

УДК 004.932

**И. М. Гвоздева**, канд. техн. наук  
ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАН Украины, г. Киев

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ РЕФРАКЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СЛОИСТО-НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ

В статье анализируется влияние рефракции на формирование акустических когерентных изображений объектов, имеющих сложную поверхность отражения, при распространении акустических волн в слоисто-неоднородных средах.

**Ключевые слова:** *акустическое когерентное изображение, рефракция, лучевая траектория, зона Френеля, слоисто-неоднородная среда.*

**Введение.** Методы активного акустического зондирования широко используются для изучения объектов в таких предметных областях, как техническая и медицинская диагностика, гидроакустика. Пространственно-временное распределение вторичного акустического поля исследуемого объекта можно рассматривать как его акустическое когерентное изображение (АКИ), поскольку оно содержит все признакообразующие факторы, характеризующие данный объект [1]. Следует отметить, что при решении задач формирования, обработки и интерпретации АКИ существенную роль играет многообразие связей параметров распространения акустических волн с параметрами среды, а также высокая чувствительность акустического поля к изменению этих параметров. Выделение необходимой информации о характеристиках исследуемого объекта из смеси полезных и неинформативных сигналов шумов и помех является достаточно сложной задачей, поэтому особую важность приобретает проблема учета влияния условий распространения звуковых волн в слоистых средах при моделировании и создании систем обработки АКИ.

Описанные в литературных источниках [2, 3, 4] математические модели вторичных акустических полей объектов недостаточно полно учитывают свойства слоисто-неоднородной среды распространения сигналов и ее влияние на фазовую структуру принимаемого акустического поля. В работе [5] предложена декомпозиция проблемы формирования и пространственно-временной обработки АКИ с учетом влияния среды распространения акустических колебаний в виде последовательного решения ряда взаимосвязанных задач. В работах [3, 6, 7, 8] предложены математические модели распространения акустических волн в слоисто-неоднородных средах, тем не менее, проблема построе-

ния математических моделей формирования АКИ объектов со сложной поверхностью с учетом особенностей распространения акустических волн в слоисто-неоднородных средах еще далека от полного решения. Целью данной статьи является моделирование влияния рефракции на формирование АКИ в слоисто-неоднородных средах.

**Основная часть.** Акустические поля обладают высокой степенью когерентностью, что обуславливает сохранение фазовых соотношений между их отдельными пространственными компонентами. Поэтому при создании математических моделей АКИ необходимо учитывать не только амплитуду, но и фазу принятых отраженных колебаний, которая подвержена существенным деформациям из-за влияния среды распространения.

При решении большинства практических задач исследования объектов методами активного акустического зондирования выполняются условия приближения Кирхгофа [2, 3, 4], что позволяет использовать законы геометрической оптики при построении математических моделей АКИ. С целью повышения адекватности этих моделей реальным физическим процессам необходимо учесть факторы, оказывающие наиболее существенное искажающее влияние на изображения объектов, в том числе — рефракцию.

Физические основы явления рефракции детально рассмотрены в [6, 8], при этом полагается [8], что условия приближения Кирхгофа выполняются, если изменение параметра неоднородности среды в виде коэффициента преломления звука малы на протяжении длины волны

$$k / (G_c / c_i) \gg 1, \quad (1)$$

где  $k$  — волновое число,  $G_c$  — градиент скорости звука,  $c_i$  — скорость звука на фиксированном  $i$ -м горизонте.

В таком приближении набег фазы волны вдоль лучевой траектории соответствует набегу фазы, определяемому волновой теорией.

Градиент скорости звука, входящий в (1), для слоисто-неоднородной среды определяется зависимостью от одной пространственной координаты, при этом используют кусочно-линейную аппроксимацию реального профиля скорости звука [8] по данной координате (в гидроакустике такой пространственной координатой является глубина моря)

$$c = c_0 (1 + G_{ci} / c_0) z_i,$$

где  $G_{ci}$  — вертикальный градиент скорости звука в данном слое;  $c_0$  — скорость звука на глубине источника.

