

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Тимошенко (Лупандина) М.А. Диффузионный поток при осаждении наноаэрозолей в звуковом поле // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2011. – № 9 (122). – С. 206-211.
2. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чердиченко Д.И. Исследования влияния чатиц сигаретного дыма на дыхательные пути человека // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 5 (82). – С. 221-224.
3. Тимошенко (Лупандина) М.А., Чернов Н.Н. Дисперсное распределение аэрозольных наночастиц сигаретного дыма при курении // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 5 (82). – С. 224-226.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор В.И. Короченцев.

Лупандина Мария Алексеевна – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: timoshenkomaria@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44, ГСП 17А; тел.: 88634371795; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; к.т.н.

Тимошенко Владимир Иванович – e-mail: ega@fep.tti.ru; кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Чернов Николай Николаевич – кафедра электрогидроакустической и медицинской техники; д.т.н.; профессор.

Lupandina Maria Alekseevna – Taganrog Institute of Technology – Federal State-Owned Autonomy Educational Establishment of Higher Vocational Education “Southern Federal University”; e-mail: timoshenkomaria@mail.ru; GSP 17A, 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371795; the department of hydroacoustic and medical engineering; cand. of eng. sc.

Timoshenko Vladimir Ivanovich – e-mail: ega@fep.tti.ru; the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

Chernov Nikolay Nikolaevich – the department of hydroacoustic and medical engineering; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.396

Б.А. Сальников, Е.Н. Сальникова

СИНТЕЗ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ АНТЕНН С ОГРАНИЧЕННОЙ РЕАКТИВНОСТЬЮ

Рассмотрен метод решения задач синтеза ультразвуковых антенн с ограниченной реактивностью. Предложено меру реактивности ультразвуковых антенн оценивать с помощью функции локальной добротности и интегральной оценки локальной добротности. Такой подход даёт возможность оптимизировать геометрию излучающих участков на поверхности антенн с учётом ограничений на реактивность и точность реализации заданных диаграмм направленности. Введенные определения энергетической эффективности антенн являются более чувствительными и позволяют осознанно выбирать область расположения излучающих участков при решении задачи синтеза с ограниченной реактивностью, не прибегая к вариационным методам.

Синтез антенн; локальная добротность; оптимизационный синтез.

B.A. Salmnikov, E.N. Salmnikova

SYNTHESIS OF ULTRASONIC ANTENNAS WITH RESTRICTED REACTIVITY

The method of resolving synthesis tasks of ultrasonic antennas with restricted reactivity is considered. It has been proposed to estimate measure of ultrasonic antennas reactivity using function of local quality factor and integral estimation of local quality factor. Such way of getting es-

timations makes it possible to optimize geometry of emitting areas on antennas' surfaces taking into account restrictions of reactivity and accuracy of implementing given radiation patterns. Introduced definitions of antennas energy effectiveness are more sensitive and make it possible to purposefully set locations of emitting areas during resolving tasks of synthesis with restricted reactivity without using variation methods.

Antennas synthesis; local Q factor; optimization synthesis.

В классической теории синтеза и оптимизации ультразвуковых антенн используются интегральные оценки их энергетических характеристик: импеданс излучения Z_s , активная составляющая которого пропорциональна излучаемой мощности в дальнюю зону, реактивная – реактивной мощности антенны, информация о которой позволяет судить о добротности антенны

$$Z_s = 2W_s |V_{cp}|^{-2}, \quad (1)$$

где $W_s = W_{акт}$ и $W_{реакт}$ соответственно полная, активная и реактивная мощность на излучающей поверхности антенны, $|V_{cp}|$ – модуль усредненной колебательной скорости на излучающей поверхности антенны, либо колебательная скорость точки приведения [1]. Здесь и далее под термином «колебательная скорость» понимается её нормальная составляющая.

