УДК 534.2

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ АКУСТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧАТЕЛЯ С ПОМОЩЬЮ ПОГЛОЩАЮЩЕГО АКСИКОНА

## А.Е. МАРТИРОСЯН<sup>\*</sup>, А.Г. АРАКЕЛЯН

Акустический научный центр Министерства здравоохранения Армении, Ереван

#### <sup>°</sup>e-mail: arm.acoust@gmail.com

#### (Поступила в редакцию 7 ноября 2014 г.)

Предложена новая методика для определения направления расположения акустического излучателя с использованием поглощающего аксикона и только одного акустического детектора. Проанализированы закономерности дифракции акустических волн на поглощающем аксиконе в области ближнего поля. Показано, что с помощью нахождения центра «ямы» со спадом амплитуды давления в пространственном распределении дифрагированного пучка можно однозначно обнаружить направления местоположений как акустических источников, так и акустических волн, рассеянных на различных субстанциях или на их внутренних областях.

#### 1. Введение

Системы дальнего зондирования местоположения источников акустических волн используются в аудиосистемах летательных аппаратов [1], для обеспечения безопасности подводного пространства [2], для наблюдения за животными [3], в робототехнике [4] и т.д. Важной задачей является определение местоположения крушения авиалайнеров путем регистрации акустических сигналов от так называемых «черных ящиков» [5].

Наиболее распространенным способом определения местоположения акустического излучателя является метод временной задержки детектирования сигнала [6]. Для осуществления этого метода используются несколько распределенных в пространстве акустических датчиков, которые одновременно детектируют один и тот же сигнал от источника акустических волн. Измеряя временную задержку детектирования сигнала различными датчиками, можно определить местоположение акустического источника.

Параметры и местоположение фотоакустического источника ультразвука исследуются в биомедицине [7], в том числе с использованием контрастных агентов для обнаружения новообразований [8]. Фотоакустические методы используются также для обнаружения утечки газа [9].

В последние годы были предложены новые способы определения параметров волновых пучков с помощью поглощающего аксикона. Он позволяет определять ось радиально-симметричных лазерных пучков, создавать строго коллимированные пучки, осуществлять радиальное перераспределение лазерного профиля интенсивности, создавать бубликообразные и М-образные пучки, плавно перестраивать мощность пучка, измерять радиус и расходимость пучка [10-12].

В настоящей работе для обнаружения направления источника акустических пучков в системе регистрации волн используется поглощающий аксикон. Его применение мотивируется тем, что как при нормальном, так и при наклонном падении акустического пучка на поглощающий аксикон в ближнем поле дифракции образуется область «ямы» с минимумом амплитуды давления дифрагированного пучка. В зависимости от угла наклона центр «ямы» отклоняется на характерное расстояние относительно оси аксикона, что позволяет определить этот угол и обнаружить направление акустического излучателя.

### 2. Дифракция акустического пучка на поглощающем аксиконе

На рис.1 представлена схема применения метода для определения направления расположения акустического излучателя с помощью поглощающего аксикона. После прохождения через поглощающий аксикон акустический пучок регистрируется с помощью детектора, который может перемещаться по ортогональным (относительно *z*) направлениям.

Рассмотрим преобразование акустических пучков, распространяющихся в поглощающем аксиконе с волновым сопротивлением, совпадающим с волновым сопротивлением среды, что аннулирует отражение от поверхности аксикона. При нормальном падении акустического пучка с длиной волны λ на аксикон



Рис.1. Схема для определения направления расположения акустического излучателя с помощью поглощающего аксикона: 1 – местоположение акустического излучателя, 2 – поглощающий аксикон с радиусом R и углом у основания  $\beta$ , 3 – акустический детектор, который может перемещаться в плоскости наблюдения по перпендикулярным направлениям вдоль стрелок. Координата z проходит по оси аксикона O, r – расстояние произвольной точки A на поверхности аксикона от его оси.

пропускание аксикона по давлению  $g_{\lambda}(r)$  зависит от расстояния до оси аксикона r:

$$g_{\lambda}(r) = \exp\left(-k \tan\beta(R-r)\right),\tag{1}$$

где k – коэффициент поглощения по давлению акустических волн в аксиконе, R – радиус и  $\beta$  – угол у основания аксикона.

