

Акустическое поле движущейся линейной антенны распределенных поперечных квадруполей со случайным расположением излучателей

Е. Я. Бубнов

Волжская государственная академия водного транспорта (ФБОУ ВПО ВГАВТ).

Россия, 603950, Н. Новгород, ул. Нестерова, д. 5А.

E-mail: physic@aquasci-nnov.ru

Статья поступила 09.01.2014, подписана в печать 21.06.2014.

Проведено исследование акустического излучения, создаваемого движущейся линейной антенной, состоящей из распределенных поперечных квадруполей со случайным расположением диполей по длине антенны. Получены аналитические выражения акустического поля и проведено математическое моделирование угловых характеристик амплитуды давления в зависимости от скорости движения, частоты излучения и числа элементов антенны. Результаты работы могут быть использованы для интерпретации экспериментальных данных акустики газовых струй.

Ключевые слова: акустическое излучение, движущаяся линейная антенна, число элементов антенны, поперечный распределенный квадруполь, случайное расположение излучателей, дополнительные фазовые набеги, направленность излучения, частота излучения.

УДК: 534.23. PACS: 43.28.-g.

Введение

Движущая акустическая среда эквивалентна неподвижной анизотропной среде, в которой фазовая скорость распространения волны зависит от угла наблюдения [1]. В работах [2–4] исследуются акустические характеристики прямолинейно движущегося осциллирующего точечного монополя и диполя и делается вывод о влиянии движения таких источников на динамические параметры излучения. В статье [5] проведен расчет излучения гармоническим точечным диполем для случая движения источника по винтовой линии.

Новые особенности акустического излучения появляются для распределенных движущихся источников. Так, в монографии [6] выдвигается гипотеза, что при движении источников с околосветовой скоростью нельзя пренебрегать временем запаздывания внутри излучающего вихря, но конкретных расчетов влияния этого запаздывания на акустическое поле в работе не приводится. В работах [7–11] показано, что при движении кольцевых и линейных источников, состоящих из дискретных монополей или диполей в решении для акустического излучения дополнительно возникают фазовые набеги между интерферирующими волнами. Физическое происхождение этих фазовых соотношений обусловлено анизотропным характером акустической среды, а их величина зависит от взаимного расположения распределенного источника и направления движения. В работе [11] показано, что предельный переход от движущегося дискретного к точечному источнику, приводит к трансформации дополнительно образовавшихся фазовых соотношений в функцию, сохраняющую анизотропный характер излучения.

Такую более адекватную физическую модель источников можно применить к газовым струям, в которых, согласно [3], содержатся когерентные излучающие структуры с характерным размером S_{\max} много меньшим длины волны звука λ . В статье [11] теоретический расчет выполнен для линейной движущейся антенны,

состоящей из распределенных продольных квадруполей. В вычислениях предполагается, что расстояние между излучающими элементами антенны остается фиксированным.

Более реальной является ситуация, когда расстояние между дискретными источниками не является неизменным. В настоящей работе представлены результаты исследований акустического излучения линейной движущейся антенной, образованной из поперечных распределенных квадруполей, в которой расстояния между элементарными излучателями изменяются случайным образом.

1. Постановка задачи и метод ее решения

Геометрия задачи для случая четного числа распределенных квадруполей в антенне приведена на рис. 1.

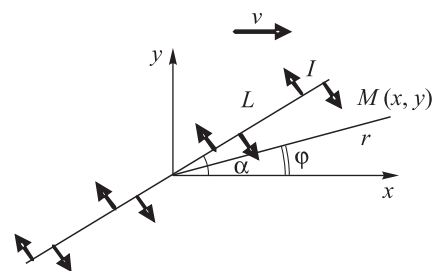


Рис. 1. Линейная антенна движущихся распределенных квадруполей со случайным характером расположения источников вдоль линии расположения. Число квадруполей в антенне четное

Поперечные квадруполи, состоящие из двух противофазных и разнесенных на расстояние l диполей, расположены вдоль прямой линии и для наглядности обведены пунктирной линией. Направление силового действия диполей изображается на рис. 1 стрелками. Расстояние между соседними квадруполями равно L . Предположим, что расстояния l и L между источниками

ми меняются случайным образом по закону равномерного распределения. Линия, соединяющая квадруполи, имеет угол α с положительным направлением оси x . Расстояние между началом координат и точкой наблюдения $M(x, y)$, находящейся в плоскости x, y в дальней зоне ($r \gg S_{\max}^2/4\lambda$) определяется через полярные координаты r и φ . Для исключения кинематического эффекта Доплера предполагается, что источник и точка наблюдения движутся с одинаковой скоростью v .