При эхолокационном методе формирования АКИ и моностатическом способе дистанционного зондирования положение плоскости приемной апертуры и объектной плоскости в различных простран-

венных слоев среды маловероятно ввиду различия реальных пространственных масштабов изменения профиля скорости звука и пространственных масштабов объектов зондирования [8], поэтому вполне оправданным является рассмотрение влияния рефракции на формирование АКИ в предположении о линейном изменении профиля скорости звука с постоянным градиентом.

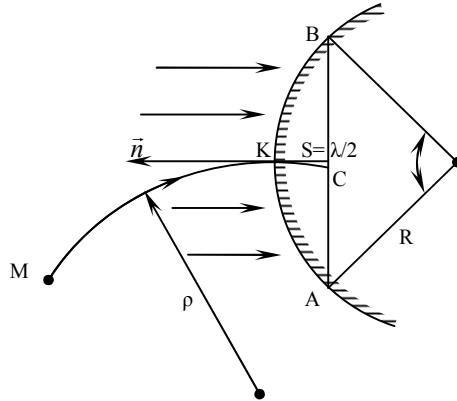
Рассмотрим формирование АКИ в условиях рефракции с постоянным градиентом скорости звука и влияния этого явления на результирующий эффект, как в случае детерминированного взаимодействия зондирующего поля с поверхностью отражения, так и в случае возможного стохастического влияния неоднородности скорости пространства.

Эхолокационный эффект в плоскости приема представляет собой угловое сечение АКИ объекта зондирования. Явление рефракции приводит к изменению угла обзора объекта, поэтому фактически обуславливает наблюдение объекта зондирования под иным углом обзора, зависящим от искажающего фактора — градиента скорости звука, т.е. от дистанции и профиля скорости звука.

Поскольку АКИ образуется совокупностью угловых сечений с шагом, который определяется угловой разрешающей способностью приемной апертуры и используемыми методами пространственно-временной обработки, то угловое смещение таких сечений не приводит к деформации АКИ. Таким образом, оценивая влияние рефракции на процесс формирования АКИ в плоскости приемной апертуры, можно сделать вывод о возможности учета этого явления технически доступными средствами. Принципиально важным является тот факт, что такое влияние не приводит к разрушению структуры АКИ и его признакообразующих факторов.

В [9] предложена и обоснована математическая модель формирования АКИ окрестностями зон Френеля точек стационарной фазы на поверхности объекта. Поскольку кривизна лучевой траектории приведет к изменению фазового набега акустических волн на криволинейной поверхности отражения, то рефракция лучей окажет влияние на процесс формирования зон Френеля точек стационарной фазы.

Введем следующие обозначения:  $\Delta l$  — длина дуги криволинейной траектории в пределах зоны Френеля на поверхности отражения,  $\vec{n}_1$  и  $\vec{n}_2$  — соответственно нормали к поверхности в начале (точка  $K$ ) и в конце (точка  $C$ ) дуги криволинейной траектории в пределах зоны Френеля на поверхности отражения;  $\rho$  — радиус кривизны лучевой траектории;  $\Delta\beta$  — телесный угол, под которым виден участок первой зоны Френеля (рис. 1).



*Рис. 1. Фазовый набег акустических волн на криволинейной поверхности отражения в условиях рефракции*

Следует отметить, что влияние кривизны лучевой траектории потенциально может изменить процесс формирования зоны Френеля на криволинейной поверхности отражения по сравнению с геометрическим случаем. Пусть  $\alpha$  — телесный угол, определяющий размер первой зоны Френеля;  $R$  — радиус кривизны локального участка отражения поверхности объекта;  $\vec{n}$  — нормаль к поверхности объекта.

