

УДК 534.23

МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОВОГО ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМОГО МОНОПОЛЯМИ, РАСПОЛОЖЕННЫМИ НА ПОСТУПАТЕЛЬНО ДВИЖУЩЕМСЯ КОЛЬЦЕ

Бубнов Евгений Яковлевич¹, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры физики
e-mail: kaf_phys@wsuvt.ru

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В докладе выполнены теоретические исследования акустического излучения, создаваемого дискретными монополями, расположенными на поступательно движущемся кольце. Начальные фазы излучения монополей равны полярному углу их расположения. Расчет показал, что в зависимости от ориентации кольца по отношению к вектору скорости движения угловое распределение амплитуды давления существенно изменяется. Физической причиной деформации диаграммы направленности излучения является возникновение за счет фактора движения дополнительных фазовых задержек между источниками. Выполнен расчет диаграммы направленности амплитуды давления излучателя с учетом различного расположения плоскости кольца к вектору скорости его движения.

Ключевые слова: кольцевая антенна, противофазные монополи, скорость движения, анизотропная следа, акустическое поле, дополнительные фазовые набег, диаграмма направленности.

MODELING OF THE CHARACTERISTICS OF THE SOUND FIELD CREATED BY MOVING OPPOSITE-PHASE MONOPOLES ARRANGED IN A RING

Evgeny Ya. Bubnov¹, Associate Professor, Candidate of Technical Sciences
e-mail: kaf_phys@vsuwt.ru

¹ Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The paper presents theoretical studies of acoustic radiation generated by discrete monopoles located on a on a forward moving ring. The initial radiation phases of the monopoles are equal to the polar angle of their location. The calculation showed that, depending on the orientation of the ring relative to the velocity vector, the angular distribution of the pressure amplitude changes significantly. The physical reason for the deformation of the radiation pattern is the occurrence of additional phase delays between the sources due to the motion factor. The radiation pattern of the pressure amplitude of the radiator is calculated, taking into account the different location of the ring plane to the velocity vector of its movement.

Keywords: ring antenna, antiphase monopoles, velocity, anisotropic trace, acoustic field, additional phase raids, radiation pattern.

Излучение акустических полей движущихся источников обладает физическими особенностями по сравнению с неподвижными излучателями. Известный всем эффект Доплера связан с изменением частоты звуковой волны, который возникает как для движущихся приемников, так и источников. Кроме того, движение точечных источников звука или среды даже в случае изотропного излучения приводит к асимметричному характеру распределения амплитуд давления звука [1, 2].

Как отмечается в работе [1] движущаяся среда, в которой происходит распространение звуковой волны, эквивалентна неподвижной анизотропной среде. По аналогии с электродинамикой для анизотропной воздушной среды можно ввести главную ось анизотропии, относительно которой характеристики акустического поля будут зависеть от направления. Конкретно анизотропный характер среды проявляется через фазовую скорость распространения звука, представляющую собой векторную сумму скорости волны в неподвижной среде и скорости движения среды. Для звуковых волн актуальной акустической характеристикой излучения, зависящей от угла наблюдения, является диаграмма направленности (ДН) источника и тогда следует ожидать, что явление анизотропии воздушной среды будет существенно влиять именно на угловое распределение источника звука. Важно заметить, что дополнительная деформация ДН будет происходить не за счет линейного или пространственного распределения источников излучения из которых состоит антенна, а путем воздействия этой уникальной среды. Как и в электродинамике следует ожидать, что влияние анизотропии среды на ДН антенны будет существенно зависеть от ее ориентации относительно ее главной оси. В частности, в статье [3], где выполнены расчеты звукового поля для движущейся кольцевой антенны, состоящей из синфазных дискретных гармонических монополей, показано появление дополнительных фазовых набегов, изменяющих распределение амплитуды давления от угла наблюдения.

Как продолжение работы [3] в настоящей статье выполнены расчеты звукового поля монополей, расположенных на поступательно движущемся кольце. В отличие от приведенной выше публикации начальные фазы излучения источников равны полярному углу их расположения по окружности кольца. Такая связь между указанными характеристиками приводит к тому, что для любых двух пар монополей, расположенных на одном диаметре, их фазы будут различаться на 180° , то есть, источники звука становятся противофазными. Этот закон изменения начальных фаз имеет место для звука вращения винтов и, следовательно, решение этой задачи может быть использовано для моделирования таких излучателей.

Кроме того, в статье рассмотрена более общая ситуация, когда плоскость кольца наклонена от плоскости y, z под углом δ , отсчитываемом от положительного направления оси z . (см. рис.1). Справа на рис. 1 для наглядности приведено сечение рисунка в плоскости x, z .

