. 1.



**Рис. 1.** Отклонения ЧХ микрофона типа 4192 по давлению (—), свободному (—) и диффузионному (—) полям, по актюатору (—)

Видно, что ЧХ по полю и давлению в диапазоне частот от 20 до 1000 Гц практически совпадают (относительная разность ЧХ микрофона типа 4192 в указанном диапазоне не превышает 0,09 дБ). Относительная разность между чувствительностью микрофона в разных полях на частотах более 2 кГц может достигать 10,6 дБ и вносить существенные искажения в ре-

зультаты измерений. Следовательно, если известны только данные градуировки по давлению, то микрофон нельзя применять для измерений в свободном поле из-за большой относительной разности его чувствительностей для этих полей. Необходимо ввести дифракционные поправки, которые определяются или подтверждаются испытаниями, проводимыми в целях утверждения типа с применением соответствующих методик. Дифракционная поправка определяет разность между значениями чувствительности микрофона в полях на конкретной частоте.

В процессе эксплуатации при проведении поверочных работ для конденсаторных измерительных микрофонов предпочтительным считается метод определения ЧХ с применением электростатического возбудителя (актюатора) [1], который наиболее прост по сравнению с измерениями по полю с использованием заглушенной камеры (ЗК) или в диффузном поле реверберационной камеры. При измерениях с применением актюатора частотно-модулированные (ЧМ) сигналы позволяют значительно сократить время градуировки [2]. Однако ЧХ микрофона, которая была определена актюатором, не может быть использована при проведении измерений в свободном поле, поскольку должны быть известны соответствующие дифракционные поправки.

В последнее время зарубежные и отечественные производители акустических комплексов и систем часто используют в их составе измерительные микрофоны широкого применения нестандартизированных типоразмеров (например, микрофоны европейского производства типов Behringer ECM8000, Beyerdynamic MM1, NTi MINISPL). Указанные микрофоны имеют более простую конструкцию, меньшую стоимость, большую устойчивость к неблагоприятным условиям применения (пыли, влаге, механическим воздействиям) по сравнению с измерительными конденсаторными микрофонами. Для градуировки таких микрофонов не подходит электростатический метод с применением актюатора, поскольку металлическая диафрагма у них либо отсутствует, либо недоступна для измерений. Они могут градуироваться только акустическими методами [3], которые для определения ЧХ микрофонов по свободному полю предусматривают применение вместо ЗК незаглушенных лабораторных помещений достаточно большого объема. Рекомендации по реализации градуировок микрофонов по свободному полю приведены в [4], а в отечественной практике в настоящее время применяются очень редко.

Известные отечественные методики определения ЧХ микрофонов по давлению методом сравнения с применением камер связи — камер малого объема (КМО) не подходят из-за нестандартизированных разме-

ров микрофонов и не обеспечивают измерения в требуемом диапазоне рабочих частот микрофона от 20 Гц до 20 кГц [5].

Для градуировки микрофонов по полю обычно применяется ЗК, в которой обеспечиваются условия свободного поля. Считается, что в такой камере присутствует только прямая волна излучателя. Однако в поверочных лабораториях реализация условий свободного поля в диапазоне рабочих частот от 20 Гц до 20 кГц является трудно выполнимой задачей и требует больших затрат, поскольку:

- эффективность заглушающих покрытий, применяемых для ослабления отражений при измерениях в широком диапазоне частот, не для всех задач оказывается достаточной;
- повышение точности градуировок в ЗК требует все более значительного ослабления отражаемых от стен камеры звуковых волн, влиянием которых ранее пренебрегали;
- заглушенные камеры имеют высокую стоимость и не выпускаются серийно, а разрабатываются только под заказ;
- заглушенная камера является стационарной конструкцией (исключена мобильность при передаче единицы звукового давления в воздушной среде).

Приблизиться к условиям свободного поля, реализуемым в ЗК, можно используя незаглушенные лабораторные помещения достаточного объема, применяя специальные методы формирования и обработки акустических сигналов, временное усреднение, различные типы широкополосного сигнала в качестве источника возбуждения акустического сигнала, моделирование и экстраполяцию свободной от отражений части сигнала, подавление отражений с помощью математической обработки сигнала [3, 6–9].

Применение постобработки (специальных методов последующей обработки сигналов при определении ЧХ микрофонов в незаглушенном лабораторном помещении) позволит выполнить измерения без использования ЗК. Для измерений по полю в незаглушенном реверберирующем лабораторном помещении необходимо определить оптимальное расположение источника и приемника звука, а для селекции излучаемого прямого и отраженного сигналов от поверхностей помещения (потолка, пола, стен и оборудования крепления микрофонов) требуется применение методов цифровой обработки. При этом постобработка измерительных сигналов позволит исключить операции аппаратного гетеродинирования и детектирования излученного и принятого сигналов и обеспечит возможность обрабатывать компактный фрагмент экспериментальной частотной зависимости.

В настоящее время методики градуировки микрофонов по свободному полю в незаглушенном лабораторном помещении в отечественной метрологической практике отсутствуют, погрешности от реализации этих методов не определены.

