

Нелинейный метод измерения амплитудно-частотной характеристики приемника акустических волн

А. М. ГАВРИЛОВ

Южный федеральный университет, Ростов-на-Дону, Россия, e-mail: gavr_am@mail.ru

Разработан безэталонный автоматизированный метод измерения амплитудно-частотной характеристики звукоприемника, основанный на нелинейном взаимодействии двух коллинеарно распространяющихся волн накачки. Использована идентичная зависимость амплитуд волн разностной и суммарной частот от произведения амплитуд волн накачки, изменяющихся при перестройке разностной частоты.

Ключевые слова: амплитудно-частотная характеристика, нелинейное взаимодействие, волны разностной и суммарной частот, волны накачки.

The etalon-free method of amplitude-frequency characteristic of acoustic receiver measurements based on nonlinear interaction of the two pump waves has been developed. The method based on identical dependence of the difference and summary frequency waves amplitudes from the pump waves amplitudes product changing with difference frequency tuning is realized in automatic mode.

Key words: amplitude-frequency characteristic, nonlinear interaction, difference and summary frequency waves, pump.

Одним из перспективных направлений современного развития ультразвуковых приборов неразрушающего контроля, медицинской диагностической и гидроакустической аппаратуры является использование широкополосных (сложных) сигналов. Это могут быть сигналы, модулированные по амплитуде, фазе и частоте, шумоподобные сигналы, а также радиоимпульсы с линейным (ЛЧМ-сигналы) и нелинейным законами внутриимпульсной частотной модуляции. После соответствующей обработки эхосигналы позволяют значительно расширить объем и улучшить качество получаемой информации, увеличить дальность действия, разрешающую способность, отношение сигнал—помеха при приеме [1].

На всех этапах передачи и распространения сигнала нарушения его структуры (изменения амплитудного и фазового спектров) существенно затрудняют и часто делают невозможным решение поставленной задачи. Так, в частности, при корреляционной обработке ЛЧМ-сигналов предполагается, что форма излученного, принятого и эталонного сигналов совпадают. В противном случае полезный эффект от использования сложных сигналов резко снижается [2], а иногда регистрация таких сигналов невозможна из-за отсутствия отклика на выходе согласованного фильтра, даже если на входе системы обработки отношение сигнал—помеха значительно больше единицы [3].

Заметим, что сигналы могут существенно искажаться уже в аппаратуре, начиная с этапа излучения и заканчивая приемом эхосигналов. Причины появления линейных искажений обусловлены частотно-зависимой функцией передачи электрического, электроакустического и акустического трактов аппаратуры. Многие из этих причин невозможно исключить из-за объективных технических и физических ограничений, например резонансного характера электромеханического преобразования в гидроакустических антеннах и ультразвуковых преобразователях дефектоскопов, частотно-зависимого характера дифракционных процессов при излучении и приеме волн и т. д.

Для исключения нежелательных последствий в работе аппаратуры необходимо корректировать (вводить предыскажения) спектр подаваемого на излучатель электрического сигнала либо учитывать искажения при обработке принятого эхосигнала. В обоих случаях требуется знать амплитудно- (АЧХ) и фазочастотную (ФЧХ) характеристики излучающего и приемного трактов, в формировании которых участвуют частотно-зависимые цепи электрического тракта, электроакустический преобразователь и дифракционные процессы, сопровождающие распространение излученной волны [4].

Существующие подходы к измерению АЧХ и ФЧХ приемно-излучающего тракта ультразвуковой и гидроакустической аппаратуры предполагают использование градуированных приемников и излучателей, что является самостоятельной проблемой из-за отсутствия надежных прямых методов их градуировки [4, 6]. Применение метода взаимности (само-взаимности) возможно лишь в условиях, приближенных к идеальным случаям плоской или сферической волн, принятие которых сопряжено с большими погрешностями из-за неучета дифракционных искажений. Данный метод также зависит от нестабильности рабочей частоты, погрешностей определения скорости звука в среде, расстояния между излучателем и приемником и т. д.

Большая трудоемкость известных методов препятствует их автоматизации, а высокая стоимость выполнения измерений сводит их к минимуму. В сложившейся ситуации многие авторы вынужденно считают, что для оценки вида АЧХ и ФЧХ можно ограничиться 10—15 точками в рабочем диапазоне частот [5, 6]. При использовании сложных сигналов приближенную оценку указанных характеристик нельзя считать оправданной из-за многорезонансного характера механических колебаний в антенне и паразитных резонансов электрических цепей, присутствие и влияние которых может оказаться неучтенным.