На кольце радиуса R эквидистантно расположены n монопольных источников, а в геометрическом центре кольца поместим начало декартовой системы координат x, y, z . Тогда при $\delta=90^\circ$ конфигурация излучателей будет соответствовать винту самолета, при $\delta=0^\circ$ - вертолетному винту.

Как и в работе [3] источник и наблюдатель движутся в связанной системе координат со скоростью v , а объемная скорость монополей изменяется во времени по закону $e^{j\omega t}$.



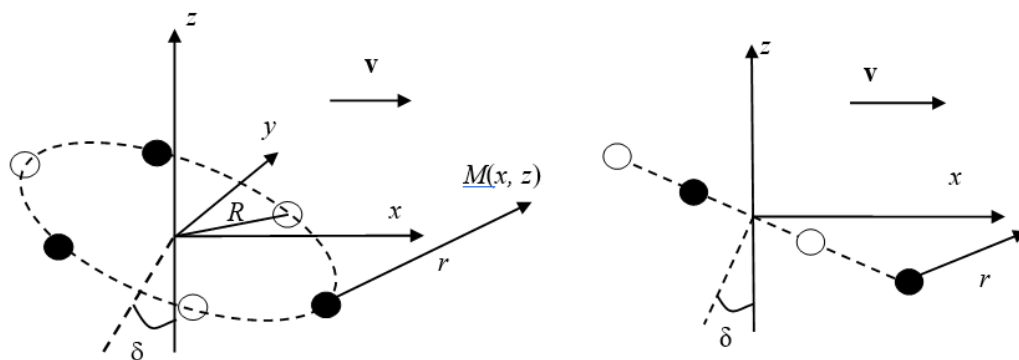


Рисунок 1 – Расположение кольца с монополями в трехмерном и двумерном изображении

Для расчета звукового давления, создаваемого i -ым движущимся монополем, формулу статьи [5] модернизируем с учетом ненулевой начальной фазы излучения равной полярной координате его расположения на кольце.

$$p_i = \frac{j\omega\rho Q e^{j(\omega t - k\sigma_i - \theta_i)}}{4\pi r} \quad (1)$$

где Q —объемная скорость монополя (одинаковая для всех монополей);
 ρ —плотность среды;
 $k=\omega/c$ —волновое число

$r_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + \beta^2[(y - y_i)^2 + (z - z_i)^2]}$ – расстояние от i -ого монополя до точки наблюдения;

$$\sigma_i = \frac{M(x - x_i) + r_i}{\beta^2};$$

θ_i — начальная фаза излучения, численно равная полярной координате расположения i -ого монополя на кольце;

x, y, z – координаты точки поля давления;

x_i, y_i, z_i —координаты i -ого монополя;

$$\beta = \sqrt{1 - M^2};$$

$M = v/c$ – число Маха, v – скорость движения монополя, c —скорость звука.

Ограничимся расчетом акустическим полем излучения источника в плоскости x, z ($y=0$). Расстояние от начала координат до точки наблюдения запишем как r_0 .

Декартовы координаты монополей на кольце, обозначенные как x_i, y_i, z_i можно выразить через параметры R, θ_i, δ где угол θ_i отсчитывается от положительного направления оси y до радиуса кольца R , соединяющего i -ый монополь:

$$\begin{aligned} x_i &= R \sin \theta_i \cos \delta \\ y_i &= R \cos \theta_i \\ z_i &= R \sin \theta_i \sin \delta \end{aligned} \quad (2)$$

Из условия эквидистантного расположения монополей следует, что $\theta_i = 2\pi i/n$, где i – текущий номер монополя ($i = 1, 2, \dots, n$).

Расстояния r_i и σ_i с учетом соотношений (2) переписутся следующим образом.

$$\begin{aligned}
r_i &= r_1 - \frac{R \sin \theta_i}{r_1} (x \cos \delta + \beta^2 z \sin \delta), \\
\sigma_i &= \frac{1}{\beta^2} M (x - R \sin \theta_i \cos \delta) + \frac{r_1}{\beta^2} - \frac{R \sin \theta_i}{\beta^2 r_1} (x \cos \delta + \beta^2 z \sin \delta), \\
r_1 &= \sqrt{x^2 + \beta^2 z^2}
\end{aligned} \tag{3}$$

При вычислениях в дальней зоне вышеуказанных величин пренебрегли x_i^2, y_i^2, z_i^2 как величинами второго порядка малости по сравнению с r_1 .

Проведем замену декартовых координат x, z точки наблюдения на полярные координаты $x = r_0 \cos \varphi, z = r_0 \sin \varphi$, где $r_0 = \sqrt{x^2 + z^2}$ – расстояние от оси винта до точки наблюдения, φ – полярный угол между положительным направлением оси x и расстоянием r_0 .