Для разработки методики градуировки микрофонов в незаглушенном лабораторном помещении предложено:

– разработать рекомендации к размещению источника и приемника звукового давления в незаглушенном лабораторном помещении;

– при постобработке результатов измерений применять рекурсивный фильтр алгоритма Гёрцеля (далее — рекурсивный фильтр), что позволит эффективно вычислять один частотный компонент (компактный фрагмент экспериментальной частотной зависимости) в условиях реверберации. Рекурсивный фильтр имеет минимальное размытие результата измерений по частоте, в несколько раз меньше, чем при применении других способов вычисления частотных составляющих, например, анализатора спектра на основе быстрого преобразователя Фурье с наложением прямоугольного окна, окон Хемминга, Блэкмана, Хеннинга, Пирсона [10, 11].

**Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Постановка задачи** — разработать методику определения ЧХ микрофонов с использованием широкополосного сигнала возбуждения и применением метода спектрометрии временных задержек на основе рекурсивного фильтра при комбинации результатов измерений по полю и давлению в условиях, отягощенных реверберацией звука.

Этапы настоящего исследования следующие.

1. Проведение сравнительного анализа существующих методов ослабления влияния отражений звуковой волны при градуировке приемников звука в воздушной среде по полю.

2. Определение условий размещения излучателя и приемника звукового давления в незаглушенном лабораторном помещении.

3. Разработка методики определения ЧХ микрофонов на основе применения широкополосного сигнала возбуждения в незаглушенном лабораторном помещении.

4. Разработка программного обеспечения постобработки результатов измерений при определении ЧХ микрофонов по полю в условиях, отягощенных реверберацией звука.

5. Экспериментальная апробация методики и программного обеспечения с выявлением методической погрешности при определении ЧХ микрофонов на основе широкополосных сигналов возбуждения в незаглушенном лабораторном помещении.

6. Указание практических рекомендаций по применению разработанных методики и программного обеспечения.

*Этап 1.* В результате сравнительного анализа методов ослабления влияния отражений звуковой волны при градуировке приемников звука в воздушной среде по свободному полю [6] выявлено, что для реализации предлагаемой методики необходимо применение метода спектрометрии временных задержек (СВЗ) [8, 9] и метода скользящего комплексного взвешенного усреднения (СКВУ) [12–15].

Основными ограничениями применения метода СВЗ для разработки предлагаемой методики являются:

- ограниченный диапазон рабочих частот геометрическими размерами помещения и используемого источника. Для измерений необходима регистрация трех периодов звуковой волны, что вынуждает дополнительно применять актюатор для определения ЧХ микрофона (только для конденсаторных микрофонов) или КМО в диапазоне 20...1000 Гц;
- применение операций гетеродинирования и детектирования для демодуляции широкополосного сигнала возбуждения.

Основным ограничением применения метода СКВУ для разработки предлагаемой методики является подавление конечного числа отражений и уменьшение остальных отражений в воздушной среде, когда в сигнале присутствует более трех отражений.

С учетом изложенного необходимо предусмотреть три области определения ЧХ микрофона:

- в диапазоне частот 20...1000 Гц применяется метод СВЗ по давлению;
- в диапазоне частот 1...20 кГц применяется метод СВЗ по свободному полю;
- если условия проведения измерений не позволяют настроить рекурсивный фильтр на первое отражение, фильтр настраивается на второе отражение, а после комбинации результатов по первым двум областям дополнительно к СВЗ применяется метод СКВУ для подавления первого отражения.

При этом постобработка позволит исключить операции аппаратного гетеродинирования и детектирования при реализации методов СВЗ и СКВУ.

Для реализации методики применен широкополосный ЧМ-сигнал возбуждения по логарифмическому закону (ЛогЧМ-сигнал), преимущество применения которого описано в [2]. При этом профиль сигнала состоит из двух участков с разной скоростью прохода в зависимости от геометриче-

ских размеров используемого помещения. Скорость прохода зависит от разрешающей способности рекурсивного фильтра и необходимости регистрировать минимум три периода звуковой волны.

*Этап 2.* Для минимизации влияния отражений при проведении измерений используются следующие процедуры.

1. Для реализации методики в первой области частот определения ЧХ микрофона используется метод сравнения. Эталонный и поверяемый микрофоны располагаются соосно, напротив друг друга с расстоянием между мембранами не более 1 мм. При этом источник звукового давления размещается по оси нормали диафрагмы эталонного микрофона на расстоянии не менее 1 м. Схема реализации первого этапа методики приведена на рис. 2, а.

2. Для реализации методики во второй области частот определения ЧХ микрофона используется метод замещения. Эталонный (и поверяемый) микрофон устанавливается на расстоянии  $L_S$  от источника звукового давления. При этом от микрофона до ближайшей поверхности должно быть расстояние  $L_R$  и должно выполняться условие  $L_S < L_R$ , которое необходимо, чтобы отражения поступали на микрофон с определенным запаздыванием. Минимальное время запаздывания первого отражения определяется разрешающей способностью рекурсивного фильтра. Схема реализации второго этапа методики приведена на рис. 2, б.

*Этап 3.* Алгоритм реализации предлагаемой методики содержит следующие шаги.