Добротность в антенной технике принято определять через отношение реактивной мощности к активной в ближней зоне антенны либо на ее поверхности

$$Q = W_{реакт} / W_{акт}. \quad (2)$$

Для решения задач синтеза антенн с ограниченной реактивностью предложено использовать определение импеданса излучения в виде отношения давления к нормальной составляющей колебательной скорости на излучающей поверхности [2]:

$$Z(s) = P(s)/V(s) = r(s) + ix(s) \quad (3)$$

Преимущество такого подхода заключается в следующем: импеданс излучения является функцией координат поверхности антенны, отрицательная часть активной составляющей сопротивления излучения дает возможность определить поглощающие участки на излучающей поверхности, если такие существуют.

Таким образом, при оценке энергетической эффективности мы подошли к решению задач оптимизационного синтеза. Такие задачи, в отличие от общих задач синтеза, могут иметь множество решений, оптимизирующих те или иные характеристики антенны. В данном случае речь идет об оптимизации среднеквадратичной погрешности отклонения заданной диаграммы направленности от реализуемой и реактивности антенны.

Вариационные методы решения задач оптимизационного синтеза, использующие интегральные оценки, не объясняют физическую сущность получаемого решения. Нами предлагается оценивать реактивность решения в два этапа, используя несколько иные энергетические критерии. На первом этапе для учета вклада каждого участка излучающей поверхности в формирование дальнего поля антенны предпочтительнее рассматривать не интегральную характеристику распределения интенсивности на поверхности антенны, а дифференциальную вида

$$G(s) = |\text{Im}\{I(s)\}/\text{Re}\{I(s)\}|, \quad (4)$$

где $G(s)$ – локальная добротность, $\text{Im}\{I(s)\}$, $\text{Re}\{I(s)\}$ – соответственно мнимая и реальная части интенсивности поля на излучающей поверхности антенны.

Используя связь между $P(s)$, $V(s)$, $I(s)$, $Z(s)$, (4) запишется в виде

$$G(s) = |x(s)/r(s)|. \quad (5)$$

Оценка энергетических свойств антенн при помощи (5) позволяет судить об эффективности каждого отдельного участка излучающей поверхности, что невозможно сделать, используя (2).

Для сравнительной оценки различных антенн по энергетическим свойствам предложено использовать интегральную оценку локальной добротности L , определяемую как

$$L = \int_s G(s) ds. \quad (6)$$

Для иллюстрации предложенной оценки реактивности антенн были решены задачи синтеза цилиндрических антенн волнового размера $ka = 20$ для однолепестковых диаграмм направленности типа секторной, косинусоидальной, параболической и степенной, степени 4 аппроксимационным методом [3]. Полуширина главного максимума на уровне -3 дБ каждой диаграммы равна 10 градусам.

Численный эксперимент показал, что для секторной и степенной диаграмм направленности наибольшей реактивностью обладают участки излучающей поверхности с углами раскрытия в апертуре около 60° . Для всех исследованных типов диаграмм направленности повышенными значениями локальной реактивности обладают участки с углами раскрытия в апертуре более 70° , а минимальными значениями интегральной оценки локальной добротности при минимальной среднеквадратичной погрешности отклонения заданной диаграммы направленности от реализуемой обладают антенны, формирующие косинусоидальную и параболическую диаграммы направленности. Результаты исследования зависимости интегральной оценки локальной добротности этих антенн от их волновых размеров представлены в табл. 1 и 2.

При сравнении идентичных диаграмм направленности при одинаковых значениях среднеквадратичных погрешностей отклонения заданной диаграммы направленности от реализуемой интегральная оценка локальной добротности снижается более чем в 10 раз при увеличении волнового радиуса ka в 2 раза (табл. 1). Таким образом, одним из способов уменьшения реактивности является увеличение волнового размера антенны без увеличения количества суммируемых гармоник в решении задачи синтеза.

Косинусоидальная диаграмма обладает меньшей реактивностью при прочих равных условиях (табл. 2).