В связи с этим актуальна разработка новых методов измерений АЧХ и ФЧХ, которые:

не требуют для проведения измерений градуированных приемников и излучателей;

не зависят от нестабильности частоты сигнала, погрешности определения скорости звука и местоположения приемника;

позволяют автоматизировать процесс измерений и выполнять их с выбранным шагом по частоте, получать сколько угодно много точек в рабочей области частот, исключать ошибки и промахи, связанные с квалификацией оператора;

обеспечивают получение сквозных АЧХ и ФЧХ, учитывающих суммарные искажения сигнала в электрических цепях, при электромеханическом преобразовании и распространении (дифракции) волн.

Измерительные технологии нелинейной акустики. Бурное развитие нелинейной акустики во второй половине XX в. привело к созданию целого ряда методов градуировки и измерений АЧХ звукоприемников, предназначенных для работы в жидких, твердых и газовых средах [7—13]. Преимущество этих методов — широкий диапазон охватываемых частот (от единиц герц до десятков мегагерц), использование области среды, в которой распространяются и взаимодействуют волны, в качестве нелинейных излучателей и приемников звука, сокращение времени, затрачиваемого на измерения, возможность определения абсолютной чувствительности, простота технической реализации и др.

Нелинейность среды распространения волн обеспечивает уникальную возможность создания и использования в акустических измерениях сверхширокополосных источников звука и приемных антенн. Существующие методы различаются типом используемого нелинейного эффекта, что во многом определяет область их применения. Среди нелинейных эффектов можно выделить каскадную генерацию гармоник монохроматической волной конечной амплитуды [7—9], искажение временного профиля первоначально синусоидальной волны [12], фазовую модуляцию высокочастотной волны слабой низкочастотной волной [10, 11], взаимодействие двух высокочастотных волн близких частот, генерирующих в среде волну разностной частоты (ВРЧ) [13] и др.

Первые две группы методов позволяют градуировать приемники, начиная от сотен килогерц до десятков мегагерц, а две последние обеспечивают измерения в низкочастотной области — от инфразвуковых частот до сотен килогерц, что, по существу, перекрывает весь диапазон используемых на практике частот.

Растущая потребность в широкополосных низкочастотных звукоприемниках привела к созданию для их градуировки серии измерительных приборов, основанных на нелинейных эффектах в акустических волнах. Это нелинейные акустические излучатели (НАИ), использующие уникальные свойства ВРЧ — высокую направленность низкочастотного излучения, отсутствие боковых лепестков и постоянство ширины характеристики направленности в широком диапазоне частот [13].

Благодаря отмеченным достоинствам и простоте технической реализации данный подход продолжает привлекать к себе внимание. Однако последние 30 лет его развитие сдерживалось необходимостью предварительных измерений поля ВРЧ НАИ, для проведения которых, в свою очередь, требуются эталонные звукоприемники с известными АЧХ и ФЧХ.

Сочетание преимуществ нелинейных методов с отказом от применения эталонных приемников и излучателей звука способно значительно удешевить, сделав доступными измерения АЧХ и ФЧХ приемно-излучающего тракта ультразвуковых дефектоскопов, медицинских эхоимпульсных томографов, гидролокаторов. Этому способствует широкополосность нелинейных процессов для акустических волн в средах без дисперсии, высокая степень изученности теоретических и экспериментальных аспектов нелинейной акустики, отсутствие необходимости в эталонных средах благодаря нелинейным свойствам самой среды, простота автоматизации измерений.

Сравнительно невысокий коэффициент полезного действия нелинейных процессов (менее 1 %) не ограничивает их использование в измерительных задачах, где расстояния между излучателем и приемником не превышают нескольких метров. Благодаря этому отношение сигнал—шум при измерениях нелинейно генерируемых волн, как правило, не опускается ниже 40—60 дБ.