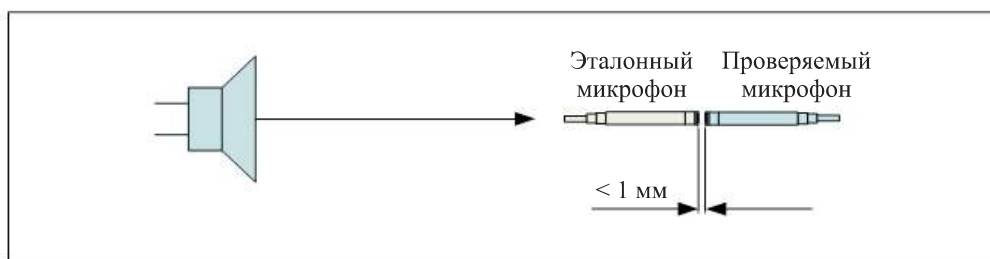
1. На источник звукового давления подается ЛогЧМ-сигнал от генератора измерительной системы и регистрируется выходное напряжение сигнала измерительной системы  $S_{out}$  и эталонного (или поверяемого) микрофона  $V_{out}$ , а также напряжение опорного цифрового сигнала с постоянной амплитудой COLA (Constant Output Level Amplitude) измерительной системы  $S_{COLA}$ .

2. Вычисляется задержка сигнала от источника звука до микрофона по формуле

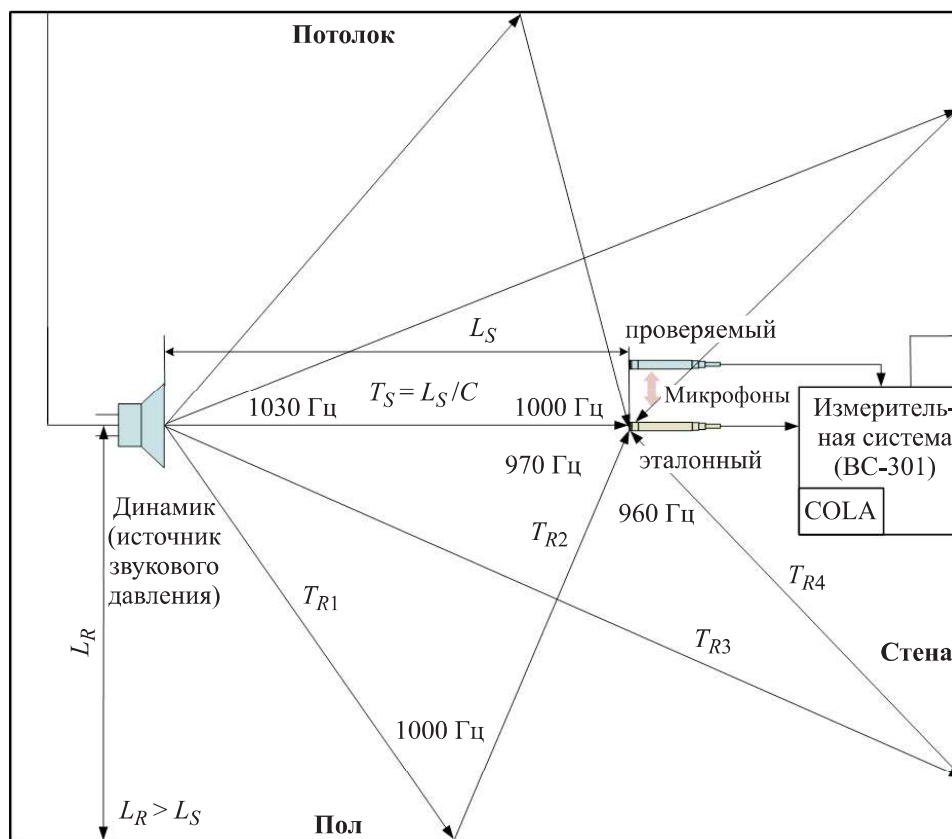
$$T_S = L_S / C, \quad (1)$$

где  $T_S$  — задержка сигнала;  $C$  — скорость звука;  $L_S$  — расстояние между источником и микрофоном.

3. Выполняется гетеродинирование и детектирование принятого приемником прямого отклика с использованием в качестве опорного цифрового сигнала COLA, идентичного излученному и несодержащему шумовых компонент.



а



б

**Рис. 2.** Схемы реализации методики определения ЧХ микрофонов по давлению (а) и свободному полю (б)

Для сигнала  $S_{COLA}$  определяется его частота за заданный промежуток времени  $[l_0; l_1]$ , подсчитывается число переходов через ноль. При этом момент начала отсчета зависит от точности определения скорости звука в помещении и расстояния от источника звука до микрофона, так как с применением рассчитанной по этим данным временной задержки опре-



деляется время начала отсчета сигнала. Для каждого отсчета из заданного промежутка времени проверяется условие

$$D_i D_{i-1} < 0, \quad (2)$$

где  $D_i$  —  $i$ -й отсчет напряжения;  $D_{i-1}$  — предыдущий отсчет напряжения.

Цифровой сигнал COLA в любой момент времени имеет такую же частоту, как и аналоговые сигналы, записанные с выходов микрофонов с учетом временной задержки распространения звуковой волны от источника звука до микрофона. Частота сигнала микрофона рассчитывается на основе числа сработавших условий, деленного на два (деление возникает, так как один период синусоидального сигнала имеет нулевое значение в точках с фазой 0 и  $\pi$  рад), за анализируемый промежуток времени.

4. Селекция излучаемого прямого и отраженного ЧМ-сигналов осуществляется с применением специальной реализации дискретного преобразования Фурье в форме рекурсивного фильтра (рис. 3).