Рассматривая локально плоский случай, легко установить, что для исключения рассматриваемого эффекта необходимо выполнение условия  $\Delta l < \lambda/2$ . Поскольку  $\Delta l = \rho \cdot \Delta\beta$ , где  $\rho = c_0 / G_c$  — радиус кривизны лучевой траектории в среде с постоянным градиентом  $G_c$ , то имеет место предельно необходимое соотношение  $k\rho\Delta\beta < \pi$ .

Из последнего выражения следует важный качественный результат: влияние кривизны лучевой траектории и, следовательно, явления рефракции на процесс формирования отражающей площадки на поверхности объекта не будет существенным, если угловой размер дуги на этой площадке будет меньше собственного углового размера первой зоны Френеля, т. е.

$$\Delta\beta < \alpha. \quad (2)$$

Обозначая длину дуги на поверхности  $\Delta f_r = R \cdot \alpha$ , получаем соотношение

$$R / \rho < \Delta f_r / \Delta l.$$

Приведенные соотношения имеют предельно допустимый характер: набег фазы акустических волн вдоль криволинейного участка траектории должен быть меньше набег фазы вследствие криволинейности поверхности отражения. Если требуется минимизировать

влияние рефракции на формирование АКИ, то должны выполняться более жесткие условия, а именно:

$$k\rho\Delta\beta \ll 1, \quad (3)$$

$$R_{i\max} \ll \rho, \quad (4)$$

где  $R_{i\max}$  — максимальный из радиусов кривизны на всех локальных участках отражения на поверхности объекта, определяемый формой этой поверхности.

Ранее обоснованные ограничения носят, в основном, качественный характер и охватывают два предельных случая: минимально необходимые ограничения в виде  $\Delta\beta < \alpha$  и условия несущественности влияния рефракции в виде (3) и (4), поэтому на основании приведенных качественных ограничений можно выполнить их детальный количественный анализ для условий распространения акустических волн, близких к реальным.

Площадка отражения на поверхности объекта в виде первой зоны Френеля при учете рефракции образуется в результате пересечения двух криволинейных поверхностей — поля зондирования в виде криволинейных траекторий и локального участка поверхности с двумя радиусами кривизны. При таком пересечении, в отличие от прямолинейного лучевого распространения, образуется дополнительное фазовое смещение  $m = R_{i\max}^2 / 2\rho$ .

Естественным условием формирования отражающей зоны Френеля на поверхности является выполнение ограничения

$$m = R_{i\max}^2 / 2\rho < \lambda / 2.$$

Из последнего выражения следуют равносильные неравенства

$$R_{i\max}^2 / \rho < \lambda, \quad \rho > R_{i\max}^2 / \lambda, \quad R_{i\max} / \sqrt{\lambda\rho}.$$

Важность полученных ограничений обусловлена тем фактом, что они позволяют установить связь между условиями распространения акустических колебаний и характеристиками объектов зондирования. Действительно, поскольку  $\rho = c_0 / G_c$ , то справедливы следующие соотношения

$$R_{i\max} < \sqrt{c_0\lambda / G_c}, \quad G_c < c_0\lambda / R_{i\max}^2.$$

Первое из приведенных условий устанавливает ограничения на характеристики объекта зондирования, АКИ которого не претерпит искажений в условиях рефракции в среде с градиентом  $G_c$ . Второе из приведенных условий указывает на допустимые градиенты скорости распространения акустических волн в реальной среде, которые не приведут к искажению АКИ объекта. В частности, для имеющих место в гидроакустике характеристик  $c_0 = 1500$  м/с,  $\lambda = 0,1$  м,  $R_{i\max}^2 = 5$  м, получаем:  $c_0\lambda / R_{i\max}^2 = 6$  с<sup>-1</sup>, что на один — два порядка превышает возможные градиенты скорости звука в реальной морской среде [8].

С другой стороны, если для тех же условий задать реалистичный приповерхностный градиент  $G_c = 0,1 \text{ c}^{-1}$ , то получается следующее соотношение  $R_{i\text{max}} < 38,7 \text{ м}$ .