Физические предпосылки метода. В рассматриваемом методе измерения АЧХ звукоприемника (приемного тракта) предлагается в течение всего цикла измерений градуируемым приемником одновременно регистрировать амплитуды ВРЧ $p_{2\Omega}$ и волны суммарной частоты (ВСЧ) $p_{2\omega_0}$, кото-

рые образуются в результате нелинейного взаимодействия двух волн накачки с близкими частотами ω_H , ω_B (ниже и выше ω_0) в среде между излучателем и приемником. Предпочтительно приемник располагать на акустической оси излучателя в области дифракции Фраунгофера волн накачки, где пространственные распределения амплитуд ВРЧ и ВСЧ являются монотонными функциями координат и не испытывают интерференционных осцилляций.

Физические предпосылки метода проследим на примере выражений, описывающих поля этих волн. Для амплитуд ВРЧ $2\Omega = \omega_B - \omega_H$ и ВСЧ $\omega_H + \omega_B = 2\omega_0$ справедливы выражения [13]:

$$p_{2\Omega}(r, x) = \frac{\varepsilon \Omega p_H p_B}{\rho_0 c_0^3} \exp(-\alpha_{2\Omega} x) L_{2\Omega}(r, x) \cos \times (2\Omega t - k_{2\Omega} x + \varphi_B - \varphi_H + \varphi_{2\Omega}), \quad (1)$$

$$p_{2\omega_0}(r, x) = \frac{\omega_0 \varepsilon p_H p_B}{\rho_0 c_0^3} \exp(-\alpha_{2\omega_0} x) L_{2\omega_0}(r, x) \cos \times (2\omega_0 t - k_{2\omega_0} x + \varphi_B + \varphi_H + \varphi_{2\omega_0}), \quad (2)$$

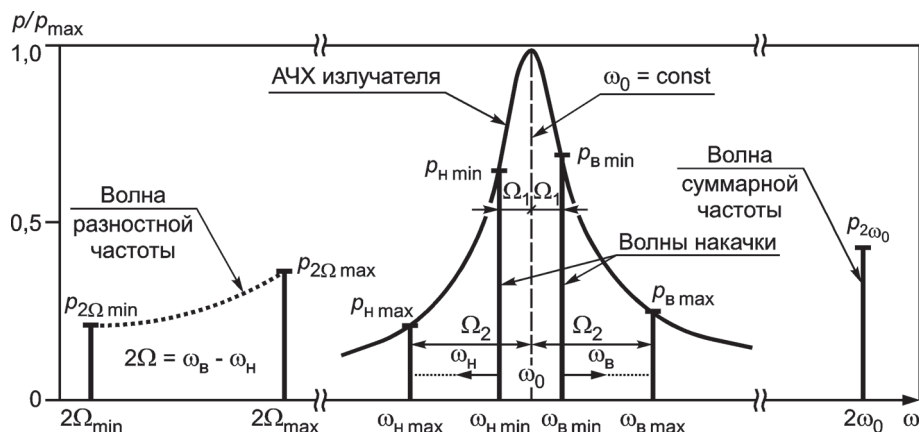


Рис. 1. Физические принципы измерений АЧХ звукоприемника

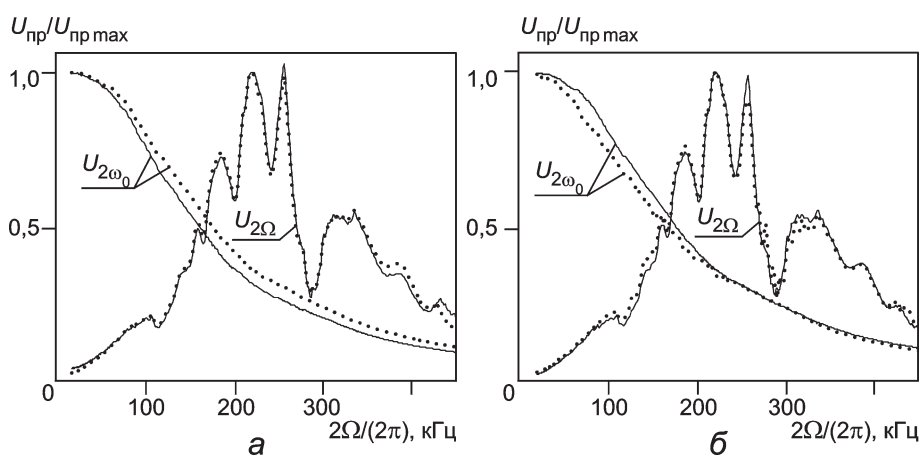


Рис. 2. Экспериментальные зависимости амплитуд ВСЧ ($U_{2\omega_0}$) и ВРЧ ($U_{2\Omega}$) на выходе приемника при разных амплитудах накачки (а) и расстояниях от излучателя (б)