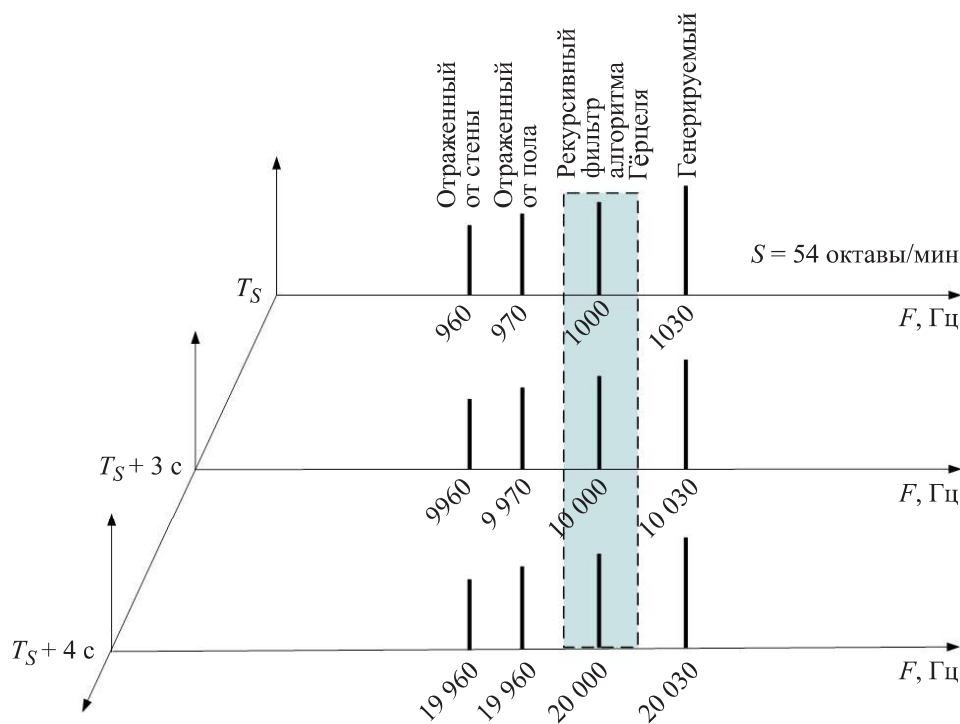


Рис. 3. Схема применения рекурсивного фильтра

При этом проводят следующие вычисления:

– определяют константу

$$P_1 = 2 \cos\left(2\pi \frac{f}{F_S}\right), \quad (3)$$

где  $f$  — частота на предыдущем шаге;  $F_S$  — частота дискретизации сигнала;

– каждый отсчет анализируемого временного промежутка сигнала проходит через цифровой фильтр с бесконечной импульсной характеристикой (БИХ), реализуемый с помощью формулы

$$V = D_i + h_0 P_1 - h_1, \quad (4)$$

где  $h_0$  — отсчет сигнала с задержкой в один шаг;  $h_1$  — отсчет сигнала с задержкой в два шага (рис. 4).

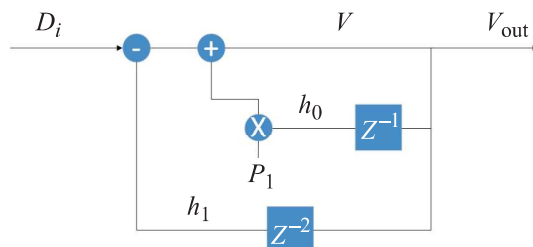


Рис. 4. Схема БИХ-фильтра

Когда все отсчеты на временном промежутке пропущены через фильтр, вычисляется значение амплитуды сигнала выходного напряжения  $V_{out}$  для сигнала  $S_{out}$ :

$$V_{out} = \left| \left( h_0 - h_1 e^{-2i\pi \frac{f}{F_S}} \right) e^{-2i\pi f \frac{t_1 - t_0}{F_S}} \right|. \quad (5)$$

Для сигнала (сигналов) микрофона рассчитываются амплитудные значения звукового давления за временной промежуток  $[t_0 + T_S; t_1 + T_S]$  с использованием рекурсивного фильтра.

5. Если разрешающая способность рекурсивного фильтра не позволяет подавить первое отражение, то фильтр настраивается, исходя из задержки второго отражения, а в дополнение к СВЗ применяется метод СКВУ для подавления первого отражения:

– предварительно получается информация о временных задержках отражений с применением радиоимпульса (импульса, заполненного синусоидальным сигналом звукового диапазона частот). Осциллограмма прямой волны принятого импульса и его отражений приведена на рис. 5;

– по времени задержки прихода первого отражения рассчитываются частотные интервалы скользящего усреднения [15]

$$\Delta f_i = 1 / \Delta \tau_i; \quad (6)$$

например, как следует из рис. 5, время задержки прихода первого отражения  $\Delta \tau_i = 0,005048$  с, соответственно  $\Delta f_i = 198,1$  Гц;

– выполняется комплексное усреднение ЧХ в диапазоне частот.