На рис.2 показано геометрическое 3D представление дифракции на поглощающем аксиконе в случае наклонного падения акустического пучка на аксикон, где  $\gamma$  характеризует угол падения пучка относительно нормали (координата z) к поверхности аксикона. Следовательно, давление акустического пучка у поверхности аксикона выражается как  $P = P_0 \cos \gamma$ , где  $P_0$  – давление по направлению распространения пучка. Кроме того, в случае наклонного падения акустического пучка на аксикон уравнение (1) несколько видоизменяется, т.к. в этом случае удлиняется путь прохождения луча в аксиконе. В приближении тонкого аксикона имеем:

$$g_{\lambda}(r) = \exp\left(-\frac{k \tan \beta(R-r)}{\cos \gamma}\right).$$
 (2)

Помимо этого, при наклонном падении изменяется путь акустических лучей до попадания на аксикон. В случае плоской волны, в зависимости от угла наклона  $\gamma$ , длина пути луча характеризуется дополнительным членом –  $r \cos \alpha \sin \gamma$ .

Определим давление дифрагированного акустического пучка в плоскости регистрации в направлении h, которое перпендикулярно z. Направление  $\rho$  на поверхности аксикона параллельно направлению h,  $\alpha$  характеризует полярный



Рис.2. Геометрическое 3D представление дифракции акустического пучка на поглощающем аксиконе: *1* – жирная стрелка характеризует направление пучка, *2* – поверхность поглощающего аксикона, *3* – плоскость регистрации, которая параллельна поверхности аксикона. Сплошные линии лежат в плоскости регистрации или на поверхности аксикона, пунктирные – не лежат на них.

угол произвольной точки A относительно  $\rho$ . В произвольной точке C на линии h давление дифрагированного от точки A акустического пучка определяется интегралом Френеля [13]

$$P_{C} = \frac{P_{0}\cos\gamma}{i\lambda} \int_{S} \frac{f}{AC} \exp\left(-\frac{k\tan\beta(R-r)}{\cos\gamma}\right) \exp\left(\frac{2\pi i}{\lambda} \left(r\cos\alpha\sin\gamma + AC\right)\right) dS, \quad (3)$$

где  $f = \cos \omega - \kappa o \Rightarrow \phi \phi$ ициент наклонного отклонения на угол  $\omega$ ,  $S = rdrd\alpha - эле$ ментарная поверхность около точки A. С помощью тригонометрических соотношений мы можем вычислить расстояние AC:

$$AC = \sqrt{z_0^2 + r^2 + h_0^2 - 2rh_0 \cos\alpha} , \qquad (4)$$

где  $z_0 = OO_1 = AB$ ,  $h_0 = CO_1$  (см. рис.2). Для вычисления коэффициента наклонного отклонения мы должны определить параметры треугольника *ACD*, в котором сторона *AD* соответствует направлению распространения акустического пучка. Согласно элементарным тригонометрическим соотношениям, в треугольнике *BCO*<sub>1</sub>, с учетом того, что линия *BD* параллельна *CO*<sub>1</sub>, имеем:

$$\sin \angle CBD = \sin \angle BCO_1 = \frac{r \sin \alpha}{BC} = \frac{r \sin \alpha}{\sqrt{r^2 + h_0^2 - 2rh_0 \cos \alpha}},$$
  

$$\cos \angle CBD = \sqrt{1 - \sin^2 \angle CBD} = \frac{|h_0 - r \cos \alpha|}{\sqrt{r^2 + h_0^2 - 2rh_0 \cos \alpha}}.$$
(5)

Кроме того, в треугольнике BCD имеет место следующее соотношение:

$$CD^{2} = BC^{2} + BD^{2} - 2BC \times BD \times \cos \angle CBD.$$
 (6)

Исходя из того, что  $BC = \sqrt{r^2 + h_0^2 - 2rh_0 \cos \alpha}$  и  $BD = z_0 \tan \gamma$ , из уравнений (5) и (6) получаем:

$$CD^{2} = r^{2} + h_{0}^{2} - 2rh_{0}\cos\alpha + \frac{z_{0}^{2}\sin^{2}\gamma}{\cos^{2}\gamma} - \frac{2z_{0}\sin\gamma|h_{0} - r\cos\alpha|}{\cos\gamma}.$$
 (7)