Следует отметить, что многие из объектов дистанционного зондирования в гидроакустике могут иметь характеристики поверхности, не соответствующие приведенному ограничению. Для таких объектов необходимо учитывать влияние рефракции не только в плане искажения угла обзора, но и относительно процесса формирования отражающих участков на их поверхности.

Рассмотрим влияние стохастических эффектов на формирование АКИ в условиях рефракции в соответствии с [8]. В этом случае время пробега акустической волны по дуге лучевой траектории определяется

соотношением  $t = \int_0^\beta \frac{ds}{c(z)}$ , где  $ds = \rho d\alpha$ ;  $c(z) = c_0 \cos \alpha$ ,  $\alpha$  — текущий угол касательной к лучевой траектории относительно горизонта. Так как  $\rho = c_0 / G_c$ , то получается выражение: Введем обозначение

$$f(\beta) = \int_0^\beta \frac{d\alpha}{\cos \alpha} = \ln(\sec \beta + \operatorname{tg} \beta). \quad (5)$$

Следует отметить, что при  $\beta \leq \pi / 8$  справедливо линейное приближение (5), однако, для реальных условий при  $\beta \leq \pi / 6$  наилучшим приближением указанного функционала является

$$f_{\text{np}} \cong \ln(1 + \beta). \quad (6)$$

Отсюда получается выражение для длины дуги  $r$ , т.е. пути распространения акустической волны вдоль криволинейной траектории

$$r = \rho \ln(1 + \beta), \quad (7)$$

где  $\beta$  имеет радианную меру.

Таким образом, путь распространения зондирующего поля и, соответственно, отраженного поля, распространяющегося по криволинейной траектории, определится ее радиусом кривизны, зависящим от гидрологических условий, а также углом падения поля на поверхность объекта зондирования.

Будем также полагать, что вследствие флуктуации скорости звука на трассе распространения угол  $\beta$  является случайным с плотностью  $p_\beta$ , поэтому для отраженного поля справедливо выражение:

$$p_r(r) = p_\beta[\beta(r)] \cdot \left| \frac{d\beta}{dr} \right| = p_\beta[\beta(r)] \frac{1}{\rho} \cdot e^{-r/\rho}. \quad (8)$$

В зоне Фраунгофера объект зондирования не может иметь значительный угловой размер, поэтому допустимым является следующее

представление:  $\beta = \beta_0 \pm \Delta\beta / 2$ , где  $\Delta\beta$  имеет равномерное распределение, поэтому распределение пути распространения акустических колебаний имеет усеченную экспоненциальную плотность в пределах

$$r_1 = \rho \ln(1 + \beta_0 + \Delta\beta / 2), \quad r_2 = \rho \ln(1 + \beta_0 - \Delta\beta / 2).$$

Принятое поле согласно [9] описывается выражением  $w(x, y, z) = e^{jkz} \cdot F_0(k_x, k_y)$ , где  $F_0(k_x, k_y)$  — угловой спектр отраженного поля. Соответственно, среднее поле будет иметь вид:

$$\bar{w} = F_0 \cdot \int_{-\infty}^{\infty} p_r(r) e^{jkr} dr. \quad (9)$$

Нетрудно видеть, что второй сомножитель формулы (9) представляет собой характеристическую функцию распределения  $p_r(r)$ . Для экспоненциального распределения

$$\Theta(k) = \mathcal{F} \left\{ \frac{1}{\rho} e^{-r/\rho} \right\} = \frac{1/\rho}{1/\rho - jk} = \frac{1}{1 - jk\rho}.$$

Поскольку  $k\rho \gg 1$ , то допустимо приближение  $e^{jk\rho}$ .