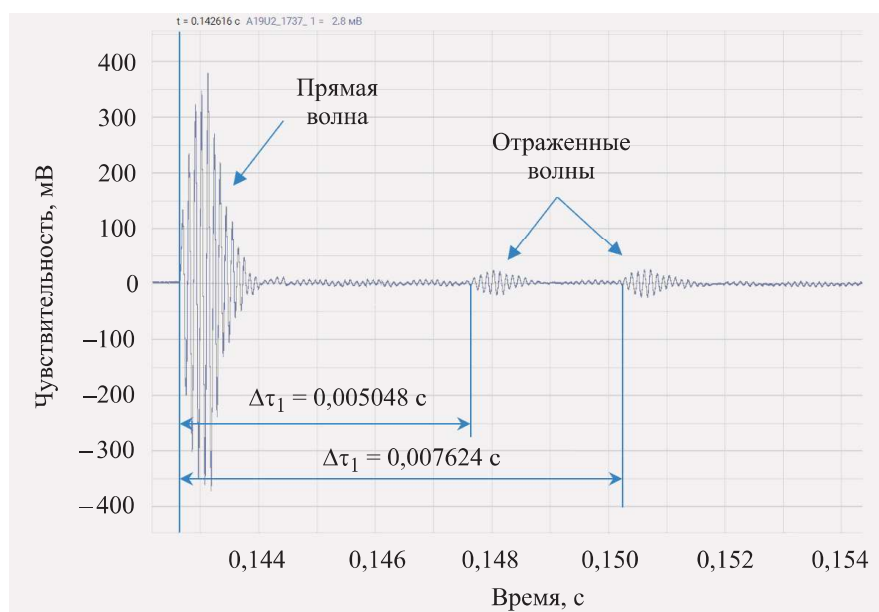


Рис. 5. Осциллограмма прямого и отраженного сигналов радиоимпульса

При необходимости можно повторить комплексное усреднение для нескольких отражений, что приведет к взвешенному усреднению [15].

6. Для каждой частоты рассчитывается чувствительность поверяемого микрофона с использованием полученных массивов при измерении по давлению и полю:

$$M_{p,f} = \frac{V_{p,f}}{V_{r,f}} M_{r,f}, \quad (7)$$

где  $M_{p,f}$  и  $M_{r,f}$  — коэффициенты преобразования поверяемого и эталонного микрофонов на частоте  $f$ ;  $V_{p,f}$  и  $V_{r,f}$  — значения напряжений поверяемого и эталонного микрофонов на частоте  $f$ .

При вычислении массивов данных измерения по полю применяется поправка на отношение выходных напряжений для каждой частоты:

$$M_{p,f} = \frac{V_{p,f}/V_{r,f}}{V_{out,p,f}/V_{out,r,f}} M_{r,f}, \quad (8)$$

где  $V_{out,p,f}$  и  $V_{out,r,f}$  — амплитудные значения выходного напряжения для поверяемого и эталонного микрофонов на частоте  $f$ .

*Этап 4.* На основе приведенного алгоритма разрабатывается программное обеспечение постобработки результатов измерений при определении ЧХ микрофонов в условиях, отягощенных реверберацией звука. (Программа зарегистрирована в Роспатенте 30.09.2021, № 2021665605.)

*Этап 5.* Для экспериментальной апробации разработанных методики и программного обеспечения собран исследовательский измерительный комплекс, состоящий из персональной вычислительной машины (ноутбука); системы управления виброиспытаниями ВС-301; электродинамической акустической системы MS400a; измерительного микрофона с капсюлем типа 4192 и предварительным усилителем типа 2669 — микрофона типа 4192 (эталонного по давлению); измерительного микрофона с капсюлем типа 4133 и предварительным усилителем типа 2669 — микрофона типа 4133 (эталонного по полю); измерительного микрофона с капсюлем МК-221 и предварительным усилителем типа 2669 — микрофона МК-221 (поверяемого микрофона); измерительного усилителя NEXUS (для обеспечения питания поляризации 200 В).

При апробации выполняются следующие процедуры:

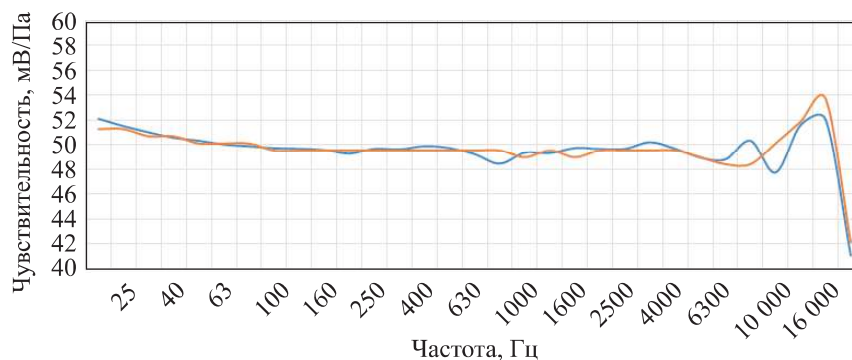
- измерение по давлению для микрофона МК-221 с применением эталонного микрофона типа 4192 в диапазоне частот 20...1000 Гц (см. рис. 2, а);
- измерение по полю для микрофона МК-221 с применением эталонного микрофона типа 4133 в диапазоне частот 1...20 кГц (см. рис. 2, б);
- соединение двух полученных фрагментов (комбинация измерений по свободному полю и давлению) и дополнительно проведение постобработки методом СКВУ;
- по полученным массивам данных определение ЧХ микрофона МК-221 по свободному полю.