Таблица 1

Зависимость интегральной оценки локальной добротности от волнового радиуса цилиндрической антенны

Тип диаграммы направленности	Интегральная оценка локальной добротности L и суммарная погрешность δ_Σ			
	$ka=20$		$ka=40$	
	L	$\delta_\Sigma, \%$	L	$\delta_\Sigma, \%$
Косинусоидальная	0,662	0,18	0,047	0,18
Параболическая	0,706	0,30	0,051	0,30

Таблица 2

Сравнение интегральной оценки локальной добротности при постоянной среднеквадратичной погрешности отклонения заданной диаграммы направленности от реализуемой

Тип диаграммы направленности	Интегральная оценка локальной добротности L и суммарная погрешность δ_Σ			
	$ka=20$		$ka=40$	
	L	$\delta_\Sigma, \%$	L	$\delta_\Sigma, \%$
Косинусоидальная	0,341	0,3	0,032	0,3
Параболическая	0,706	0,3	0,051	0,3

Предложенные энергетические оценки дают возможность определить границы участков на излучающей поверхности антенны, вносящие наибольший вклад в реактивную составляющую ближнего поля. Численные эксперименты показали, что простейшими способами уменьшения реактивности являются подбор типа диаграммы направленности и увеличение волнового размера антенны при фиксированном количестве суммируемых гармоник в решении задачи синтеза.

Наименьшей реактивностью обладают антенны, у которых распределение функции возбуждения на поверхности цилиндра постоянно. В этой связи целесообразно полученные значения интегральной оценки локальной добротности сопоставить со значениями для пульсирующего цилиндра аналогичного волнового радиуса. Интегральная оценка локальной добротности пульсирующего цилиндра численно равна его локальной добротности и совпадает со значением, полученным по классической формуле (2).

Один из самых простых способов снижения реактивности антенной системы – это замена участков излучающей поверхности, на которых локальная добротность превышает некоторую наперед заданную величину, на абсолютно жесткий экран, при этом на остальной части поверхности функция возбуждения остается прежней. Последовательная замена реактивных участков акустически жестким экраном по существу является решением оптимизационной задачи синтеза методом перебора и проводится до тех пор, пока погрешность отклонения реализуемой диаграммы направленности от заданной не превысит требуемую величину или реактивность решения не достигнет заданной. Более строгий метод решения оптимизационного синтеза заключается в том, что для участка поверхности антенны, на котором реактивность превышает заданную величину, вновь решается задача синтеза, которая сводится к решению интегрального уравнения Фредгольма первого рода.

Постановка задачи оптимизационного синтеза цилиндрических антенн с ограниченной реактивностью следующая. Определить функцию возбуждения колебательной скорости $V(a, \varphi_0)$ и область расположения излучающих участков на поверхности цилиндрической антенны минимально возможного волнового радиуса ka , формирующей диаграмму направленности $R(\varphi) \in L_2$ с наперед заданной среднеквадратичной погрешностью $\delta_\Sigma \leq \delta_0$. Локальная добротность полученного решения не должна превышать в β раз локальной добротности пульсирующей антенны аналогичных волновых размеров. Математически эту задачу можно сформулировать следующим образом.

Найти решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода относительно неизвестной функции $V(a, \varphi_0)$:

$$R^*(\varphi) = (1/2\pi) \int_{[\varphi_j]} \sum_{n=-N}^N \frac{(-i)^{n-1} V(a, \varphi_0)}{H_n^{(1)}(ka)} \exp in(\varphi - \varphi_0) d\varphi_0, \quad (7)$$

где $R^*(\varphi) \in B_L$, среднеквадратичная норма $\|R(\varphi) - R^*(\varphi)\| \leq \delta_0$, для локальной добротности $G(a, \varphi_0)$ выполняются следующие ограничения: $G(a, \varphi_0) \leq \beta G_0(a)$, где $\beta > 1$, $G(a, \varphi_0) = |\operatorname{Im}\{Z(a, \varphi_0)\}| / |\operatorname{Re}\{Z(a, \varphi_0)\}|$, $Z(a, \varphi_0) = P(a, \varphi_0)/V(a, \varphi_0)$ – локальный импеданс для найденного решения, $G(a) = |\operatorname{Im}\{Z(a)\}| / |\operatorname{Re}\{Z(a)\}|$, $Z(a)$ – импеданс излучения пульсирующего цилиндра аналогичного волнового размера, φ_0 – координата, принадлежащая излучающей поверхности.