При расчете акустического излучения, создаваемого такой антенной, воспользуемся методом, изложенным в статье [5]. Для этого исходную антенну разобьем на две вспомогательные антенны. На рис. 2 приведена одна из вспомогательных антенн, представляющая собой совокупность противофазных и равноудаленных относительно начала координат диполей. Вторая вспомогательная антенна будет состоять из оставшихся равноудаленных диполей рис. 1.

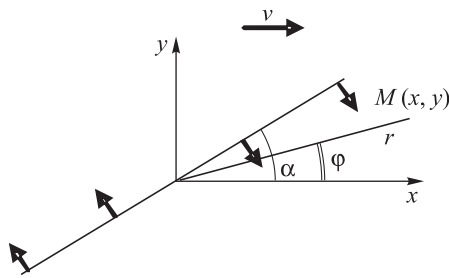


Рис. 2. Конфигурация первой вспомогательной антенны для расчета излучения исходной антенны

Расстояния между диполями для первой и второй вспомогательных антенн образуют последовательность, вычисляемую соответственно по формулам

$$S_{1n} = [2nl + (2n - 1)L] = 2l + L, \quad 4l + 3L, \quad \dots, \quad (1)$$

$$S_{2n} = [(2n - 2)l + (2n - 1)L] = L, \quad 2l + 3L, \quad \dots, \quad (2)$$

где n изменяется от 1 до N_1 , $N_1 = N/2$, N — число квадруполей в исходной антенне. Расстояния l и L между диполями принимают равновероятные случайные значения в интервале $l - \Delta l \leq l \leq l + \Delta l$ и $L - \Delta L \leq L \leq L + \Delta L$.

При расчете акустического излучения, создаваемого этими антеннами, воспользуемся формулой (5) работы [2], полученной для двух движущихся равноудаленных от начала координат противофазных диполей:

$$p = \frac{F\omega \exp \left\{ -\frac{i\omega r \left(M \cos \varphi + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi} \right)}{c\beta^2} \right\}}{2\pi cr \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \times \left(-\frac{M \sin \alpha}{\beta^2} - \frac{\cos \varphi \sin \alpha - \beta^2 \sin \varphi \cos \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right) \times \sin \left[\frac{\omega l}{2c} \left(\frac{M \cos \alpha}{\beta^2} + \frac{\cos \varphi \cos \alpha + \beta^2 \sin \varphi \sin \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right) \right], \quad (3)$$

где F — амплитуда силы диполя, ω — частота излучения, c — скорость звука, r — расстояние между точкой наблюдения и началом координат, l — расстояние между диполями, φ — полярный угол между положительным направлением оси x и направлением на точку наблюдения, $M = v/c$ — число Маха, v — скорость движения антенны, $\beta = \sqrt{1 - M^2}$. Заметим, что в уравнении (3) расстояние между противофазными диполями входит только в аргумент тригонометрической функции синуса. Кроме того, давления, вызванные двумя вспомогательными антеннами, отличаются по знаку из-за противофазного характера действия источников. Тогда с учетом сделанных замечаний давления, создаваемые n -й парой равноудаленных противофазных диполей, для первой и второй вспомогательных антенн определяются формулами

$$p_{1n} = \frac{F\omega \exp \left\{ -\frac{i\omega r \left(M \cos \varphi + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi} \right)}{c\beta^2} \right\}}{2\pi cr \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \times \left(-\frac{M \sin \alpha}{\beta^2} - \frac{\cos \varphi \sin \alpha - \beta^2 \sin \varphi \cos \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right) \times \sin \left[\frac{\omega [2nl + (2n - 1)L]}{2c} \right] \times \left(\frac{M \cos \alpha}{\beta^2} + \frac{\cos \varphi \cos \alpha + \beta^2 \sin \varphi \sin \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right), \quad (4)$$