На рис. 6 приведены графики ЧХ микрофона МК-221, полученные на исследовательском измерительном комплексе с применением методики и на Государственном вторичном эталоне единицы звукового давления в воздушной среде ВЭТ 19-1-2008.

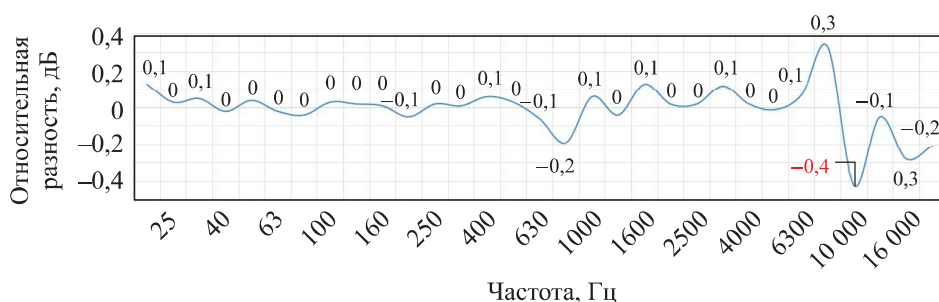
Графики относительной разности градуировок микрофона МК-221 на исследовательском измерительном комплексе и на ВЭТ 19-1-2008 приведены на рис. 7. Видно, что максимальная относительная разность градуировок составила  $-0,4$  дБ.

Указанная разность не превышает погрешности измерений в номинальном диапазоне частот по свободному полю в ЗК, которая должна

быть в пределах  $\pm (0,5-1,0)$  дБ в соответствии с действующим нормативным документом, регламентирующим методику поверки микрофонов\*.



**Рис. 6.** Графики ЧХ микрофона МК-221, полученные с применением разработанной методики (—) и Государственного вторичного эталона ВЭТ 19-1-2008 (—)



**Рис. 7.** График относительных разностей результатов определения ЧХ микрофона МК-221 с применением методики и Государственного вторичного эталона ВЭТ 19-1-2008

*Этап 6.* При реализации методики должны быть выполнены следующие практические рекомендации [3, 4].

1. Стабильность воспроизведения звукового давления в помещении должна быть постоянной во всем исследуемом диапазоне частот. Для этих целей перед проведением измерений источник звукового давления должен проработать не менее 5 мин, например, с применением сигнала белого шума.

2. Источник звукового давления должен обеспечивать воспроизведение уровня звукового давления на 20 дБ больше общего уровня помех (70...90 дБ во всем диапазоне рабочих частот).

\* ГОСТ 8.153-75 Микрофоны измерительные конденсаторные. Методы и средства поверки. М., Изд-во стандартов, 1975.

3. При выборе помещений для проведения измерений необходимо руководствоваться следующими положениями:

– размеры помещения должны обеспечить минимально допустимое расстояние между источником звукового давления и микрофоном, составляющее не менее трех длин звуковой волны на нижней частоте измерений ( $L_S = 3(C / f)$ , например, для частоты 1000 Гц при скорости звука, равной 340 м/с, расстояние должно быть не менее 102 см);

– расстояние от ближайшей отражающей поверхности помещения (потолка, пола или стены) до микрофона должно быть в 1,5 раза больше, чем расстояние от микрофона до источника звукового давления (например, для частоты 1000 Гц при скорости звука, равной 340 м/с, расстояние до пола должно быть не менее 153 см);

– источник звукового давления при определении ЧХ микрофона по давлению должен размещаться по оси нормали диафрагмы эталонного микрофона на расстоянии не менее 1 м; при этом расстояние между диафрагмами микрофонов должно быть не более 1 мм;

– температура, влажность и давление окружающей среды в помещении, где проводятся измерения, должны оставаться практически постоянными в установленных пределах, чтобы не оказывать дополнительное влияние на условия распространения звуковых волн в незаглушенном помещении лаборатории; при превышении допустимых параметров окружающей среды в результаты измерений должны вноситься поправки.

4. Крепление микрофона должно быть выполнено в форме длинного стержня того же диаметра, что и корпус микрофона, размером не менее 1 м. Любые недостатки формы стержня (включая разъем предусилителя) приводят к отражениям, которые влияют на измерения. При этом штатив с держателем микрофона должен быть также на расстоянии не менее 1 м от чувствительного элемента микрофона.

**Заключение.** Разработана методика определения ЧХ микрофонов на основе применения широкополосных сигналов возбуждения в незаглушенном реверберирующем лабораторном помещении, отличающаяся от известных применением метода спектрометрии временных задержек звуковых колебаний на базе рекурсивного фильтра при комбинации результатов измерений в свободном поле и поле давления в условиях, отягощенных реверберацией звука.

Разработано программное обеспечение постобработки результатов измерений при определении ЧХ микрофонов в условиях, отягощенных реверберацией звука, позволяющее:

– исключить операции гетеродинирования и детектирования принятого микрофоном сигнала источника звукового давления с использованием данных опорного цифрового сигнала COLA;

– обрабатывать компактный фрагмент ЧХ методом СКВУ.