С другой стороны, в треугольнике ACD имеет место следующее соотношение:

$$CD^{2} = AC^{2} + AD^{2} - 2AC \times AD \times \cos \omega =$$
  
=  $z_{0}^{2} + r^{2} + h_{0}^{2} - 2rh_{0}\cos\alpha + \frac{z_{0}^{2}}{\cos^{2}\gamma} - \frac{2z_{0}\cos\omega\sqrt{z_{0}^{2} + r^{2} + h_{0}^{2} - 2rh_{0}\cos\alpha}}{\cos\gamma},$  (8)

где учтено, что  $AD = z_0/\cos\gamma$ . Из уравнений (7) и (8) нетрудно определить значение коэффициента наклонного отклонения

$$\cos \omega = \frac{z_0 \cos \gamma + \sin \gamma |h_0 - r \cos \alpha|}{\sqrt{z_0^2 + r^2 + h_0^2 - 2rh_0 \cos \alpha}}.$$
(9)

Принимая во внимание уравнения (4)–(9), интеграл Френеля может быть представлен в виде

$$P_{C} = \frac{P_{0}\cos\gamma}{i\lambda} \int_{0-\pi}^{R+\pi} r \frac{z_{0}\cos\gamma + \left|h_{0} - r\cos\alpha\right|\sin\gamma}{z_{0}^{2} + r^{2} + h_{0}^{2} + 2rh_{0}\cos\alpha} \exp\left[-\frac{k\tan\beta(R-r)}{\cos\gamma}\right] \times \exp\left[\frac{2\pi i}{\lambda} (r\cos\alpha\sin\gamma + \sqrt{z_{0}^{2} + r^{2} + h_{0}^{2} + 2rh_{0}\cos\alpha})\right] dr d\alpha.$$

$$(10)$$

Для более удобного представления интеграла (10) введем следующие нормированные величины:  $W = R/\lambda$ ,  $H = h_0/R$ ,  $Z = z_0/R$ , w = r/R,  $L = kR \tan\beta/\cos\gamma$ . С учетом этих обозначений уравнение (10) преобразовывается в

$$P_{H} = \frac{WP_{0}}{i} \exp(-L) \cos\gamma \int_{0}^{1+\pi} w \frac{Z\cos\gamma + |H - w\cos\alpha|\sin\gamma}{Z^{2} + w^{2} + H^{2} + 2wH\cos\alpha} \exp[wL] \times \exp[2\pi i W(w\cos\alpha\sin\gamma + \sqrt{Z^{2} + w^{2} + H^{2} + 2wH\cos\alpha})] dwd\alpha.$$
(11)

Результаты численных расчетов для дифракции акустических волн на поглощающем аксиконе для различных значений L при нормальном падении на поверхность аксикона представлены на рис.3. Следует констатировать, что в ближнем поле, когда характерная картина дифракции с пространственной модуляцией амплитуды давления не ярко выражена, образуется область «ямы» с минимумом амплитуды дифрагированного пучка (с центром «ямы» на оси аксикона). Она характеризуется увеличением амплитуды с увеличением радиальной координаты.

Однако, при наклонном падении акустического пучка на поглощающий аксикон область «ямы» дифрагированного пучка отклоняется относительно оси аксикона. На рис.4 показаны результаты расчетов радиального распределения амплитуды давления дифрагированного на поглощающем аксиконе акустиче-



Рис.3. Радиальное распределение амплитуды давления дифрагированного на поглощающем аксиконе акустического пучка  $P_H$  при нормальном падении на поверхность аксикона ( $\gamma = 0$ ) с W = 40 и Z = 0.4. Расчеты проведены для следующих значений L: L = 0.5 (пунктирная линия), L = 1 (сплошная жирная линия), L = 2 (сплошная тонкая линия).

ского пучка при наклонном падении на поверхность аксикона. Как следует из этого рисунка, с увеличением угла наклона  $\gamma$  центр «ямы» перемещается на характерное расстояние, которое определяется как  $H = Z \tan \gamma$  или  $h_0 = z_0 \tan \gamma$ .



Рис.4. Область «ямы» радиального распределения амплитуды давления дифрагированного на поглощающем аксиконе акустического пучка  $P_H$  при наклонном падении на поверхность аксикона при W =40, Z = 0.4 и L = 1. Расчеты проведены для следующих углов:  $\gamma = \pi/8$ (пунктирная кривая) и  $\gamma = \pi/4$  (сплошная кривая).