где p_n, p_b — звуковые давления волн накачки, излучаемых в среду на частотах ω_n, ω_b ; ϵ, ρ_0, c_0 — параметр нелинейности, плотность среды и скорость звука в ней, соответственно;

$k_{2\Omega} = 2\Omega/c_0, k_{2\omega_0} = 2\omega_0/c_0$ — волновые числа ВРЧ и ВСЧ; $\varphi_n,$

φ_b — начальные фазы волн накачки; $\varphi_{2\Omega}, \varphi_{2\omega_0}, \alpha_{2\Omega}, \alpha_{2\omega_0}$ — дифракционные набеги фаз и коэффициенты поглощения ВРЧ и ВСЧ; $L_{2\Omega}(r, x), L_{2\omega_0}(r, x)$ — пространственные множители, учитывающие дифракцию и диссипацию волн накачки, а также дифракцию ВРЧ и ВСЧ; t — время; r, x — поперечная и продольная (осевая) координаты звукового поля.

Необходимым условием реализации метода является постоянство средней частоты накачки $\omega_0 = (\omega_n + \omega_b)/2 = \text{const}$ в процессе перестройки разностной частоты. Это требование обеспечивалось синхронным смещением частот ω_n, ω_b в противоположных направлениях относительно фиксированной средней частоты ω_0 спектра накачки. В эксперименте частоту ω_0 совмещали с резонансной частотой ($\omega_0 = \omega_p$) излучателя волн накачки (рис. 1). Это позволило обеспечить наибольшую эффективность излучения бигармонической накачки излучающим трактом измерительной установки. Частоты ω_0, ω_p могут не совпадать, что, однако, не влияет на результаты измерений.

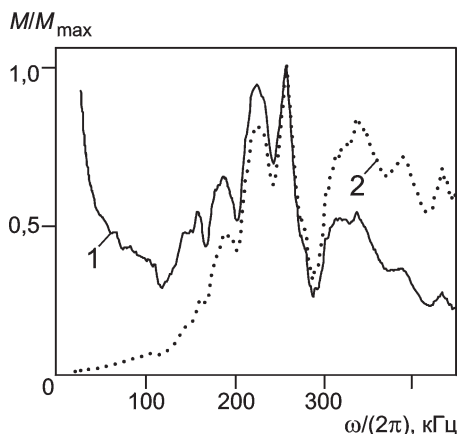


Рис. 3. Экспериментальные АЧХ звукоприемника с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) пространственного множителя

Небольшие изменения частот ω_n, ω_b в пределах резонансной области излучателя позволяют охватить широкий диапазон разностных частот $2\Omega_{\min} - 2\Omega_{\max}$ (декада и более), в котором измеряется АЧХ приемника. Минимальное значение разностной частоты ограничивается лишь возможностями измерительной установки — размерами измерительного бассейна и чувствительностью приемного тракта. Максимальное значение разностной частоты не должно нарушать условие узкополосности сигнала накачки, т. е. $2\Omega \ll \omega_0$, обеспечивающего равенство вкладов дифракции и диссипации для обеих первичных волн. На практике диапазон изменений разностной частоты нелинейного излучателя звука весьма широк, его характеризуют интервалом значений частотного параметра $\Phi = \omega_0/2\Omega \approx 5 \dots 1000$ [13].

Наряду с общей структурой приведенных выражений (1), (2) отметим важную особенность используемых вторичных волн: амплитуды ВРЧ и ВСЧ зависят от произведения $p_n p_b$, которое в процессе перестройки частоты 2Ω в равной степени влияет на амплитуды указанных волн (см. рис. 1). Градуированный приемник регистрирует обе эти волны, электрические сигналы которых разделяются избирательными фильтрами. Благодаря постоянству частоты ($2\omega_0 = \text{const}$) волна суммарной частоты при любых значениях 2Ω принимается приемником с неизменной чувствительностью $M_{2\omega_0}$.