Используя принцип суперпозиции, получаем формулу для расчета давления, создаваемого суммой монополей, расположенных на кольце

$$\begin{aligned}
p &= \sum_{i=1}^n \frac{j\omega R Q e^{j\omega t} e^{-j\omega r_0 (M \cos \varphi + \sqrt{1-M^2 \sin^2 \varphi}) / c\beta^2}}{4\pi r_0 \sqrt{1-M^2 \sin^2 \varphi}} \times \\
&\times e^{\frac{j\omega R}{c\beta^2} [(M \sin \theta_i \cos \delta + \cos \varphi \sin \theta_i \cos \delta + \beta^2 \sin \varphi \sin \theta_i \sin \delta) / \sqrt{1-M^2 \sin^2 \varphi}]} e^{-j\theta_i}
\end{aligned} \tag{4}$$

Полученная формула позволяет вычислить амплитуду давления акустического поля, создаваемого движущимся кольцом и провести математическое моделирование характеристик излучения.

На рис. 2 приведены диаграммы направленности амплитуды давления для движущегося (пунктирная кривая) и неподвижного (сплошная кривая) кольца, когда вектор скорости лежит в плоскости кольца (угол $\delta = 0$)

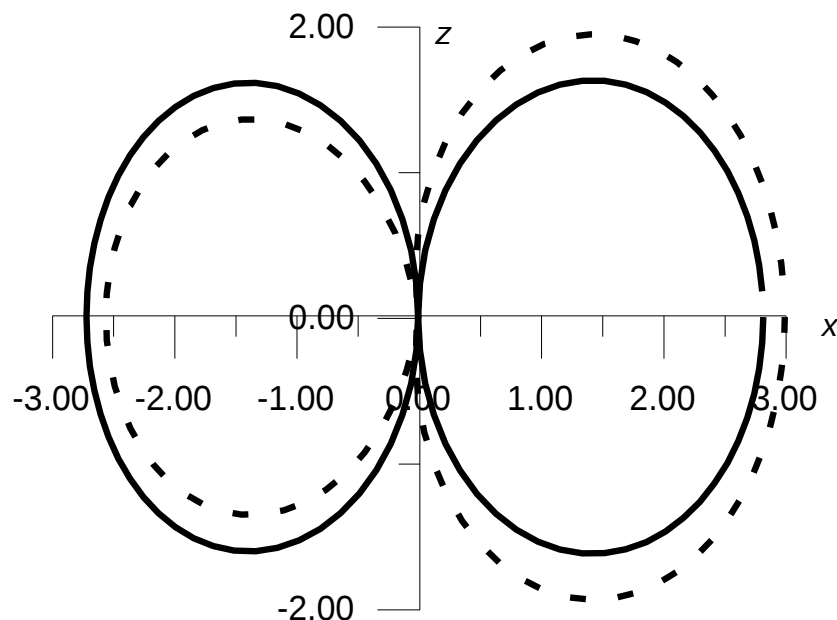


Рисунок 2 – Диаграммы направленности амплитуды давления в плоскости x, z для движущегося (пунктирная линия) и неподвижного (сплошная линия) кольца для ориентации вертолетного винта ($\delta = 0$). Число Маха $M = 0.15$

Наблюдается увеличение амплитуды давления в направлении движения по сравнению с амплитудой давления в направлении, противоположном движению.

Расчетные диаграммы направленности амплитуды давления для движущегося (пунктирная кривая) и неподвижного (сплошная кривая) кольца изображены на рис. 3 для случая, когда вектор скорости движения перпендикулярен плоскости кольца (угол $\delta = \pi/2$)