Таким образом, определение центра «ямы» амплитуды давления дифракции на поглощающем аксиконе позволяет однозначно обнаружить угол ү направления расположения акустического излучателя. Как было показано на рис.1, для экспериментального нахождения центра «ямы» детектор акустического пучка должен быть размещен на устройстве, которое обеспечивает перемещение по перпендикулярным направлениям в плоскости регистрации дифрагированных волн. Альтернативой использования этого устройства может служить акустический трансдюсер с 2D распределением комплекта детектирующих элементов [14], который целиком охватывает всю необходимую поверхность регистрации и позволяет получить распределение поля дифракции поглощающего аксикона.

### 3. Заключение

Таким образом, в представленной работе показано, что для определения направления расположения акустического излучателя достаточно использовать только один акустический детектор с применением поглощающего аксикона в соответствующей акустической системе. Причем в качестве излучателей могут рассматриваться как акустические источники, генерирующие любыми способами, так и акустические волны, рассеянные от различных предметов или внутренних областей субстанций. Следует подчеркнуть, что система обнаружения направления источника акустических волн применима как в случае исследований в лабораторных условиях, так и в режиме дальнего активного или пассивного зондирования. Хотя представленный метод позволяет находить лишь направление расположения акустического излучателя, часто этого вполне достаточно для определения его местоположения в трехмерном пространстве. Например, если нам известен рельеф дна океана, то определение направления акустических сигналов позволит обнаружить местоположение «черного ящика», испускающего эти сигналы.

#### ЛИТЕРАТУРА

- 1. J.A. Pedersen, T. Jørgensen. Localization Performance of Real and Virtual Sound Sources, NATO OTAN, RTO-MP-HFM-123, 1 (2005).
- 2. D. Finch. Canadian Naval Review, 3, 14 (2007).
- 3. K.H. Kim, P. Hursky, M.B. Porter, et al. Proc. 8-th European Conference on Underwater Acoustics, Carvoeiro, Portugal, 329 (2006).
- G. Athanasopoulos, H. Brouckxon, W. Verhelst. Proc. 11th International Conference on Signal Processing (SIP), 131 (2012).
- 5. L.D. Stone, C. Keller, T.L. Kratzke. J. Strumpfer. Report to Bureau d'Enquêtes et d'Analyses pour la sécurité de l'aviation civile, 1 (2011).
- 6. F. Gustafsson, F. Gunnarsson. Proc. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 553 (2003).
- D.V. Bageshwar, A.S. Pawar, V.V. Khanvilkar, V.J. Kadam. Eurasian J. Anal. Chem., 5, 187 (2010).
- 8. A. de la Zerdaa, J. Kimc, E.I. Galanzhad, et al. Contrast Media Mol. Imaging, 6, 346 (2011).
- E. Huang, D.R. Dowlinga, T. Whelan, J.L. Spiesberger. J. Acoust. Soc. Am., 114, 1926 (2003).
- 10. А.Е. Мартиросян. Световой фильтр, Патент Республики Армения, № 2467А, 2010.
- 11. A.E. Martirosyan. Optics and Laser Technology, 43, 242 (2011).
- 12. **А.Е. Мартиросян.** Изв. НАН Армении, Физика, **46**, 330 (2011).
- 13. J.W. Goodman. Introduction to Fourier Optics, San Francisco. McGraw-Hill, 1968.
- 14. J. Woo, Y. Roh. Proc. Symposium on Ultrasonic Electronics, 34, 133 (2013).

# DETERMINATION OF LOCALIZATION DIRECTION OF ACOUSTIC RADIATOR BY USING AN ABSORBING AXICON

## A.E. MARTIROSYAN, A.G. ARAKELYAN

The new technique to determine the localization direction of acoustic radiator by using an absorbing axicon and a single acoustic detector is suggested. Characteristics of near field pattern formed by diffraction of acoustic waves in the absorbing axicon are analyzed. It is shown, that finding the "hole" center in the declining spatial distribution of pressure amplitude allows to ascertain both the localization directions of acoustic sources and acoustic waves scattering on various substances or on their internal regions.