Здесь сигнал ВСЧ выступает в роли своеобразного опорного, отслеживающего любые изменения амплитуд волн накачки, влияющие на произведение $p_n p_b$. Отмечаемые изменения обусловлены, главным образом, влиянием АЧХ излучателя накачки. Вследствие такого подхода можно отказаться от дорогостоящих измерительных излучателей с известной передаточной характеристикой, являющихся элементом традиционных методов [5].

Используя (1) и (2), несложно показать, что на выходе приемника отношение амплитуд напряжений разностной и суммарной частот можно представить в виде

$$U_{2\Omega}/U_{2\omega_0} = [M_{2\Omega}\Omega L_{2\Omega}(x, r)]/[M_{2\omega_0}\omega_0 L_{2\omega_0}(x, r)], \quad (3)$$

где $M_{2\Omega}, M_{2\omega_0}, U_{2\Omega}, U_{2\omega_0}$ — чувствительности и электрические напряжения на выходе звукоприемника на разностной и суммарной частотах.

Из (3) получим выражение для АЧХ звукоприемника в области разностных частот ($2\Omega_{\min} \dots 2\Omega_{\max}$):

$$M = M_{2\Omega} = M_{2\omega_0} [U_{2\Omega}\omega_0 L_{2\omega_0}(x, r)/(U_{2\omega_0}\Omega L_{2\Omega}(x, r))], \quad (4)$$

где соблюдаются условия $M_{2\omega_0} = \text{const}$ и $2\omega_0 = \text{const}$.

Результаты экспериментальной проверки метода. Согласно (4) для определения АЧХ звукоприемника достаточно в процессе перестройки разностной частоты 2Ω непрерывно измерять отношение напряжений $U_{2\Omega}/U_{2\omega_0}$ принятых приемником ВРЧ и ВСЧ, а также коэффициент сниже-

ния по частоте $\Phi = \omega_0 / (2\Omega)$. Перестройка частоты 2Ω осуществляется формирователем сигнала в излучающем тракте измерительной установки. Обе эти измерительные процедуры не представляют сложности при технической реализации и выполняются с высокой точностью стандартной измерительной аппаратурой.

На рис. 2, а приведены измеренные зависимости амплитуд ВРЧ и ВСЧ от частоты 2Ω , полученные при разных напряжениях сигнала накачки на излучателе, с учетом амплитудно-зависимого характера поля вторичных волн нелинейного излучателя. Условия проведения эксперимента ($U_H = U_B = 10$ и 20 В) соответствуют начальным ($x = 0$) значениям акустического числа Рейнольдса волн накачки

$Re_0 = \rho_0 \omega_0 / (2\pi c^3 \alpha_{\omega_0}) = 4,3$ и $8,6$. Из приведенных зависимостей следует, что для $Re_0 \leq 10$ характер частотных зависимостей амплитуд ВРЧ и ВСЧ достаточно хорошо сохраняется, что позволяет исключить из рассмотрения влияние амплитуд волн накачки на измеряемую АЧХ. Результаты измерений получены на акустической оси излучателя ($r = 0$) в дальней области дифракции волн накачки на расстоянии $x = 5l_d = 42,5$ см, где $l_d = 85$ мм характеризует измеренную длину области дифракции Френеля пучка на частоте $\omega_0 / (2\pi) = 1,4$ МГц. Каждая из полученных кривых содержит 2—4 тыс. точек. Измерения выполняли с использованием разработанной автоматизированной установки на базе персонального компьютера.

Градуируемым звукоприемником служил специальный изготовленный миниатюрный гидрофон с чувствительным элементом в виде тонкостенного пьезокерамического цилиндра 3×3 мм. Функции излучателя накачки выполнял поршневой пьезокерамический преобразователь, диаметр его рабочей поверхности 18 мм, резонансная частота $\omega_p / (2\pi) = 1400$ кГц, добротность $Q \approx 9$ при использовании воды в качестве нагрузки. Измерения выполняли в импульсном режиме излучения с последующим временным стробированием принятого сигнала.

На рис. 2, б приведены экспериментальные зависимости амплитуд ВРЧ и ВСЧ от частоты, полученные на разных расстояниях между излучателем и приемником $x = 42,5$ и 85 см при $U_H = U_B = 10$ В. Расхождение зависимостей обусловлено продолжающимися в дальней области пучка накачки процессами генерации вторичных волн. Поскольку в области сферического расхождения первичных волн эти процессы достаточно быстро ослабевают [13, 14], то их влияние оказывается незначительным и на практике может не приниматься во внимание.