Проведена экспериментальная апробация разработанной методики и программного обеспечения с определением методической погрешности при определении ЧХ микрофонов на основе применения широкополосного сигнала возбуждения в незаглушенном реверберирующем лабораторном помещении. Максимальная относительная разность градуировок по разработанной и стандартной (на ВЭТ 19-1-2008) методикам определения составила  $-0,4$  дБ при допустимых пределах  $\pm (0,5-1,0)$  дБ.

Результаты исследований позволяют рекомендовать разработанную методику с программным обеспечением для определения ЧХ измерительных микрофонов по свободному полю в незаглушенных реверберирующих лабораторных помещениях в практике поверочных лабораторий без использования вспомогательного оборудования (в виде ЗК и КМО) с учетом приведенных практических рекомендаций.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] IEC 61094-6:2004. Measurement microphones. Part 6. Electrostatic actuators for determination of frequency response. Geneva, IEC Central office, 2004.
- [2] Кувькин Ю.А., Соколов И.Н., Ольховский А.Н. Исследование метода определения частотных характеристик конденсаторных микрофонов с применением частотно-модулированного сигнала. *Вестник метролога*, 2021, № 2, с. 25–31.
- [3] Salzano C., Walber C., Nowak M., et al. Acoustic methods of microphone calibration. *ICV22*, 2015, pp. 103–109.
- [4] IEC 61094-8:2012. Measurement microphones. Part 8. Methods for determining the free-field sensitivity of working standard microphones by comparison. Geneva, IEC Central office, 2012.
- [5] IEC 61094-5:2016. Electroacoustics — measurement microphones. Part 5. Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison. Geneva, IEC Central office, 2016.
- [6] Лавров Р.О., Кувькин Ю.А. Сравнительный анализ методов ослабления влияния отражений звуковой волны при градуировке приемников звука в воздушной среде по свободному полю. *Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт*, 2018, т. 12, № 7, с. 59–62.
- [7] Barham R., Barrera-Figueroa S., Avison J.E.M. Secondary pressure calibration of measurement microphones. *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/129>

- [8] Наумов С.С., Князева Н.И., Буренков С.В. Многофункциональные акустические измерения на основе модифицированного метода спектрометрии временных задержек. *Акустические измерения. Методы и средства. IV Сессия Российского акустического общества*, М., Акуст. ин-т им. Н.Н. Андреева, 1995, с. 9–14.
- [9] Heyser R. Acoustical measurements by time-delay spectrometry. *JAES*, 1989, vol. 15, no. 4, pp. 370–382.
- [10] Sysel P., Rajmic P. Goertzel algorithm generalized to non-integer multiples of fundamental frequency. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2012, vol. 2012, art. 56.  
DOI: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-56>
- [11] Дворкович В.П., Дворкович А.В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М., Техносфера, 2016.
- [12] Исаев А.Е. Точная градуировка приемников звукового давления в водной среде в условиях свободного поля. Менделеево, ВНИИФТРИ, 2008.
- [13] Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Два подхода к градуировке гидрофонов по полю при непрерывном излучении в заглушенном бассейне. *Измерительная техника*, 2008, № 12, с. 47–51.
- [14] Исаев А.Е., Николаенко А.С., Черников И.В. Подавление реверберационных искажений сигнала приемника с использованием передаточной функции бассейна. *Акустический журнал*, 2017, т. 63, № 2, с. 1–10.  
DOI: <https://doi.org/10.7868/S0320791917020071>
- [15] Исаев А.Е., Матвеев А.Н. Применение метода скользящего комплексного взвешенного усреднения для восстановления неравномерной частотной характеристики приемника. *Акустический журнал*, 2010, т. 56, № 5, с. 651–654.

**Кувыкин Юрий Александрович** — старший научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

**Ольховский Александр Николаевич** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

**Супрунюк Василий Владимирович** — д-р техн. наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «ГНМЦ» Минобороны России (Российская Федерация, 141006, Московская обл., г. Мытищи, ул. Комарова, д. 13).

**Соколов Илья Николаевич** — начальник отдела программирования АО «Висом» (Российская Федерация, 214510, Смоленская обл., д. Туринщина).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Кувыкин Ю.А., Ольховский А.Н., Супрунюк В.В. и др. Методика определения частотных характеристик микрофонов в незаглушенном лабораторном помещении, основанная на применении широкополосного сигнала возбуждения. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2021, № 4 (137), с. 169–187.  
DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-4-169-187>



## A METHOD FOR DETERMINING FREQUENCY RESPONSE OF MICROPHONES IN UNMUFFLED LABORATORY ROOM USING WIDEBAND SIGNAL EXCITEMENT

Yu.A. Kuvykin<sup>1</sup>  
A.N. Olkhovskiy<sup>1</sup>  
V.V. Suprunyuk<sup>1</sup>  
I.N. Sokolov<sup>2</sup>

original.rus@mail.ru  
rusregister.ano@mail.ru  
vvs@trxline.ru  
i.sokolov@visom.ru

<sup>1</sup> Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defence of Russian Federation, Mytishi, Moscow Region, Russian Federation  
<sup>2</sup> JSC "Visom", Turinschina Village, Smolensk Region, Russian Federation