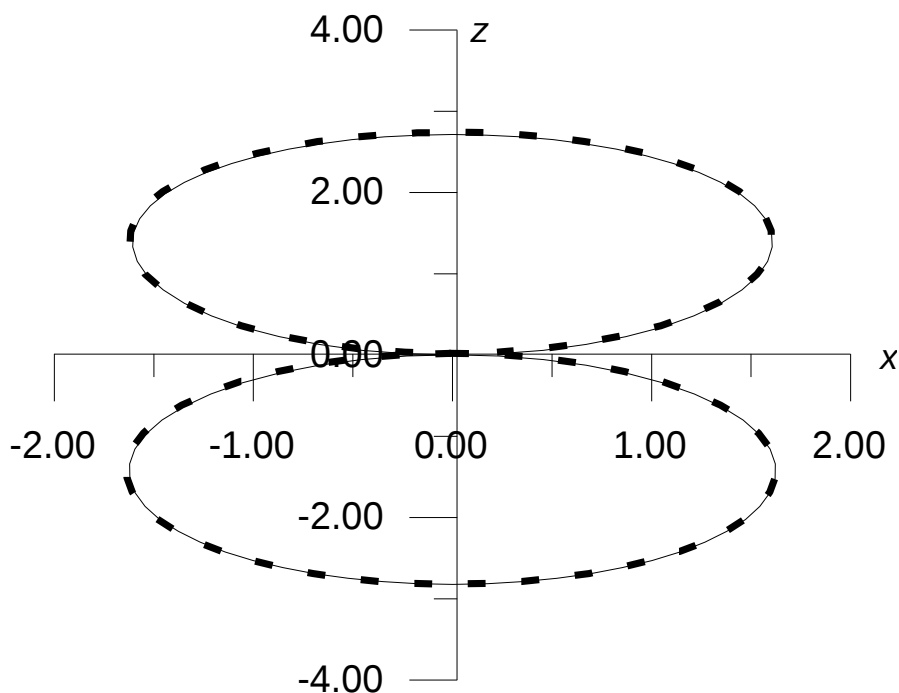


Рисунок 3 – Угловые распределения амплитуды давления в плоскости x, z для движущегося (пунктирная линия) и неподвижного (сплошная линия) кольца для ориентации самолетного винта ($\delta = \pi/2$). Число Маха $M = 0.15$

Как следует из рис. 3, эти две кривые неразличимые, то есть для такого расположения кольца влияние анизотропии среды не проявляется, и поэтому отсутствуют искажающие диаграмму направленности дополнительные фазовые набег между монополями.

Представляет интерес сравнить диаграммы направленности, полученные в настоящей работе, когда происходит излучение заявленных в постановке задачи противофазных монополей и в работе [3], когда происходит излучение синфазных движущихся монополей. Результаты такого моделирования приведены на рис. 4.

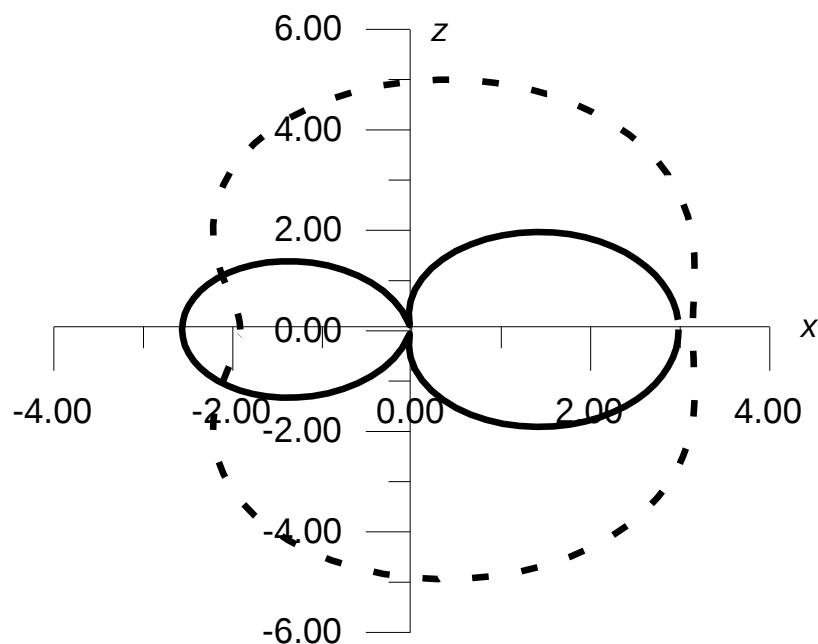


Рисунок 4 – Диаграммы направленности амплитуды давления в плоскости x, z для движущихся синфазных (пунктирная линия) и противофазных (сплошная линия) монополей, расположенных на кольце. Число Маха $M = 0.15$

Диаграмма направленности для противофазных монополей более узкая, чем для синфазных источников, что объясняется компенсацией поля звукового поля этими излучателями, но увеличенная амплитуда давления в направлении скорости движения остается неизменной для обоих видов антенн.

Таким образом, проведенное исследование звука излучения движущимися противофазными монополями подтвердило полученную ранее закономерность влияния анизотропного характера воздушной среды на диаграмму направленности через дополнительные фазовые набег. Эти результаты могут быть использованы для оценки шумности такого рода источников и их обнаружения с учетом актуальных на настоящий момент прикладных задач.

Список литературы

1. Андреев Н.Н., Русаков И.Г. Акустика движущейся среды Л.–М. Гостехтеориздат, 1934.–40с.
2. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. Наука. М., 1981–198 с.
3. Бубнов Е.Я. Акустическое излучение движущейся кольцевой антенной, состоящей из монополей // Материалы 5-го Международного научно-промышленного форума. Транспорт. Горизонты развития ФГБОУ ВО «ВГУВТ» 2025. С. 61-65.