Основную трудность при нахождении АЧХ градуируемого приемника представляет определение пространственных множителей $L_{2\Omega}(x, r)$ и $L_{2\omega_0}(x, r)$, характеризующих поле ВРЧ и ВСЧ. Отметим, что $L_{2\omega_0}(x, r)$ слабо зависит от частоты 2Ω , поскольку суммарная частота $2\omega_0$ и размер излучателя не изменяются в процессе измерений. При $\Phi > 10$ влиянием частоты 2Ω на форму характеристики $L_{2\omega_0}(x, r)$ можно пренебречь. Пространственные распределения амплитуд ВРЧ и ВСЧ рассчитывали с использованием известных решений уравнения Хохлова—Заболотской—Кузнецова для нелинейного излучателя с бигармонической волной накачки [13]. Ожидаемая погрешность измерений с учетом расчетной модели НАИ не превышала 10 %.

На рис. 3 представлены результаты, полученные на разных этапах расчета АЧХ приемника по измеренным зави-

симостям $U_{2\Omega}(2\Omega)$, $U_{2\omega_0}(2\Omega)$, с учетом влияния множителя

$L_{2\omega_0}(x, r) / L_{2\Omega}(x, r)$ при следующих условиях: $r = 0$; $x = 42,5$ см, $U_H = U_B = 10$ В, $\omega_0 / (2\pi) = 1,4$ МГц.

Изрезанный вид полученной характеристики в исследуемой полосе частот обусловлен влиянием радиальных и изгибных мод колебаний пьезоэлемента, паразитными резонансами конструкции акустического узла приемника. Технические характеристики, элементы построения и особенности работы автоматизированной измерительной установки рассмотрены в [15, 16].

Выводы. Предложенный метод измерения АЧХ звукоприемника (приемного тракта) позволил отказаться от использования градуированных приемников и процедуры предварительного исследования вспомогательного излучателя, исключить зависимость проводимых измерений от АЧХ этого излучателя. Простота технической реализации метода дает возможность полностью автоматизировать все измерительные операции. Метод является дальнейшим развитием измерительных приборов типа НАИ по пути расширения их функциональных возможностей и идеи использования нелинейных акустических эффектов в измерительных задачах.

Работа поддержана ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.» (контракт № 14.А18.21.0680).

Л и т е р а т у р а

1. Ширман Я. Д., Манжос В. Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и связь, 1981.
2. Долотов С. А. и др. Применение низкочастотного эхолота-профилографа с многоэлементной излучающей антенной и широкополосным ЛЧМ зондирующим сигналом для исследования морского дна // Известия ТРТУ. Таганрог. 2004. № 5 (40). С. 273—279.
3. Тимошенков В. Г. Разрушение структуры шумоподобного сигнала при его распространении в многолучевом канале при фиксированном положении излучателя и приемника. Акустика океана // Сб. тр. XV сессии Рос. акуст. об-ва. Т. 2. М.: ГЕОС, 2004. С. 144—147.
4. Подводные электроакустические преобразователи. Справочник / Под ред. В. В. Богородского. Л.: Судостроение, 1983.
5. Колесников А. Е. Акустические измерения. Л.: Судостроение, 1983.
6. Гитис Ю. А., Степанов М. А. Экспериментальное исследование фазовых характеристик чувствительности измерительных гидрофонов. Прикладная акустика. Таганрог: ТРТИ, 1987. Вып. XII. С. 92—98.
7. А. с. 119025 СССР. Способ определения частотных и фазовых характеристик приемников ультразвука / Е. В. Романенко // Бюл. изобрет. 1959. № 7.
8. А. с. 157619 СССР. Способ градуировки акустических преобразователей / Е. В. Романенко, К. А. Наугольных // Бюл. изобрет. 1963.
9. Bacon D. R. A new method for ultrasonic hydrophone calibration // Ultrasonic Symp. Proc. SanDiego (USA), 1982. V. 2. P. 700—704.
10. Зверев В. А., Калачев А. И. Модуляция звука звуком при пересечении акустических волн // Акустический журнал. 1970. Т. 16. № 2. С. 245—251.