Решение сформулированной задачи разбивается на два этапа. На первом этапе, исходя из заданной среднеквадратичной погрешности, решается общая задача синтеза по алгоритму, изложенному в [3].

Далее согласно принятой терминологии определяются энергетические характеристики полученного решения для непрерывной функции колебательной скорости, а именно – локальный импеданс по формуле (3) и распределение локальной добротности по формуле (5). Определяется область поверхности антенны, на которой выполняются заданные условием задачи ограничения на добротность:

$$\varphi_0 \in [\varphi_1], \quad G(a, \varphi_0) \leq \beta G_0(a).$$

Далее задача сводится к решению интегрального уравнения (7) для области $[\varphi_1] = [\varphi_1]$. Для этого в левую часть (7) подставим реализуемую диаграмму направленности ([3]):

$$\sum_{n=-N}^N \frac{A_n \exp(in\varphi)}{\alpha |H_n^{(1)'}(ka)|} = (1/2\pi) \sum_{n=-N}^N \frac{(-i)^{(n-1)} \exp(in\varphi)}{H_n^{(1)'}(ka)} \int_{[\varphi_1]} V_1(a, \varphi_0) \exp(-in\varphi_0) d\varphi_0, \quad (8)$$

приравнявая коэффициенты рядов при одинаковых индексах n , имеем:

$$\alpha^{-1} i^{(n-1)} A_n \exp\{i[\arg H_n^{(1)'}(ka)]\} = (1/2\pi) \int_{[\varphi_1]} V_1(a, \varphi_0) \exp(-in\varphi_0) d\varphi_0. \quad (9)$$

$V_1(a, \varphi_0)$ будем искать в виде

$$V_1(a, \varphi_0) = \begin{cases} V_N(a, \varphi_0), & \varphi_0 \in [\varphi_1] \\ 0, & \varphi_0 \notin [\varphi_1] \end{cases}, \quad (10)$$

где $V_N(a, \varphi_0) = \sum_{m=-N}^N a_m \exp(im\varphi_0)$; подставляя (10) в (9), получаем

$$\alpha^{-1} i^{(n-1)} A_n \exp\{i[\arg H_n^{(1)'}(ka)]\} = (1/2\pi) \sum_{m=-N}^N a_m \int_{[\varphi_1]} \exp i(m-n)\varphi_0 d\varphi_0. \quad (11)$$

Таким образом, решение интегрального уравнения Фредгольма первого рода сводится к решению системы $2N+1$ линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных коэффициентов a_m . Искомая функция распределения колебательной скорости $V_1(a, \varphi_0)$ определится в виде

$$V_1(a, \varphi_0) = \sum_{n=-N}^N \left\{ (1/2\pi) \sum_{m=-N}^N a_m \int_{[\varphi_1]} \exp[i(m-n)\varphi_0] d\varphi_0 \right\} \exp(in\varphi_0). \quad (12)$$

Для вновь найденного распределения колебательной скорости $V_1(a, \varphi_0)$ определяется функция распределения $G_1(a, \varphi_0)$ и область поверхности антенны, на которой выполняются ограничения, наложенные условием задачи на локальную реактивность:

$$\varphi_0 \in [\varphi_2], \quad G_1(a, \varphi_0) \leq \beta G_0(a).$$

Если область $[\varphi_2] = [\varphi_1]$, т.е. локальная добротность не превышает наперед заданной величины на всей излучающей поверхности, возбуждаемой по закону $V_1(a, \varphi_0)$, задача решена.