---

### Abstract

The paper introduces a method for determining the frequency response of microphones using a broadband excitation signal. The method is based on time delay spectrometry and uses the recursive filter of the Goertzel algorithm and additional sliding complex weighted averaging under conditions burdened by sound reverberation. A combination of field and pressure measurements was used to minimize the effect of reflections during measurements. Relying on the algorithm, we developed software for post-processing the measurement results when determining the frequency response of microphones in an unmuffled laboratory room. Furthermore, we assembled a research measuring complex and experimentally tested the developed method and software determining the methodical error in the frequency response of microphones using a broadband excitation signal. The developed method and software are recommended for determining the frequency response of measuring microphones by the field in unmuffled reverberating laboratory rooms without auxiliary equipment, such as a damped chamber and a small-volume chamber, provided the practical recommendations given in the research are taken into consideration

### Keywords

*Microphone, method, frequency response, free field, FM signal, graduation, infinite impulse response filter, time delay spectrometry, sliding complex weighted averaging, software*

Received 16.12.2021

Accepted 30.12.2021

© Author(s), 2021

---

### REFERENCES

- [1] IEC 61094-6:2004. Measurement microphones. Part 6. Electrostatic actuators for determination of frequency response. Geneva, IEC Central office, 2004.
- [2] Kuvykin Yu.A., Sokolov I.N., Olkhovskiy A.N. Study on method for determination of frequency response for condenser microphones using frequency-modulated signal. *Vestnik metrologa*, 2021, no. 2, pp. 25–31 (in Russ.).

- [3] Salzano C., Walber C., Nowak M., et al. Acoustic methods of microphone calibration. *ICV22*, 2015, pp. 103–109.
- [4] IEC 61094-8:2012. Measurement microphones. Part 8. Methods for determining the free-field sensitivity of working standard microphones by comparison. Geneva, IEC Central office, 2012.
- [5] IEC 61094-5:2016. Electroacoustics — measurement microphones. Part 5. Methods for pressure calibration of working standard microphones by comparison. Geneva, IEC Central office, 2016.
- [6] Lavrov R.O., Kuvykin Yu.A. Comparative analysis of techniques of attenuation the acoustic reflections effect at free-field calibration of airborne sound receivers. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport*, 2018, vol. 12, no. 7, pp. 59–62 (in Russ.).
- [7] Barham R., Barrera-Figueroa S., Avison J.E.M. Secondary pressure calibration of measurement microphones. *Metrologia*, 2014, vol. 51, no. 3, pp. 129–138. DOI: <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/3/129>
- [8] Naumov S.S., Knyazeva N.I., Burenkov S.V. [Multifunctional acoustic measurements based on a modified time delay spectrometry method]. *Akusticheskie izmereniya. Metody i sredstva. IV Sessiya Rossiyskogo akusticheskogo obshchestva* [Acoustic measurements. Methods and means. IV Session of the Russian acoustic society]. Moscow, Akust. in-t im. N.N. Andreeva Publ., 1995, pp. 9–14.
- [9] Heyser R. Acoustical measurements by time-delay spectrometry. *JAES*, 1989, vol. 15, pp. 370–382.
- [10] Sysel P., Rajmic P. Goertzel algorithm generalized to non-integer multiples of fundamental frequency. *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, 2012, vol. 2012, art. 56. DOI: <https://doi.org/10.1186/1687-6180-2012-56>.
- [11] Dvorkovich V.P., Dvorkovich A.V. Okonnye funktsii dlya garmonicheskogo analiza signalov [Window functions for harmonic analysis of signals]. Moscow, Teknosfera Publ., 2016.
- [12] Isaev A.E. Tochnaya graduirovka priemnikov zvukovogo davleniya v vodnoy srede v usloviyakh svobodnogo polya [Accurate calibration of sound pressure receivers in water in free-field conditions]. Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2008.
- [13] Isaev A.E., Matveev A.N. Two approaches to the continuous-radiation field calibration of a hydrophone in a nonanechoic water tank. *Meas. Tech.*, 2008, vol. 51, no. 12, pp. 1329–1336.
- [14] Isaev A.E., Nikolaenko A.S., Chernikov I.V. Suppression of reverberation distortions of a receiver signal using the water tank transfer function. *Acoust. Phys.*, 2017, vol. 63, no. 2, pp. 175–184. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771017020075>
- [15] Isaev A.E., Matveev A.N. Use of a complex moving weighted averaging method for receiver nonuniform frequency response restoration. *Acoust. Phys.*, 2010, vol. 56, no. 5, pp. 693–696. DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063771010050155>

**Kuvykin Yu.A.** — Senior Research Fellow, Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defence of Russian Federation (Komarova ul. 13, Mytishi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

**Olkhovskiy A.N.** — Cand. Sc. (Eng.), Senior Research Fellow, Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defence of Russian Federation (Komarova ul. 13, Mytishi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

**Suprunyuk V.V.** — Dr. Sc. (Eng.), Lead Research Fellow, Main Scientific Metrological Center of the Ministry of Defence of Russian Federation (Komarova ul. 13, Mytishi, Moscow Region, 141006 Russian Federation).

**Sokolov I.N.** — Head of the Programming Department, JSC “Visom” (Turinschina village, Smolensk Region, 214510 Russian Federation).

**Please cite this article in English as:**

Kuvykin Yu.A., Olkhovskiy A.N., Suprunyuk V.V., et al. A method for determining frequency response of microphones in unmuffled laboratory room using wideband signal excitement. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2021, no. 4 (137), pp. 169–187 (in Russ.).

DOI: <https://doi.org/10.18698/0236-3933-2021-4-169-187>