Учитывая тот факт, что экспоненциальная плотность пути распространения имеет усеченный характер, то  $\bar{w} = F_0 \cdot e^{jk\rho} \cdot e^{jk\Delta r}$ . Поскольку  $\Delta r = \rho\Delta\beta$ , окончательно для среднего поля получается выражение

$$\bar{w} = F_0 \cdot e^{jk\rho} \cdot e^{jk\rho\Delta\beta}. \quad (10)$$

На основании последнего соотношения можно установить следующие важные особенности формирования АКИ в условиях рефракции:

1. Результирующий фазовый набег определяется не дистанцией распространения акустического поля, а радиусом кривизны лучевых траекторий, который зависит от условий распространения акустических волн в слоисто-неоднородной среде.

2. Условие неискаженного формирования АКИ при случайном характере флуктуаций скорости звука имеет вид  $k\rho\Delta\beta \ll 1$ , что полностью совпадает с (3) и коррелирует с условием (2), т.е. кривизна лучевых траекторий должна быть сопоставлена с кривизной поверхности.

3. Следует отметить обоснованность эффекта усреднения: в действительности поле зондирования представляет собой лучевую трубку, которая в своем сечении поверхностью объекта формирует отражающую площадку. Такая лучевая трубка может иметь различную ширину в зависимости от дисперсии скорости звука на трассе распространения. Тем не менее, поскольку угловой размер объекта зондирования ограничен и невелик по условиям формирования зоны Френеля, т.к. лишь небольшая часть энергии звукового поля взаимо-

действует с поверхностью объекта, то допустимым является предположение о равномерном распределении углов падения. Существенный фактор изменения фазового набега отражает нелинейная зависимость приращения длины дуги от угла падения.

**Выводы и перспективы исследований.** В результате проведенного анализа искажающего влияния рефракции на формирование АКИ при распространении акустических полей в слоисто-неоднородных средах получены качественные и количественные оценки ограничений, накладываемых на кривизну траекторий распространения акустических колебаний и на кривизну отражающей поверхности объектов зондирования, при которых влияние рефракции не приведет к разрушению признакообразующих факторов, содержащихся в АКИ. Это, в свою очередь, позволит оценить влияние многолучевого распространения акустических полей на формируемые АКИ и устранить указанное влияние за счет использования специальных методов их пространственно-временной обработки.

#### Список использованной литературы:

1. Кайно Г. Акустические волны: устройства визуализации и аналоговая обработка сигналов / Г. Кайно; пер. с англ. — М. : Мир, 1990. — 656 с.
2. Виноградова М. Б. Теория волн / М. Б. Виноградова, О. В. Руденко, А. П. Сухоруков. — М. : Наука, 1979. — 384 с.
3. Акустика океана. / Под ред. Л. М. Бреховских. — М. : Наука, 1974. — 696 с.
4. Шендеров Е. Л. Волновые задачи гидроакустики / Е. Л. Шендеров. — Л. : Судостроение, 1972. — 349 с.
5. Верлань А. Ф. Моделирование процессов формирования и обработки акустических когерентных изображений / А. Ф. Верлань, В. Ф. Миргород, И. М. Гвоздева // Электронное моделирование. — К., 2004. — Т. 26, № 5. — С. 111—118.
6. Малышкин Г. С. Модели гидроакустических сигналов при распространении звука в океане / Г. С. Малышкин. — Л., 1989. — 54 с.
7. Бреховских Л. М. Волны в слоистых средах / Л. М. Бреховских. — М., 1957. — 502 с.
8. Сташкевич А. П. Акустика моря / А. П. Сташкевич. — Л. : Судостроение, 1966. — 353 с.
9. Гвоздева И. М. Спектральные пространственные модели акустических когерентных изображений / И. М. Гвоздева, В. Ф. Миргород // Искусственный интеллект. — Донецк, 2007. — №4. — С. 272—279.

Analysis of the refraction influence on the forming the acoustic coherent images of objects with complex reflective surfaces at propagating the acoustic waves in layered-anisotropic medium is described in this paper.

**Key words:** *acoustic coherent image, refraction, ray trajectory, Fresnel region, layered-anisotropic medium.*