Если $[\varphi_2] \neq [\varphi_1]$, т.е. величина $G_1(a, \varphi_0)$ удовлетворяет условиям задачи не на всей поверхности $[\varphi_1]$, а только на ее части $[\varphi_2]$ (здесь следует отметить, что $[\varphi_2] < [\varphi_1]$), то нужно снова решать интегральное уравнение (7) по изложенной выше методике, но для области $[\varphi_2]$.

Однако при таком решении задачи нет гарантии, что вновь найденная $V_j(a, \varphi_0)$ будет удовлетворять заданным ограничениям на реактивность.

В этой связи необходимо находить компромисс между ограничением на добротность и величиной погрешности реализации заданной диаграммы направленности, так как в общем случае увеличение количества итераций приводит к уменьшению излучающей зоны на поверхности цилиндрического экрана, а это, в свою очередь, может привести к увеличению локальной добротности.

В качестве компромиссного варианта предлагается ту область излучающей поверхности, где ограничения на реактивность не выполняются, заменить абсолютно жестким экраном, а на остальной части поверхности функцию возбуждения колебательной скорости оставить прежней.

Если полученная погрешность не удовлетворяет разработчика, то снова необходимо решать систему алгебраических уравнений (11) для области $\varphi_0 \in [\varphi_2]$. Вышеизложенный цикл следует повторять до тех пор, пока погрешность решения не станет приемлемой. Если заданной погрешности в процессе решения достичь не удастся, то следует искать компромисс при постановке задачи между реактивностью антенны, ее волновыми размерами и погрешностью реализации заданной диаграммы направленности практически реализуемой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Жуков В.Б. Теория синтеза и оптимизации антенн. – СПб.: Элмор. 2001. – 164 с.
2. Шендеров Е.Л. Волновые задачи гидроакустики. – Л.: Судостроение. 1972. – 352 с.
3. Сальников Б.А., Сальникова Е.Н. Решение задач синтеза ультразвуковых антенн в корректной постановке // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 9 (110). – С. 85-91.

Статью рекомендовала к опубликованию к.ф.-м.н. Н.В. Злобина.

Сальников Борис Александрович – ФГАОУ ВПО Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа, г. Владивосток; e-mail: salnikovb@mail.ru; 690950, Владивосток, ул. Пушкинская, 10; тел.: 89242425100; ведущий научный сотрудник научно-организационного управления; с.н.с.; к.ф.-м.н.

Сальникова Евгения Николаевна – тел.: 89147235843; кафедра приборостроения, к.ф.-м.н.; доцент.

Salnikov Boris Aleksandrovich – The Far Eastern Federal University, Engineering school, Vladivostok; e-mail: salnikovb@mail.ru; 10, Pushkinskaya street, 690950, Vladivostok, Russia; phone: +79242425100; the leading scientific employee of scientific organizational management; the senior scientific employee; cand. of phis.-math. sc.

Salnikova Evgeniya Nikolaevna – phone: +79147235843; the department of instrument engineering; cand. of phis.-math. sc.; associate professor.

УДК 620.179.16

М.И. Сластен

О СЕРИЯХ МНОГОКРАТНЫХ ОТРАЖЕНИЙ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ИМПУЛЬСОВ В ПЛОСКОЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦАХ С МЕХАНИЧЕСКИМИ НАПРЯЖЕНИЯМИ

Предлагается контролировать величину остаточных внутренних механических напряжений в плоскоцилиндрических монокристаллах с особыми физическими свойствами акустическим эхо-методом. Приводится описание предложенной модели напряженного состояния цилиндрического слитка. Изложена проявляющаяся закономерность характера изменения траектории распространения ультразвукового пучка в зависимости от расстояния между центрами слитка и ультразвукового преобразователя поперечных волн. Представлены фотограммы серий многократных отражений ультразвуковых импульсов от плоскопараллельных граней образца. Предложен способ сканирования торцевой поверхности плоскоцилиндрического слитка ультразвуковым преобразователем при контроле распределения в нем остаточных внутренних механических напряжений.

Плоскоцилиндрический образец; остаточные внутренние механические напряжения; модель напряженного состояния; серия эхоимпульсов; способ сканирования.