11. Калачев А. И., Кондрашов Н. А. Измерение колебательной скорости частиц воздуха параметрическим методом // Сб. тр. науч.-техн. конф. Проблемы нелинейной акустодиагностики: Таллин, 1986. С. 133—136.

12. Андреев В. Г., Карабутов А. А., Руденко О. В. Метод калибровки широкополосных гидрофонов в ультразвуковых пучках конечной амплитуды // Вестник МГУ. Физика. Астрономия. 1984. Т. 25. № 4. С. 74—77.

13. Новиков Б. К., Руденко О. В., Тимошенко В. И. Нелинейная гидроакустика. Л.: Судостроение, 1981.

14. Руденко О. В., Солуян С. И. Теоретические основы нелинейной акустики. М.: Наука, 1975.

15. Гаврилов А. М., Медведев В. Ю., Батрин А. К. Автоматизация лабораторных измерений частотных характеристик пьезоэлементов и пьезопреобразователей // Изв. вузов. Юбилейный выпуск. Северо-Кавказский регион. 2002. С. 82—87.

16. Батрин А. К., Гаврилов А. М., Ситников Р. О. Установка для исследования нелинейного взаимодействия акустических волн // Изв. ТРТУ. Медицинские информационные системы. Таганрог. 2006. № 11 (66). С. 167—173.

Дата принятия 07.03.2014 г.

ИЗМЕРЕНИЯ ИОНИЗИРУЮЩИХ ИЗЛУЧЕНИЙ

53.08

Передача единицы эквивалентной равновесной объемной активности радона

П. И. СОЛОДСКИХ

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Россия, Москва, lab421@rambler.ru

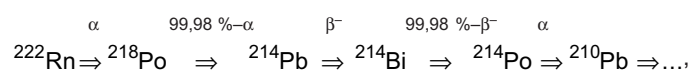
Предложен способ передачи единицы эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) в Большой радоновой камере ВНИИФТРИ средствами измерений с использованием математической модели, симулирующей процессы осаждения и распада естественных радиоактивных аэрозолей на аэрозольном фильтре. Разработана модель, которая учитывает все метрологические и технические параметры, влияющие на результат измерения. Проведена оценка неопределенностей, обсужден вопрос о применимости данной модели для передачи единицы ЭРОА дочерних продуктов распада торона соответствующим средствам измерений.

Ключевые слова: эквивалентная равновесная объемная активность, радон, торон, метрологическое обеспечение, калибровка, метод Монте-Карло, Большая радоновая камера, радиоактивные аэрозоли.

Potential alpha energy concentration (PAEC) radiometers calibration technique using radon progeny deposition model is considered. Calibrations are performed into the Russian Radon Reference Chamber (Big Radon Chamber). The developed model takes into account all the metrological and technical parameters affecting the measurements results. Approximate values of typical PAEC radiometer calibration uncertainty are given. Developed model applicability for Thoron progeny measurements is considered.

Key words: potential alpha energy concentration, Radon, Thoron, metrological assurances, calibration, Monte-Carlo method, Russian Big Radon Chamber, radioactive aerosols.

Проблема передачи единицы эквивалентной равновесной объемной активности (ЭРОА) заключается в воспроизведении среды с ее известным значением. Воспроизведение такой эталонной среды включает создание радоновой атмосферы, в которой объемная активность радона известна либо измеряется соответствующими средствами измерений (СИ). Радон, в свою очередь, распадается по следующей цепочке:



где ${}^{210}\text{Pb}$ имеет период полураспада $(22,20 \pm 0,22)$ года [1], поэтому не успевает накопиться при измерениях длительностью порядка суток или месяцев, а ${}^{214}\text{Po}$ (RaC') имеет период полураспада $(164,3 \pm 2,0)$ мкс [1], вследствие чего его активность всегда равна активности ${}^{214}\text{Bi}$. Таким образом, радионуклиды RaC и RaC' рассматриваются как один радионуклид RaC . Все дочерние продукты распада (ДПР) радона, включая ${}^{210}\text{Pb}$, являются металлами и захватываются аэрозолями в воздухе. Такие аэрозоли называются естественными радиоактивными аэрозолями (ЕРА). ЭРОА выражается через объемную активность ЕРА следующим образом: