

УДК 534.7

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АР-ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВЫХ СПЕКТРОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАСТИ ЛОКАЛИЗАЦИИ ОГРАНИЧЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ В МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ

В. В. КРИЖАНОВСКИЙ*, В. В. КРИЖАНОВСКИЙ (мл.)

*Институт гидромеханики НАН Украины
ул. Желябова, 8/4, 03680, ГСП, Киев-180, Украина*

**E-mail: v_krizh@ukr.net*

Получено 09.12.2014

Исследованы особенности структуры угловых спектров акустической мощности полей ограниченных источников в малоразмерных объектах, сравнимых с длиной волны. Изучена возможность использования этой информации для определения области локализации источников. Задача решена на основе разработанной процедуры авторегрессионного оценивания угловых спектров мощности. В качестве информативной характеристики использованы данные о взаимной спектральной плотности мощности сигналов, регистрируемых в пространственно разнесенных точках на поверхности объекта. Численный анализ выполнен для модели объекта в виде конечной цилиндрической трубы. Рассмотрены поверхностные и объемные источники, определена структура акустического поля. Исследованы два варианта расположения двухэлементной антенны на трубе и соответствующие схемы перемещения антенны по ее поверхности. Представлены структуры рельефов авторегрессионных оценок угловых спектров мощности источников для разных вариантов их расположения вдоль оси трубы. Показано, что на основе анализа этих структур можно оценить область локализации источников. Определены факторы, влияющие на точность этой процедуры. Исследована возможность оценивания глубины расположения источника и определены наиболее эффективные схемы измерений.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: авторегрессионное оценивание, акустический источник, пространственная локализация, антенна, угловой спектр, спектральная плотность мощности

Досліджені особливості структури кутових спектрів акустичної потужності поля обмежених джерел у малорозмірних об'єктах, порівнянних з довжиною хвилі. Вивчено можливість використання цієї інформації для визначення області локалізації джерел. Задачу розв'язано на основі розробленої процедури авторегресійного оцінювання кутових спектрів потужності. За інформативну характеристику правили дані про взаємну спектральну щільність потужності сигналів, які реєструвались у просторово рознесених точках на поверхні об'єкта. Числовий аналіз виконано для моделі об'єкта у вигляді скінченної циліндричної труби. Розглянуто поверхневі й об'ємні джерела, визначено структуру акустичного поля. Досліджено два варіанти розташування двохелементної антени на поверхні труби та відповідні схеми переміщення антени по її поверхні. Представлені структури рельєфів авторегресійних оцінок кутових спектрів потужності джерел для різних варіантів їхнього розташування уздовж осі труби. Показано, що на основі аналізу цих структур можна оцінити область локалізації джерел. Визначено чинники, які впливають на точність цієї процедури. Досліджено можливість оцінювання глибини розташування джерела й визначені найбільш ефективні схеми вимірювань.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: авторегресійне оцінювання, акустичне джерело, просторова локалізація, антена, кутовий спектр, спектральна щільність потужності

The paper deals with studying the structural features of angular power spectra of the acoustic field from the finite sources in small-sized objects comparable with wave length. The possibility of use of this information for determining the localization area of these sources is investigated. The problem is solved on the basis of the developed procedure of autoregressive evaluation of angular power spectra. The data on mutual spectral power density of the signals recorded in spatially distributed points of the object's surface are chosen as the informative parameter. The numerical analysis is performed for model object in the form of finite cylindrical pipe. The surface and volume sources are considered, the structure of acoustic field is determined. Two variants of location of the two-element antenna are considered along with its displacement across the pipe's surface. The structures of reliefs of autoregressive estimations of angular power spectra of the sources are presented for different variants of their position along the pipe's axis. The possibility of estimation of source localization area on the basis of analysis of these structures is shown. The factors affecting the accuracy of this procedure are determined. The option of assessing the source location depth is studied and the most effective measurement setups are specified.

KEY WORDS: autoregressive evaluation, acoustic source, spatial localization, antenna, angular spectrum, power spectrum density

ВВЕДЕНИЕ

При диагностике заболеваний респираторного тракта важным источником информации являются звуки дыхания, регистрируемые на поверхности грудной клетки. В работах [1, 2] показано, что на базе информации о спектральной плотности мощности (СПМ) этих сигналов можно определить участки поверхности грудной клетки, в окрестности которых действуют источники патологических звуков дыхания. Эта информация позволяет проводить поверхностную локализацию пораженных областей, но ее может оказаться недостаточно для идентификации самих источников. Как показано в работе [3], важная дополнительная информация об их природе содержится в структуре соответствующих угловых спектров мощности. Для неинвазивной оценки угловых спектров могут быть использованы данные о взаимной спектральной плотности мощности (ВСПМ) сигналов источников, регистрируемых на поверхности грудной клетки. При этом в силу сравнимости размеров грудной клетки с длиной волны в информативной полосе частот структура угловых спектров должна существенно зависеть от протяженности источника, а также от его расположения относительно приемников и границ объекта.

В связи с этим цель данной работы состоит

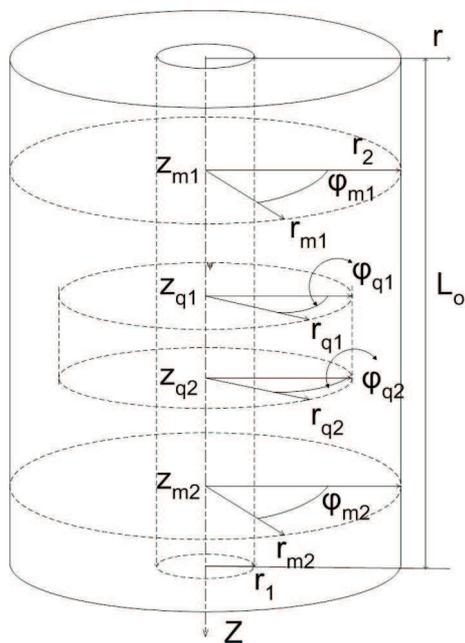


Рис. 1. Модель конечной цилиндрической трубы с заданной геометрией расположения источников и приемников

в исследовании особенностей структуры угловых спектров источников звуков дыхания, расположенных внутри малоразмерных объектов. Анализ данной задачи проводится на основе упрощенной модели респираторного тракта в виде конечной толстостенной цилиндрической трубы из акустического материала с поглощением. При этом рассматриваются две модельные ситуации.

В первом случае полагаем, что осесимметричный источник случайных пульсаций давления действует на внутренней стенке трубы (структура поля для этого случая была рассмотрена в [4]). Такая модель может быть использована для анализа угловых спектров звуков дыхания источников, возникающих при обструкциях дыхательных путей в области трахеи и крупных бронхов. В ее рамках исследуются особенности структуры угловых спектров мощности источников, связанные с вариациями их протяженности и положения вдоль оси трубы.

Вторая ситуация соответствует случаю, когда акустическое поле формируется ограниченным источником, расположенным внутри стенки трубы. Эта модель позволяет рассмотреть те случаи, когда источники не обладают осевой симметрией и могут быть ограничены как в осевом, так и в радиальном направлениях, а также могут действовать в ограниченном секторе углов вдоль дуги окружности цилиндрической трубы. Кроме того, в рамках этого подхода возможно исследовать зависимость структуры угловых спектров от глубины расположения источников относительно наружной боковой поверхности трубы. В качестве соответствующего примера приведем сигналы случайных источников пульсаций давления, формируемые при дыхании за счет трения пораженных участков листков плевры. При количественном оценивании угловых спектров, соответствующих второй модельной ситуации, необходимо определить структуру поля ограниченного источника сигнала, расположенного внутри стенки трубы. Для этого воспользуемся результатами работы [5], где с помощью аналогичной модели исследовалось влияние акустического канала на структуру спектра основных тонов кардиосигналов.

1. СТРУКТУРА ПОЛЯ ОГРАНИЧЕННОГО ИСТОЧНИКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ, РАСПОЛОЖЕННОГО ВНУТРИ СТЕНКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ТРУБЫ

В [5] рассмотрена модель канала распространения акустических сигналов, представленная на рис. 1. В ее рамках предполагалось существование

ограниченной однородной цилиндрической трубы длины L_0 с заданными значениями скорости звука c_0 и плотности ρ_0 в ее стенке. При этом один из торцов трубы считался акустически мягким, а второй – акустически жестким. Внутренняя и наружная боковые стенки трубы ограничены акустически мягкими поверхностями с радиусами r_1 и r_2 соответственно.

Кроме того, учтено, что внутри некоторой коаксиальной области Ω_q стенки трубы, ограниченной координатами $\mathbf{R}_{q1} : \{r_{q1}, z_{q1}, \phi_{q1}\}$ и $\mathbf{R}_{q2} : \{r_{q2}, z_{q2}, \phi_{q2}\}$, действует акустический источник, генерирующий на частоте ω некогерентные случайные колебания, описываемые функцией $Q(\omega, \mathbf{R}_q)$. Структура формируемого при этом потенциала колебательной скорости такова:

$$\Psi(\omega, \mathbf{R}) = \int_{\Omega_q} Q(\omega, \mathbf{R}_q) G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q) d\mathbf{R}_q. \quad (1)$$

Здесь $G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)$ – функция Грина, удовлетворяющая неоднородному дифференциальному уравнению Гельмгольца

$$L[G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)] = -\delta(\mathbf{R} - \mathbf{R}_q), \quad (2)$$

в котором символом L обозначен дифференциальный оператор. В цилиндрической системе координат он имеет вид

$$L = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \phi^2} + \frac{\omega^2}{c_0^2}.$$

В дополнение к этому функция Грина должна удовлетворять краевым условиям

$$\begin{aligned} G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)|_{z=0} &= \frac{\partial G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)}{\partial z} \Big|_{z=L_0} = 0, \\ G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)|_{r=r_1} &= G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)|_{r=r_2} = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

$$G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)|_{\phi-\pi} = G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q)|_{\phi+\pi}.$$

Представим функцию Грина в виде разложения

$$\begin{aligned} G(\omega, \mathbf{R}/\mathbf{R}_q) &= \\ &= \sum_{\mu} \sum_p C_{i\mu p} D_{i\mu p}(r) Z_p(z) \Phi_{\mu}(\phi), \end{aligned} \quad (4)$$

$$i = 1, 2,$$

где фигурируют собственные функции

$$\begin{aligned} Z_p(z) &= \sin(\gamma_p z), \quad \gamma_p = \frac{(2p+1)\pi}{2L_0}, \\ p &= 0, 1, 2, \dots; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\Phi_{\mu}(\phi) = \{\sin(\mu\phi), \cos(\mu\phi)\}, \quad \mu = 0, 1, 2, \dots; \quad (6)$$

$$D_{i\mu p}(r) = u_{\mu}(\kappa_p r) v_{\mu}(\kappa_p r_i) - u_{\mu}(\kappa_p r_i) v_{\mu}(\kappa_p r),$$

$$\kappa_p = \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} - \gamma_p^2}, \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \quad p = 0, 1, \dots, \quad \mu = 0, 1, \dots,$$

удовлетворяющие одномерным краевым задачам:

$$L_z[Z_p(z)] = 0, \quad Z_p(z)|_{z=0} = \frac{\partial Z_p}{\partial z} \Big|_{z=L_0} = 0; \quad (8)$$

$$L_{\phi}[\Phi_{\mu}(\phi)] = 0, \quad \Phi_{\mu}(\phi)|_{\phi-\pi} = \Phi_{\mu}(\phi)|_{\phi+\pi}; \quad (9)$$

$$L_r[D_{i\mu p}(r)] = 0, \quad D_{i\mu p}(r)|_{r=r_i} = 0. \quad (10)$$

Здесь использованы обозначения одномерных дифференциальных операторов:

$$L_z = \frac{d^2}{dz^2} + \gamma^2;$$

$$L_{\phi} = \frac{d^2}{d\phi^2} + \mu^2;$$

$$L_r = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d}{dr} \right) + \left(\frac{\omega^2}{c_0^2} - \gamma^2 - \frac{\mu^2}{r^2} \right).$$

Параметры γ и μ принимают значения собственных чисел соответствующих дифференциальных операторов. Их спектр определяется заданными краевыми условиями и согласуется с номерами p и μ описанных выше собственных функций. Элементы $\{u_{\mu}(\kappa_p r), v_{\mu}(\kappa_p r)\}$ в соотношениях (7) представляют множество ортогональных линейно независимых цилиндрических функций. В их качестве могут быть использованы функции Бесселя, Неймана или Ханкеля [6]. Фигурирующие в представлении (4) неизвестные коэффициенты $C_{1\mu p}$ и $C_{2\mu p}$ вычисляются на основе использования необходимых и достаточных условий, которым должна удовлетворять функция Грина [6].

С учетом вида построенной функции Грина определен потенциал скорости для ограниченных объемных акустических источников и получено выражение для радиальной колебательной скорости, которая связана с потенциалом скорости известным соотношением:

$$V(\omega, \mathbf{R}) = \frac{\partial \Psi(\omega, \mathbf{R})}{\partial r} \Big|_{r=r_2}. \quad (11)$$

После ряда очевидных преобразований окончательная структура поля радиальной компоненты колебательной скорости на поверхности цилиндрической трубы может быть представлена в следующем виде:

$$V(\omega, \mathbf{R}) = \sum_{\mu} \sum_p \frac{Q_{\mu p} Z_p(z) \Phi_{\mu}(\phi)}{B_{\mu p}(r_1, r_2)}, \quad (12)$$

где

$$Q_{\mu p} = \int_{\Omega_q} Q(\omega, \mathbf{R}_q) Z_p(z_q) \Phi_{\mu}(\phi_q) D_{1\mu p}(r_q) d\mathbf{R}_q;$$

$$B_{\mu p}(r_1, r_2) = r_2(1 + \delta_{\mu 0})(1 + \delta_{p 0}) D_{1\mu p}(r_2).$$

2. УГЛОВЫЕ СПЕКТРЫ ИСТОЧНИКОВ, ЛОКАЛИЗОВАННЫХ В СТЕНКЕ ТРУБЫ

Перейдем к рассмотрению ряда модельных ситуаций, позволяющих выявить зависимость структуры угловых спектров источников сигналов от изменения их протяженности и положения внутри стенки трубы.

Для оценивания угловых спектров мощности применяем авторегрессионный (АР) алгоритм, представленный в работе [3]. При этом в качестве основной информативной характеристики АР-алгоритма будут использоваться оценки матрицы ВСПМ поля сигнала на приемниках антенны с элементами вида

$$K(\omega, \mathbf{R}_i, \mathbf{R}_k) = \langle V(\omega, \mathbf{R}_i) V(\omega, \mathbf{R}_k)^* \rangle, \quad (13)$$

где $\langle \cdot \rangle$ – символ статистического усреднения.

На практике для оценивания ВСПМ сигналов источников дыхания применяются цифровые методы обработки [7]. Поэтому численное моделирование будем проводить, используя представления характеристик сигналов в цифровой форме. Тогда с учетом результатов, полученных в работе [3], оценка углового спектра для АР-алгоритма может быть представлена следующим образом:

$$F(k, n) = P_u \left(1 + \sum_{l=1}^{M-1} A(k, l) \exp\left(-\frac{j2\pi nl}{M}\right) \right)^{-2}, \quad (14)$$

$$k = \overline{0, N/2 - 1}, \quad n = \overline{0, M/2 - 1}.$$

Здесь $A(k, n)$ – коэффициенты АР-фильтра, определяемые из системы уравнений

$$\sum_{l=0}^{M-1} A(k, l) K(k, s-l) = \begin{cases} P_u, & \text{при } s = 0, \\ 0, & \text{при } s \neq 0, \end{cases}$$

в которой $K(k, \Delta l)$ – элементы матрицы ВСПМ сигналов для k -ой частоты между приемниками с разницей номеров $\Delta l = l_1 - l_2$; P_u – уровни СПМ действующего на входе фильтра белого шума; M – количество отсчетов регистрируемого приемниками антенны сигнала, используемых при периодограммой оценке его спектра.

Для наглядного представления структуры оцениваемых угловых спектров на графиках применим процедуру приведения угловой СПМ к форме, зависящей от угла Ψ , который определяет направления относительно траверса линейной антенны в центре ее базы:

$$\hat{F}(k, \Psi_{kn}) = F(k, n), \quad (15)$$

$$k = \overline{0, N/2 - 1}, \quad n = \overline{0, M/2 - 1}.$$

Здесь $\Psi_{kn} = \arcsin(Nn\lambda_d/(Mk\Delta))$; $\lambda_d = c_o/f_d$ – длина волны на частоте дискретизации f_d при скорости распространения звука c_o ; Δ – межэлементное расстояние в антенне.

Оценки угловых спектров будем проводить с помощью двухэлементной антенны с фиксированным межэлементным расстоянием, не превышающим половины длины волны. Начнем со случая, когда антенна ориентирована вдоль образующей наружной боковой стенки трубы.

2.1. Особенности угловых спектров поверхностных источников при смещении линейной антенны вдоль образующей трубы

Анализ угловых спектров проведем для нескольких практически интересных модельных ситуаций. Вначале рассмотрим случай, когда случайные источники расположены на внутренней стенке трубы $r_q = r_1$ и имеют осевую симметрию. Будем исследовать зависимость структуры углового спектра от протяженности источника вдоль образующей боковой стенки трубы.

В работе [3] показано, что если некогерентный источник протяжен на всю длину трубы, то его угловой спектр практически не зависит от положения антенны вдоль образующей и максимум угловой СПМ всегда ориентирован в траверсном направлении антенны. Исследуем особенности изменения структуры углового спектра протяженного вдоль оси трубы осесимметричного некогерентного источника в случае вариации его протяженности и пространственного положения.

Определим основные параметры моделируемой задачи. Пусть имеется однородная цилиндрическая труба со следующими геометрическими характеристиками: длина трубы $L_o = 0.6$ м, ее

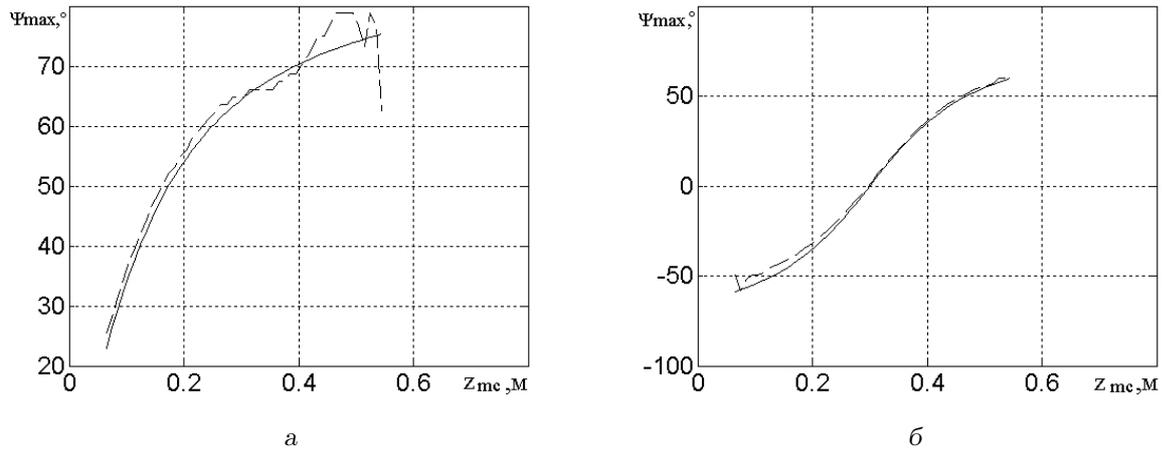


Рис. 2. Сравнение траектории АР-оценок направлений максимумов Ψ_{max} угловых спектров ограниченного поверхностного источника сигнала (штриховая) и траектории геометрических направлений из центра базы антенны на этот источник (сплошная): а – источник примыкает к акустически мягкому торцу трубы; б – источник равноудален от торцов

внутренний и наружный радиусы $r_0 = 0.0085$ м и $r_1 = 0.15$ м соответственно. Предположим, что один из торцов трубы – акустически мягкий, а второй – акустически жесткий. Физические параметры материала стенки трубы в исследуемой модельной ситуации определяются скоростью звука $c_0 = 23$ м/с и плотностью $\rho = 250$ кг/м³. Затухание звука в стенке будем учитывать, введя мнимую добавку к скорости звука: $c = c_0(1 + j\nu)$, $\nu = 0.2$. Оценки проведем для практически интересного интервала частот между 382.5 и 638.5 Гц. При этом полагаем, что акустические сигналы формируются распределенными на внутренней стенке трубы некоррелированными случайными источниками с равномерным в заданной полосе частот спектром плотности мощности.

Для начала сравним геометрическую траекторию углов прихода сигналов относительно траверса антенны в центре ее базы и траекторию АР-оценок максимумов угловой СПМ, полученной по данным о ВСПМ сигналов, регистрируемых антенной при ее смещении вдоль образующей трубы. Можно показать, что в общем случае геометрические углы прихода сигнала в центр базы двухэлементной антенны, отсчитываемые относительно ее траверса, определяются соотношением

$$\Psi_{qo} = -\arcsin \frac{\left(\mathbf{R}_{m2} - \mathbf{R}_{m1}, \frac{\mathbf{R}_{m2} + \mathbf{R}_{m1}}{2} - \mathbf{R}_{qo} \right)}{\left| \mathbf{R}_{m2} - \mathbf{R}_{m1} \right| \cdot \left| \frac{\mathbf{R}_{m2} + \mathbf{R}_{m1}}{2} - \mathbf{R}_{qo} \right|},$$

где $\mathbf{R}_{mi} : \{r_{mi}, \phi_{mi}, z_{mi}\}$, $i = 1, 2$ – координаты

приемников для m -го положения антенны на образующей трубы; $\mathbf{R}_{qo} : \{r_{qo}, \phi_{qo}, z_{qo}\}$ – координаты геометрического центра источника; (\cdot, \cdot) – символ скалярного произведения.

На рис. 2 представлены соответствующие зависимости, полученные для источника, протяженность которого вдоль образующей трубы не превышает длины волны. Рис. 2, а соответствует случаю, когда источник расположен вблизи акустически мягкого торца трубы и его координаты вдоль образующей определяются значениями $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.01$ м. На рис. 2, б приведены данные для равноудаленного от торцов трубы источника с координатами $z_{q1} = 0.295$ м, $z_{q2} = 0.305$ м. На графиках сравниваются геометрическая траектория углов прихода сигнала в центр базы антенны и их АР-оценка.

Анализ показывает, что в рассматриваемых примерах геометрические траектории максимумов и траектории АР-оценок максимумов угловых СПМ достаточно хорошо согласуются между собой в секторе углов прихода сигнала, ограниченном значениями $\pm(45 \dots 60)^\circ$ относительно траверса антенны. Указанное обстоятельство позволяет в пределах этого сектора углов проводить оценку пространственных координат источников сигналов, в частности, радиальной глубины расположения источника.

Согласно данным [3], более полное представление о структуре углового спектра можно получить на основе анализа рельефа АР-оценки угловой СПМ, на котором по оси абсцисс отложены координаты центра базы z_{mc} антенны, смещаемой

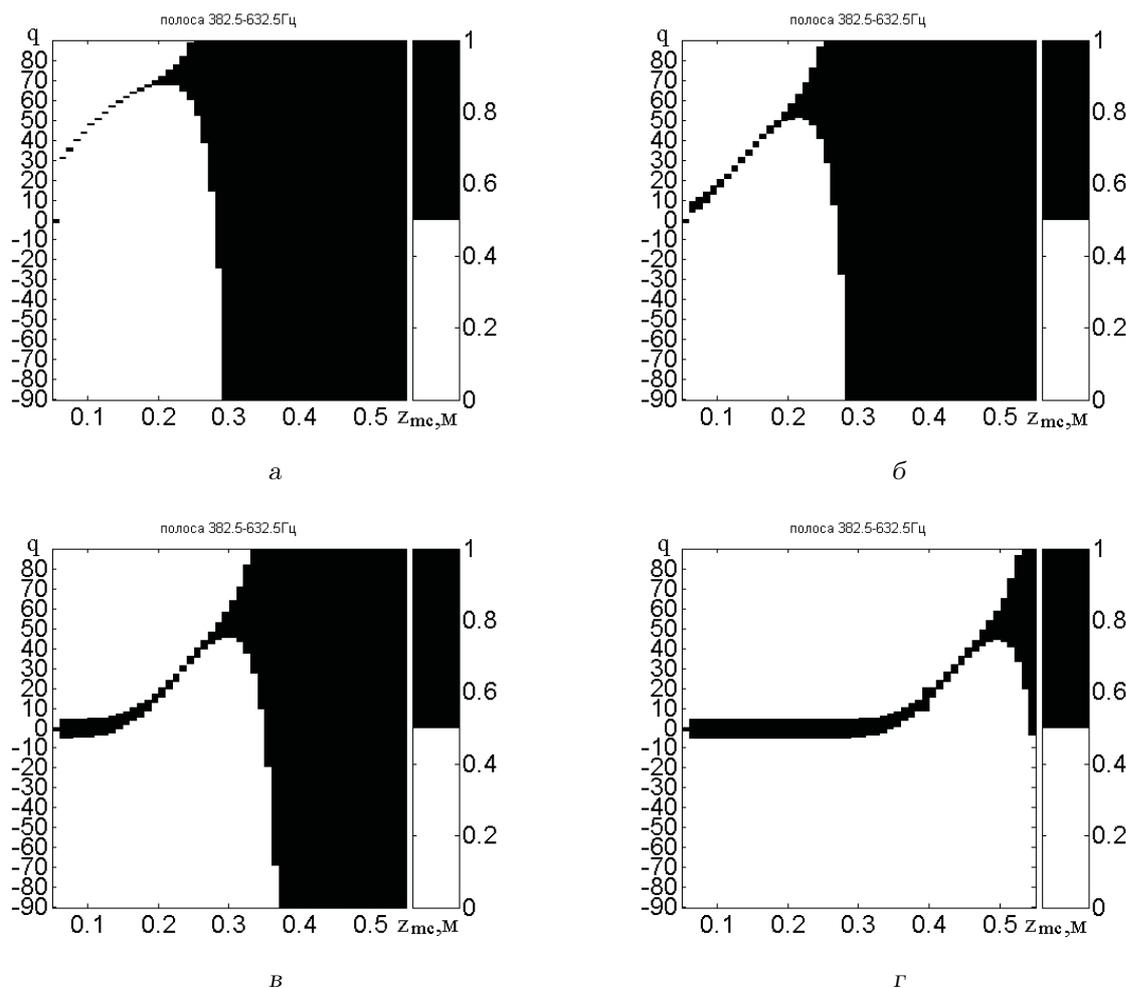


Рис. 3. Рельеф АР-оценки угловой СПМ сигнала
поверхностного источника, ограниченного координатами z_{q1} и z_{q2} :
 а - $z_{q1}=0$ м, $z_{q2}=0.01$ м; б - $z_{q1}=0$ м, $z_{q2}=0.1$ м;
 в - $z_{q1}=0$ м, $z_{q2}=0.2$ м; г - $z_{q1}=0$ м, $z_{q2}=0.4$ м

вдоль образующей трубы, а по оси ординат – направления q , отсчитываемые относительно траверса антенны. При этом следует учитывать, что номера физических направлений $q = -(\overline{Q}, Q)$ связаны с углами Ψ соотношением $\Psi_q = \arcsin(q/Q)$, где $Q = 90$.

Для иллюстрации на рис. 3 и 4 приведены семейства графиков с рельефами АР-оценок угловой СПМ, полученными в интервале частот от 382.5 до 638.5 Гц для нескольких вариантов протяженности источников вдоль образующей трубы. Заметим, что для рис. 3 источник примыкает к акустически мягкому торцу антенны, а для рис. 4 – располагается симметрично относительно торцов трубы. Уровни оценок угловой СПМ закодированы в соответствии со шкалами, приведенными справа.

Сравнительный анализ угловых спектров источников сигналов разной протяженности показывает, что при расположении антенны над источником максимум угловой СПМ ориентирован в ее траверсном направлении. После выхода центра базы антенны за пределы радиальной проекции источника на образующую трубы наблюдается смещение максимума угловой СПМ в направлении ближайшей к антенне границы источника. Следует отметить, что регулярность структуры трека максимумов нарушается на тех участках, где существенно снижается уровень отношения сигнал/помеха. Это области, в которых наблюдается явление антирезонанса, а также удаленные от источника сигнала зоны, для которых наиболее существенно затухание. В целом из представленных графиков видно, что анализ структу-

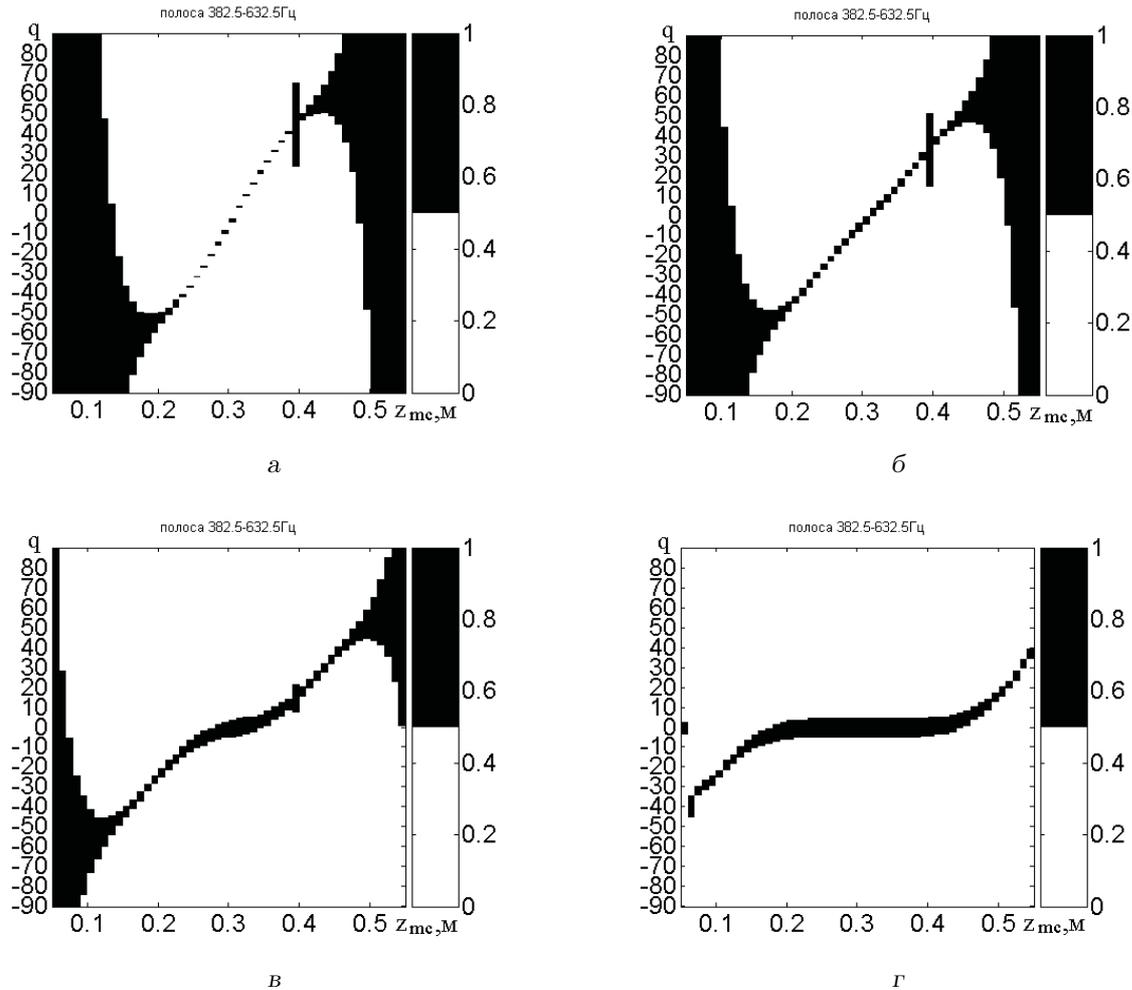


Рис. 4. Рельеф АР-оценки угловой СПМ сигнала
поверхностного источника, ограниченного координатами z_{q1} и z_{q2} :

а – $z_{q1}=0.295$ м, $z_{q2}=0.305$ м; б – $z_{q1}=0.25$ м, $z_{q2}=0.35$ м;
в – $z_{q1}=0.2$ м, $z_{q2}=0.4$ м; г – $z_{q1}=0.1$ м, $z_{q2}=0.5$ м

ры угловой СПМ позволяет не только выявить источник сигнала, но и оценить его протяженность и область пространственной локализации вдоль образующей.

Аналогичную трактовку можно дать результатам, полученным для случая расположения источника в центральной области стенки трубы (см. рис. 4).

2.2. Особенности угловых спектров объемных источников при смещении линейной антенны вдоль образующей трубы

До сих пор мы рассматривали угловые спектры источников, действующих на внутренней стенке трубы. Рассмотрим теперь, как изменяется структура угловой СПМ некогерентных источников при

смещении поверхности, в окрестности которой они сосредоточены, внутрь стенки. Эта ситуация также может быть исследована на основе модели, приведенной на рис. 1. При этом радиальная глубина расположения источника варьируется в пределах интервала, ограниченного боковыми стенками трубы.

Приведем рельефы оценок угловой СПМ для источника, расположенного в окрестности коаксиальной поверхности радиуса $r_q=0.12$ м. В этом случае источники сигналов находятся вблизи наружной боковой стенки трубы, что характерно для шумов трения пленки при патологиях. Для источников, примыкающих к акустически мягкому торцу, получена серия графиков, приведенная на рис. 5, а для равноудаленных от торцов трубы источников – на рис. 6.

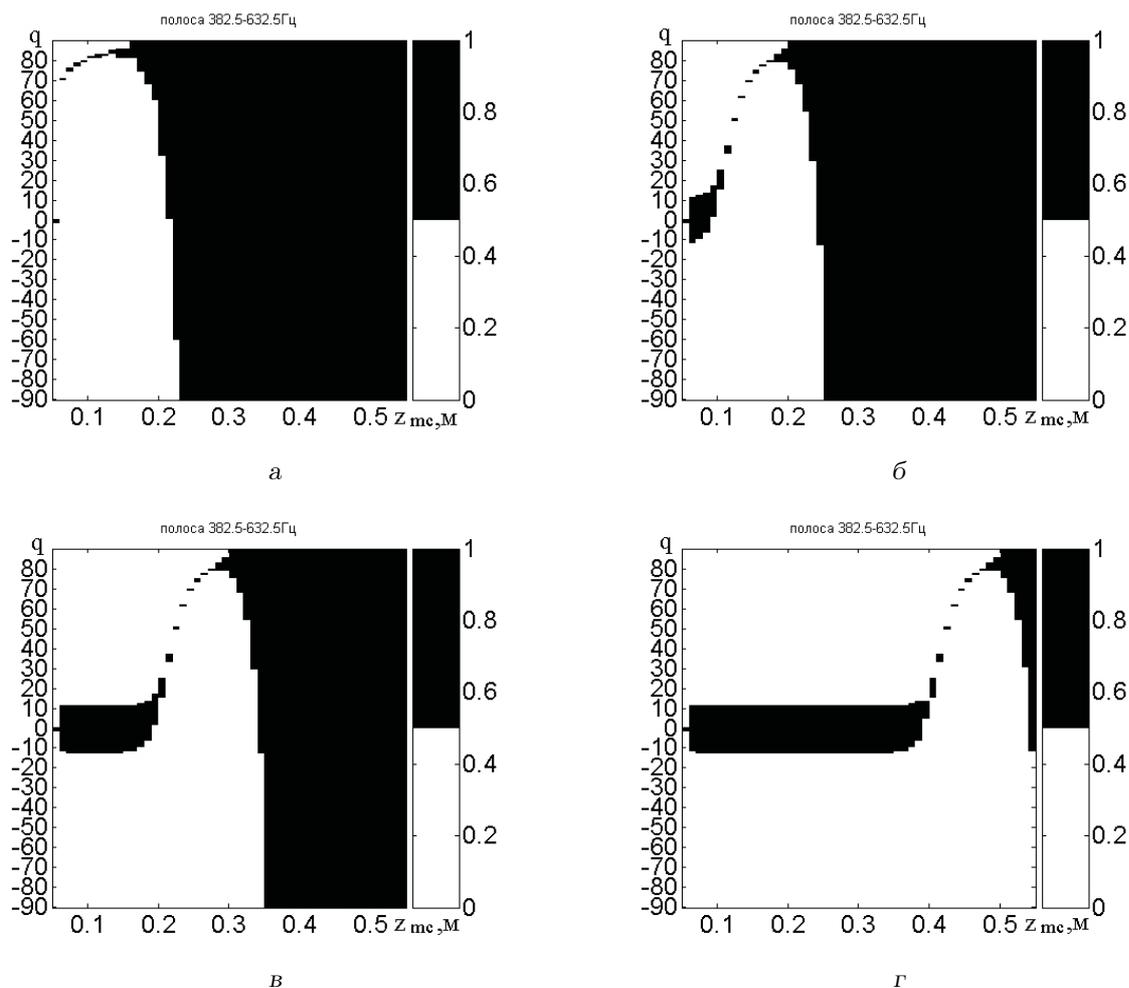


Рис. 5. Рельеф АР-оценки угловой СПМ сигнала
 объемного источника на глубине $r_q = 0.12$ м, ограниченного координатами z_{q1} и z_{q2} :
 а - $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.01$ м; б - $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.1$ м; в - $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.2$ м; г - $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.4$ м

Очевидно, что в этой модельной ситуации по виду угловой СПМ также можно оценить протяженность источника и область его пространственной локализации. При этом следует отметить, что для приповерхностного расположения угловая СПМ источника имеет более размытую траекторию максимумов, что должно приводить к снижению точности оценивания его координат. Этот вывод подтверждается сравнением представленных на рис. 7 и 8 графиков траекторий геометрических направлений и АР-оценок максимумов угловых СПМ для ограниченного по протяженности осесимметричного источника, полученных для трех значений радиального заглубления коаксиальной поверхности источника. В частности, на рис. 7 приведены графики траекторий для осесимметричных источников, примыкающих к акустически мягкому торцу трубы ($z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.01$ м), а на

рис. 8 – равноудаленных от торцов ($z_{q1} = 0.295$ м, $z_{q2} = 0.305$ м).

Анализ этих данных показывает, что для рассматриваемой схемы измерений реалистичная оценка глубины источника возможна при выполнении следующих требований:

- угловое положение источника относительно траверса антенны должно соответствовать информативному сектору углов $\pm(45 \dots 60)^\circ$;
- расстояние от источника до антенны должно превышать длину волны в информативной полосе частот;
- на заданном интервале дистанций между источником и антенной должен быть обеспечено достаточное для получения состоятельных оценок отношение сигнал/помеха.

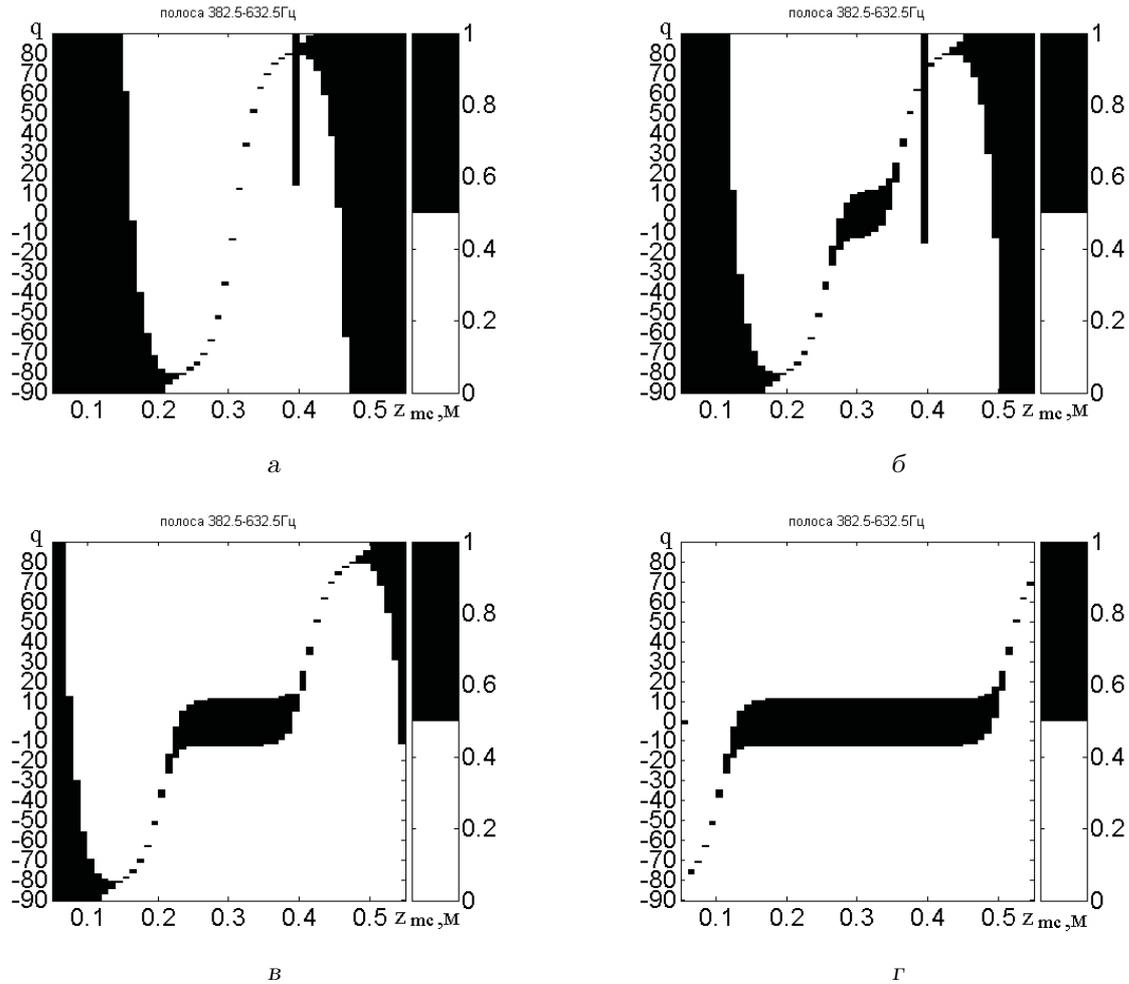


Рис. 6. Рельеф АР-оценки угловой СПМ сигнала
объемного источника на глубине $r_q = 0.12$ м, ограниченного координатами z_{q1} и z_{q2} :

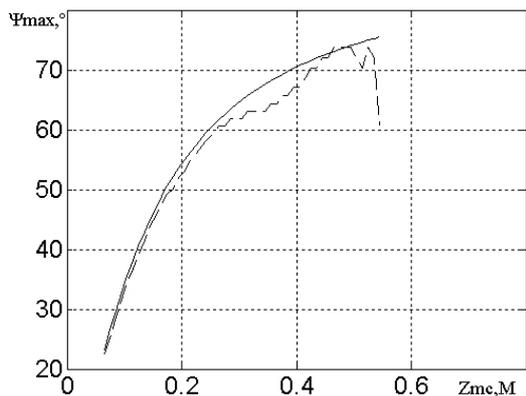
а – $z_{q1} = 0.295$ м, $z_{q2} = 0.305$ м; б – $z_{q1} = 0.25$ м, $z_{q2} = 0.35$ м;
в – $z_{q1} = 0.2$ м, $z_{q2} = 0.4$ м; г – $z_{q1} = 0.1$ м, $z_{q2} = 0.5$ м

На рис. 9 приведены графики геометрических траекторий, характеризующих зависимость угла прихода сигнала на антенну от дистанции вдоль образующей между центрами базы антенны и источника для значений радиальной глубины расположения источника, которые соответствуют интервалу (0.01...0.14) м. Рис. 9, а соответствует источнику, примыкающему к акустически мягкому торцу трубы, рис. 9, б – источнику, равноудаленному от торцов, рис. 9, в – источнику, примыкающему к акустически жесткому торцу.

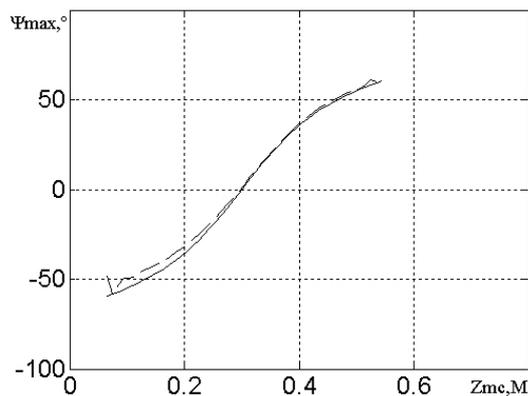
Ясно, что при фиксированном расстоянии между источником и антенной вдоль образующей трубы приближение источника к ее наружной поверхности приводит к возрастанию отклонения угла прихода сигнала от траверса антенны. Поэто-

му только для достаточно заглубленных источников, расположенных вблизи внутренней боковой стенки трубы, можно выделить участок дистанций между источником и приемником, в пределах которого удовлетворяются требования, сформулированные выше. В противном случае, в рамках рассматриваемой схемы измерений приближение источника к поверхности будет приводить к существенным погрешностям оценивания координат его глубины. Кроме того, эффективность оценки глубины источника существенно зависит от его протяженности вдоль образующей трубы. В частности, оценка глубины окажется невозможной, если источник занимает всю длину трубы.

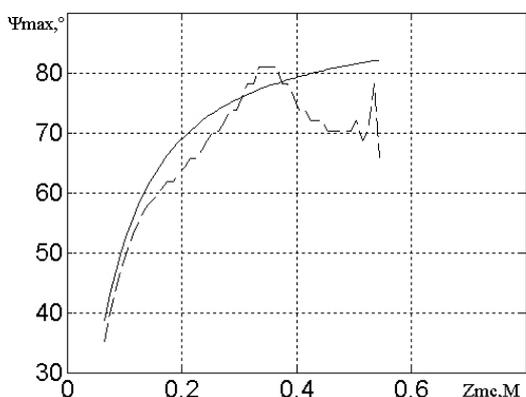
В этом случае целесообразно использовать другую схему измерений, при которой антенну следует ориентировать и перемещать вдоль дуги нару-



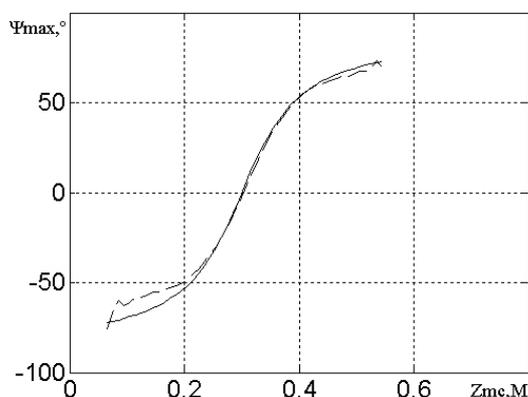
а



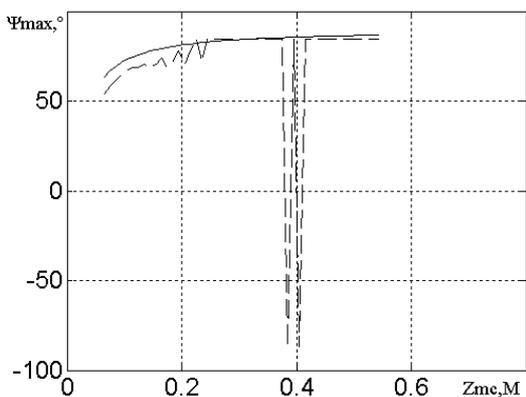
а



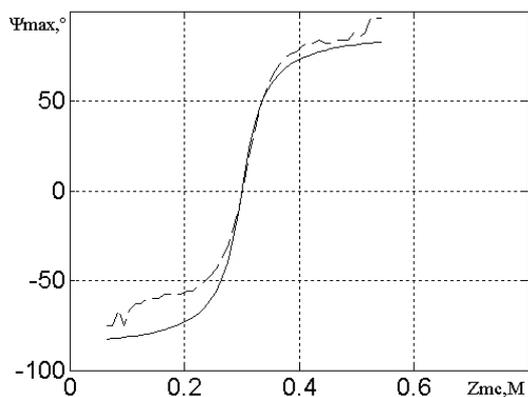
б



б



в



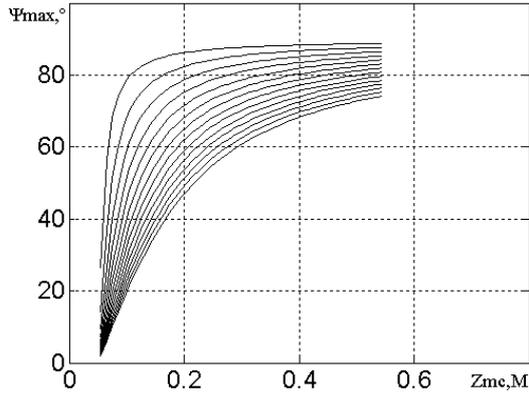
в

Рис. 7. Сравнение траекторий АР-оценок направлений максимумов угловых спектров (штриховая) и геометрических направлений относительно траверса из центра базы антенны (сплошная) для ограниченного осесимметричного источника сигнала, примыкающего к акустически мягкому торцу и расположенного на глубине r_{qo} :

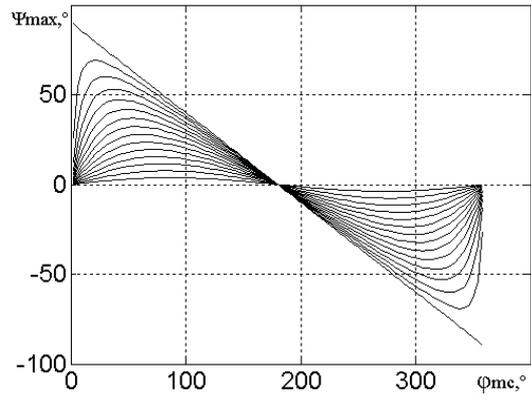
а - $r_{qo} = 0.01$ м, б - $r_{qo} = 0.075$ м, в - $r_{qo} = 0.12$ м

Рис. 8. Сравнение траекторий АР-оценок направлений максимумов угловых спектров (штриховая) и геометрических направлений относительно траверса из центра базы антенны (сплошная) для ограниченного осесимметричного источника сигнала, равноудаленного от торцов и расположенного на глубине r_{qo} :

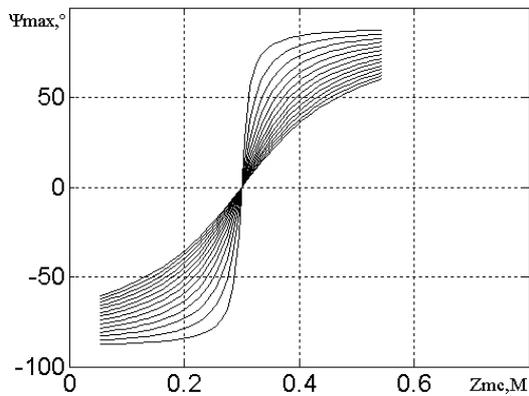
а - $r_{qo} = 0.01$ м, б - $r_{qo} = 0.075$ м, в - $r_{qo} = 0.12$ м



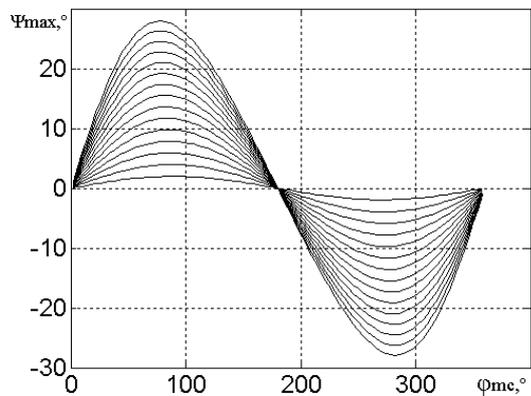
а



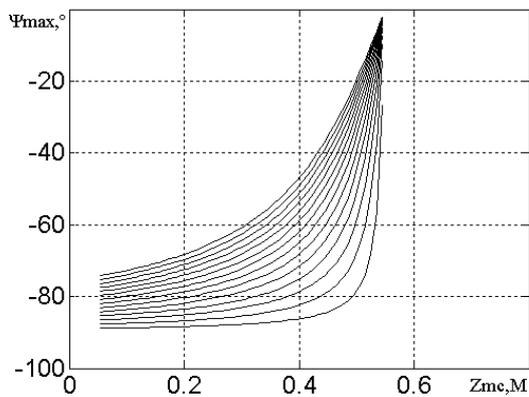
а



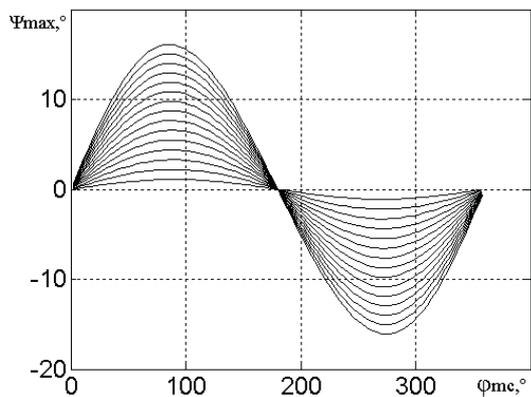
б



б



в



в

Рис. 9. Геометрические траектории, характеризующие зависимость угла прихода сигнала на антенну от дистанции вдоль образующей между центрами баз антенны и источника для радиальных заглоблений источника от 0.01 до 0.14 м, взятых с равномерным шагом $\Delta r_{qo} = 0.01$ м:
 а – источник вблизи акустически мягкого торца ($z_{qo} = 0.05$ м),
 б – источник равноудален от торцов трубы ($z_{qo} = 0.3$ м),
 в – источник вблизи акустически жесткого торца ($z_{qo} = 0.55$ м)

Рис. 10. Геометрические траектории, характеризующие зависимость углов прихода сигнала на антенну от ее углового положения относительно источника при перемещении вдоль наружной окружности трубы для радиальных заглоблений источника от 0.01 до 0.14 м, взятых с равномерным шагом $\Delta r_{qo} = 0.01$ м:
 а – центры баз вдоль образующей совпадают,
 б – дистанция между центрами баз $\Delta z = 0.25$ м,
 в – дистанция между центрами баз $\Delta z = 0.5$ м

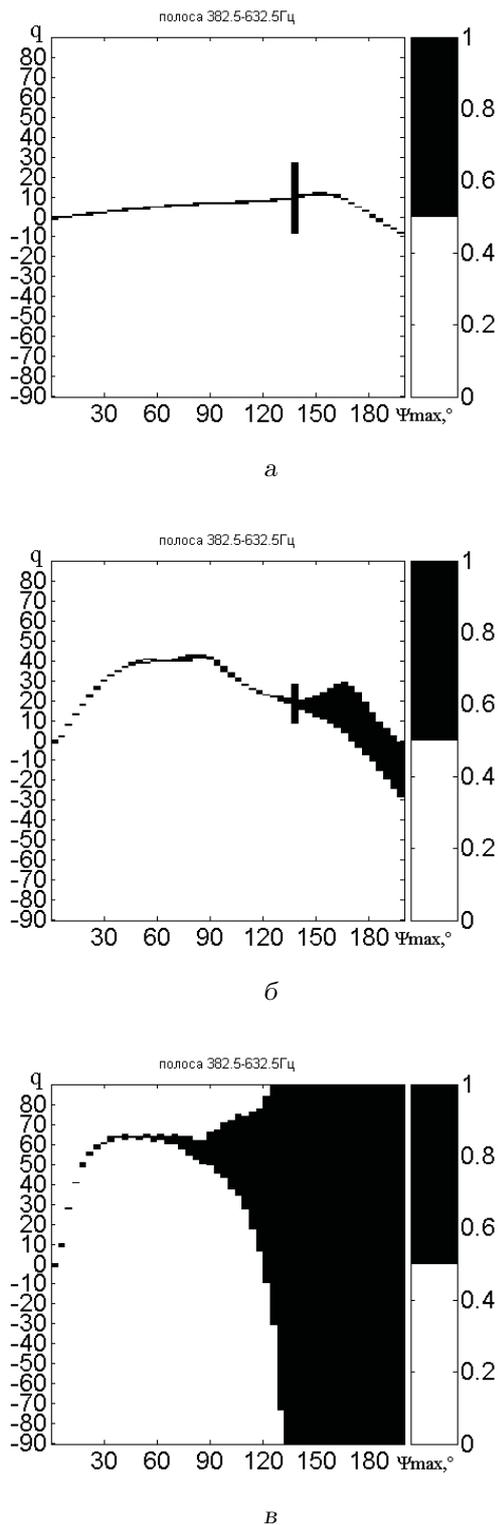


Рис. 11. Рельеф АР-оценки угловой СПМ сигнала сосредоточенного в радиальной плоскости $\phi_{qo} = 0^\circ$ источника, расположенного на глубине r_{qo} :
 а - $r_{qo} = 0.01$ м, б - $r_{qo} = 0.075$ м, в - $r_{qo} = 0.12$ м

жной окружности трубы. При этом за счет кривизны дуги траектории, по которой смещается антенна, указанная схема оказывается менее критичной к возможному выходу угла прихода сигнала за пределы информативного сектора $\pm(45 \dots 60)^\circ$ относительно траверса при удалении антенны от источника. Рассмотрим этот случай более детально в следующем разделе.

2.3. Особенности угловых спектров объемных источников при смещении линейной антенны вдоль дуги наружной окружности трубы

Для начала исследуем особенности структуры угловых спектров сосредоточенных источников сигнала. На рис. 10 изображены геометрические траектории, характеризующие зависимость углов прихода сигнала на антенну от ее углового положения относительно источника при перемещении вдоль наружной окружности трубы для значений радиального заглубления источника, соответствующих интервалу (0.01 ... 0.14) м. При проведении расчетов предполагалось, что угловое положение центра локализованного по углу источника определяется как $\phi_{qo} = 0^\circ$. На рис. 10, а приведены данные для случая, когда точечный источник и приемники антенны расположены в пределах плоскости, ограниченной окружностью, по дуге которой перемещается антенна, а на рис. 10, б и в – для случая, когда источник и антенна расположены в плоскостях, ортогональных оси цилиндра и смещенных вдоль нее на величину Δz ($\Delta z = 0.25$ и 0.5 м соответственно).

Анализ результатов показывает, что в данной схеме измерений при удалении антенны от источника сначала наблюдается резкий рост отклонения угла прихода сигнала от траверса, а затем – снижение его величины. При этом наибольшие отклонения отмечаются для приповерхностного положения источника сигнала – они могут заметно превышать оговоренный выше диапазон допустимых значений. Вместе с тем, приведенные данные показывают, что можно выделить участок дуги окружности, на котором сигналы будут попадать в допустимый сектор углов относительно траверса антенны, определяемый интервалом $\pm(45 \dots 60)^\circ$.

Для того, чтобы показать это, рассмотрим наименее благоприятную для первой схемы измерений ситуацию, когда источник протяжен на всю длину трубы: $z_{q1} = 0$ м, $z_{q2} = 0.6$ м. Исследуем сначала особенности структуры угловых спектров источников, сосредоточенных в радиальной плоскости, определяемой направлени-

ем $\phi_{q1} = \phi_{q2} = \phi_{q0} = 0^\circ$ при вариации заглубления источника. На рис. 11 приведены рельефы угловых спектров мощности для источников, расположенных на глубинах $r_{q0} = 0.01, 0.075$ и 0.12 м (графики а, б и в соответственно). По оси абсцисс отложены радиальные угловые координаты центра базы ϕ_{mc} антенны, смещаемой вдоль образующей трубы, а по оси ординат – направления q , отсчитываемые относительно траверса антенны.

Сравнительный анализ представленных графиков показывает, что при варьировании глубины расположения источника структура АР-оценок угловой СПМ претерпевает существенные изменения. В частности, с ростом заглубления источника траектория максимумов угловой СПМ локализуется вблизи траверсных направлений антенны, независимо от ее положения на дуге окружности трубы. При этом структура траектории максимумов достаточно хорошо согласуется с треком геометрических направлений из центра базы антенны на источник в той точке, где он пересекает плоскость, ограниченную окружностью, по которой перемещается антенна.

Этот вывод наглядно иллюстрируется представленными на рис. 12 графиками траекторий максимумов АР-оценок СПМ и соответствующих траекторий геометрических направлений на источник сигнала при вариациях его заглубления. Обратим внимание на то, что здесь использована полярная система координат. В радиальном направлении отложены абсолютные нормированные значения углов $\Psi_{\max n} = |\Psi_{\max}/90|$, соответствующих максимумам АР-оценок угловых СПМ, а также геометрическим направлениям на источник сигнала относительно траверса антенны. Полярный угол ϕ_{mc} характеризует положение центра базы антенны при ее перемещении вдоль дуги наружной окружности трубы. Заметим, что использованная процедура нормировки оценок угла Ψ_{\max} необходима для корректного и наглядного представления результатов, так как при этом нормированные значения удовлетворяют условию $0 \leq \Psi_{\max n} \leq 1$.

При смещении центра базы приемной антенны относительно источника сигнала в пределах дуги окружности цилиндра, где направления прихода сигнала от источника относительно траверса антенны ограничены сектором $\pm(45 \dots 60)^\circ$, наблюдается хорошее согласование АР-траектории максимумов угловых СПМ с геометрическими оценками. Исключение составляют наиболее удаленные от источника участки, на которых заметно снижается отношение сигнал/помеха и, соответственно, растут флуктуации АР-оценок угловой СПМ.

Наиболее эффективным с точки зрения дости-

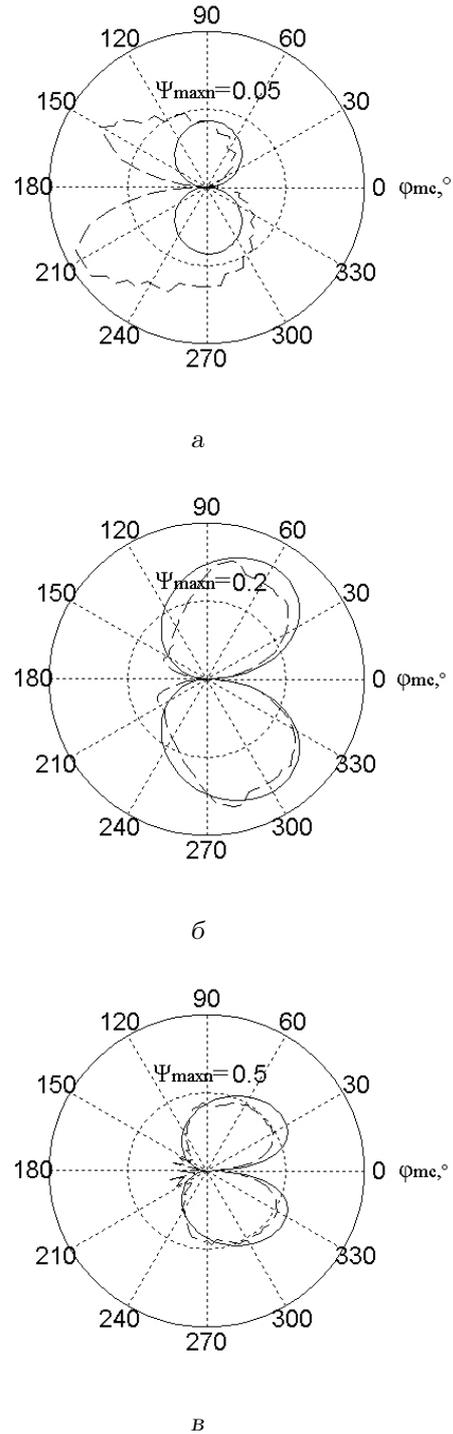


Рис. 12. Сравнение траекторий АР-оценок направлений максимумов угловых спектров (штриховая) и геометрических направлений относительно траверса из центра базы антенны (сплошная) для сосредоточенного в радиальной плоскости $\phi_{q0} = 0^\circ$ источника сигнала, расположенного на глубине r_{q0} :

а – $r_{q0} = 0.01$ м, б – $r_{q0} = 0.075$ м, в – $r_{q0} = 0.12$ м

жения максимальной разрешающей способности по заглублиению источника следует считать сдвиг углового положения центра базы антенны относительно радиальной плоскости, в окрестности которой локализован источник, на угол порядка $|\phi_{mo} - \phi_{qo}| = \pm 90^\circ$. Это обеспечивается наблюдающейся в данном случае хорошей согласованностью трека максимумов с треком геометрических направлений.

Для практики более характерно распределение источника в пределах некоторого радиального сектора углов. В этой ситуации на трассе смещения антенны вдоль дуги наружной окружности трубы можно выделить два участка. На первом из них антенна располагается в пределах сектора, ограничивающего область, в которой сосредоточен источник сигнала. При этом АР-оценки максимума угловой СПМ, как и в первой схеме измерений, сосредоточены в окрестности направления траверса антенны. На втором участке, когда антенна выходит за пределы сектора, заключающего в себя источник, оценки максимума угловой СПМ будут отклоняться от траверса антенны в сторону источника. Это позволяет использовать для локализации последнего вторую схему измерений угловой СПМ.

В качестве иллюстрации на рис. 13 приведены графики АР-оценок угловой СПМ сигнала расположенного на глубине $r_{qo} = 0.12$ источника для нескольких вариантов его трансверсальной протяженности. Как видно отсюда, в окрестности радиальных границ источников наблюдается рост отклонения угла прихода сигналов относительно траверса антенны. При этом точность локализации границ радиального сектора источника возрастает при возрастании его угловой ширины.

Таким образом, АР-оценка угловой структуры СПМ полей ограниченных источников позволяет не только выявлять их, но и определять соответствующую область пространственной локализации. В частности, эта информация может оказаться полезной для повышения эффективности диагностики структуры таких артефактов как источники дополнительных звуков дыхания.

Отметим, что в данных примерах рассматривался протяженный на всю длину трубы некогерентный источник сигнала. На практике же источники могут иметь ограниченную протяженность по длине, а область их локализации может не совпадать с плоскостью, содержащей дугу, вдоль которой перемещается антенна. Как видно из рис. 10, б и в, в этом случае область, соответствующая максимальной разрешающей способности по глубине расположения источника, также концентрируе-

тся в окрестности, где $|\phi_{mo} - \phi_{qo}| = \pm 90^\circ$. Вместе с тем, при увеличении разноса указанных двух плоскостей наблюдается уменьшение сектора углов, в пределах которого могут приходить сигналы от источника. Указанное обстоятельство, наряду с ухудшением отношения сигнал/помеха, вызванным удалением антенны от источника, будет приводить к снижению точности оценивания угловой СПМ, а значит, и заглублиения источника. Поэтому целесообразным представляется располагать антенну в одной плоскости с локализованным по пространственным координатам источником сигнала. Для обеспечения этого условия достаточно с помощью предложенных схем измерений предварительно оценить область пространственной локализации проекции источника на поверхность трубы.

ВЫВОДЫ

На основе процедуры АР-оценивания угловой СПМ проведен численный анализ особенностей структуры угловых спектров для моделей поверхностных и объемных некогерентных источников при вариациях их протяженности и области пространственной локализации вдоль оси трубы. Рассмотрены два варианта расположения антенны на поверхности трубы и соответствующие две схемы ее перемещения, используемые при формировании рельефов АР-оценок угловых СПМ. В первом случае антенна ориентирована и перемещается вдоль образующей трубы, а во втором – вдоль дуги ее наружной окружности.

Показано, что на основе анализа структуры рельефов АР-оценок угловых СПМ источников некогерентных сигналов можно определить область их пространственной локализации. Сформулированы требования ко взаимной расстановке антенны и источника сигналов, обеспечивающие получение достоверных оценок области пространственной локализации источника:

- 1) угловое положение источника относительно траверса антенны должно соответствовать информативному сектору углов $\pm(45 \dots 60)^\circ$;
- 2) расстояние от источника до антенны должно превышать длину волны в информативной полосе частот;
- 3) на заданном интервале дистанций между источником и антенной должен быть обеспечен уровень отношения сигнал/помеха, достаточный для получения состоятельных оценок.

Рассмотрена возможность оценивания глубины расположения источников, локализованных по

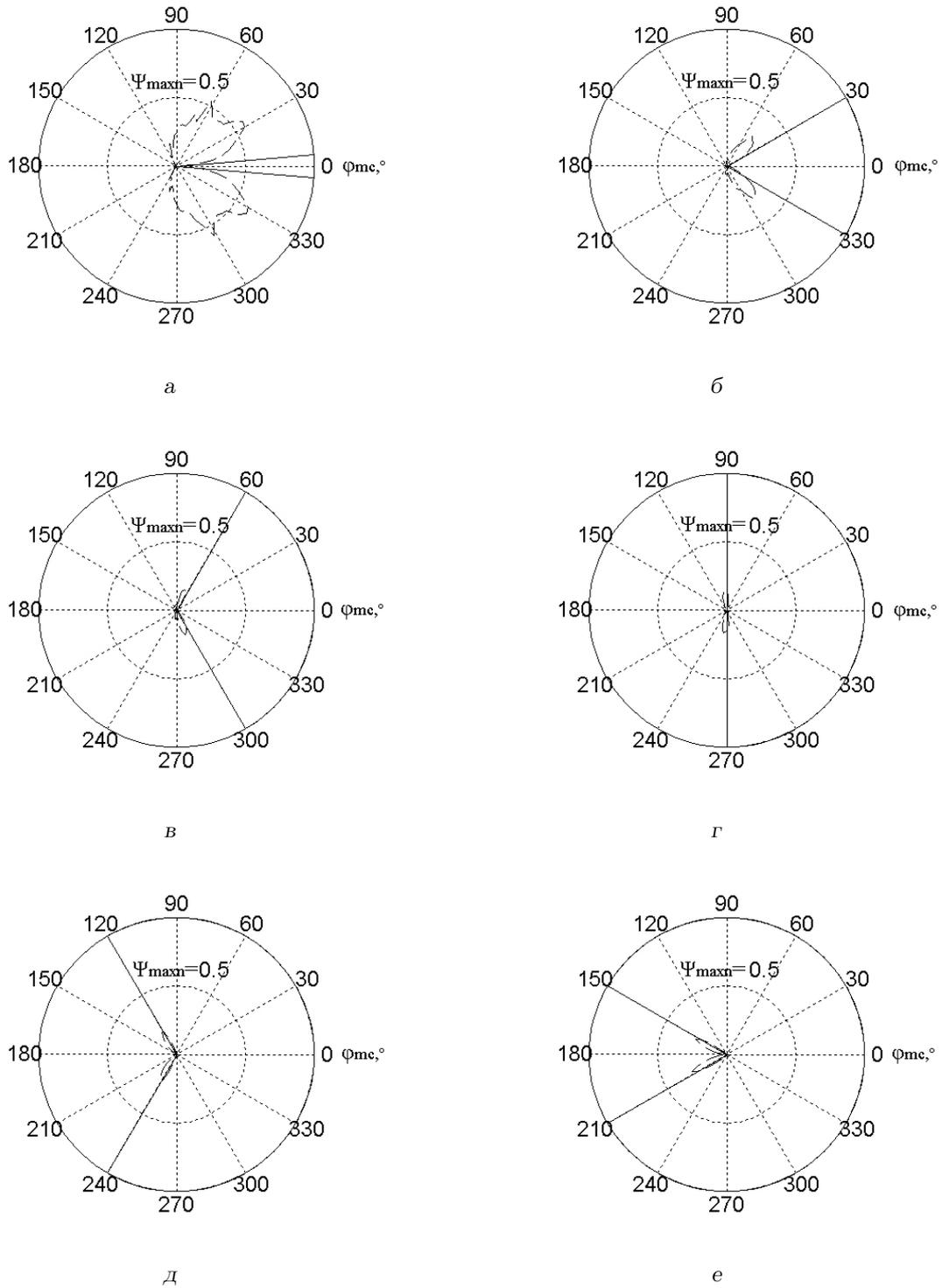


Рис. 13. Сравнение траектории АР-оценок направлений максимумов угловых спектров (штриховая) с угловым положением радиального сектора $\{\phi_{q1}; \phi_{q2}\}$ (сплошная), в пределах которого сосредоточен источник, расположенный на глубине $r_{q0} = 0.12$ м:

а - $\phi_{q1} = -5^\circ, \phi_{q2} = 5^\circ$; б - $\phi_{q1} = -30^\circ, \phi_{q2} = 30^\circ$; в - $\phi_{q1} = -60^\circ, \phi_{q2} = 60^\circ$;
 г - $\phi_{q1} = -90^\circ, \phi_{q2} = 90^\circ$; д - $\phi_{q1} = -120^\circ, \phi_{q2} = 120^\circ$; е - $\phi_{q1} = -150^\circ, \phi_{q2} = 150^\circ$

пространственным координатам. Показано, что при ограниченной протяженности вдоль образующей эффективную оценку положения заглубленного источника можно получить с помощью первой схемы измерений. Для приповерхностных же источников целесообразнее применять вторую схему. При этом необходимо, чтобы источник был локализован по углу.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы глубоко признательны академику НАН Украины профессору В. Т. Гринченко за постоянное внимание и поддержку данного направления исследований.

1. Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.) Адаптивная обработка сигналов дыхания при ограниченной априорной информации // Акуст. вісн.– 2008.– **11**, № 1.– С. 32–50.
2. Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.)

Адаптивное обнаружение и визуализация локальных изменений акустических характеристик объектов // Акуст. вісн.– 2009.– **12**, № 1.– С. 43–63.

3. Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.) Исследование эффективности использования авторегрессионного спектрального оценивания угловых спектров акустических полей для неинвазивного выявления артефактов в ограниченных объектах // Акуст. вісн.– 2012.– **15**, № 1.– С. 43–63.
4. Гринченко В. Т., Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.) Модельные оценки потенциальной эффективности обнаружения коаксиальных неоднородностей внутри стенки конечной цилиндрической трубы // Акуст. вісн.– 2004.– **7**, № 2.– С. 42–54.
5. Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.) Особенности спектрального анализа низкочастотных тонов акустических кардиосигналов // Акуст. вісн.– 2013–2014.– **16**, № 1.– С. 33–46.
6. Арсенин В.Я. Методы математической физики и специальные функции.– М.: Наука, 1974.– 432 с.
7. Крижановский В. В., Крижановский В. В. (мл.) Структура и возможности программного обеспечения для компьютерной системы регистрации, анализа и классификации звуков дыхания // Акуст. вісн.– 2003.– **6**, № 4.– С. 33–45.