$$p_{2n} = -\frac{F\omega \exp \left\{ -\frac{i\omega r \left(M \cos \varphi + \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi} \right)}{c\beta^2} \right\}}{2\pi cr \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \times \left(-\frac{M \sin \alpha}{\beta^2} - \frac{\cos \varphi \sin \alpha - \beta^2 \sin \varphi \cos \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right) \times \sin \left[\frac{\omega [(2n - 2)l + (2n - 1)L]}{2c} \right] \times \left(\frac{M \cos \alpha}{\beta^2} + \frac{\cos \varphi \cos \alpha + \beta^2 \sin \varphi \sin \alpha}{\beta^2 \sqrt{1 - M^2 \sin^2 \varphi}} \right), \quad (5)$$

где индексы 1 и 2 относятся соответственно к первой и второй антеннам. Суммарное давление, создаваемое всеми распределенными квадруполями обеих антенн, представлено в виде

$$p = \sum_{n=1}^{N_1} p_{1n} + \sum_{n=1}^{N_1} p_{2n}. \quad (6)$$

Аналогичные соотношения можно получить и для движущейся акустической антенны, содержащей нечетное число квадруполей. В этом случае для вспомо-

гательных антенн расстояния между равноудаленными диполями равны

$$S_{3n} = [(2n - 1)l + (2n - 2)L] = l, \quad 3l + 2L + \dots \quad (7)$$

для первой антенны и

$$S_{4n} = [(2n - 1)l + 2nL] = l + 2L, \quad 3l + 4L + \dots \quad (8)$$

для второй антенны, где $N_1 = |N/2| + 1$. Для расчета давления, создаваемого такой акустической антенной, можно использовать выражения (4) и (5), проводя в них замену расстояний S_1, S_2 на S_3, S_4 , и выполняя суммирование давления по формуле (6).

2. Расчет характеристик акустического поля

Полученные уравнения (4)–(8) позволяют провести расчет акустического излучения, создаваемого движущейся линейной антенной, состоящей из любого числа распределенных поперечных квадрупольей. Ниже представлены результаты математического моделирования углового распределения акустического давления в зависимости от скорости движения антенны, частоты излучения и числа излучающих элементов для четного числа квадрупольей. Чтобы выявить влияние эффекта анизотропии среды, амплитуда давления нормирована на величину $F\omega/(2\pi cr)$.

На рис. 3 приведены кривые углового распределения амплитуды давления в зависимости от скорости движения.

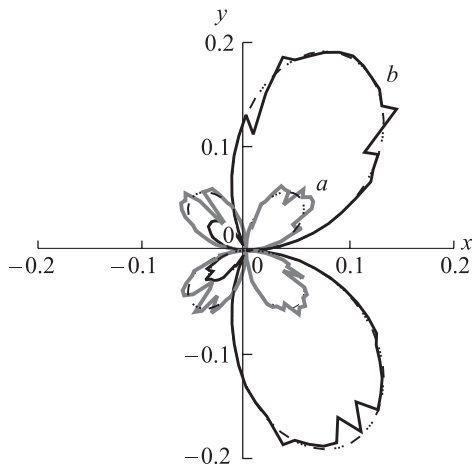


Рис. 3. Угловое распределение амплитуды акустического давления, создаваемого движущейся антенной в зависимости от скорости движения: *a* — $M=0$, *b* — $M=0.5$. Число квадрупольей в антенне $N=20$, частота излучения $\omega = 1000$ рад/с, относительная ошибка расположения диполей $\delta l = \delta L = 0.1$, $\alpha = 0$

Для сравнения на рис. 3 пунктирными линиями изображены диаграммы направленности амплитуды давления при случайном положении диполей. Как и в работах [2–3, 5], движение антенны приводит к существенному увеличению амплитуды давления акустической волны в направлении движения. Физической причиной деформации диаграммы направленности по сравнению с неподвижными источниками является анизотропный характер среды, приводящий к появлению дополнительных фазовых набегов $\omega S_n M / (2c\beta^2)$ между

излучаемыми сигналами. Анализ кривых показывает, что при увеличении скорости движения антенны происходит поворот лепестков углового распределения, причем в направлении движения лепестки диаграммы направленности давления поворачиваются к оси y , а в обратном направлении лепестки углового распределения прижимается к оси x . Физически это объясняется конкурирующим действием фазовых соотношений, вызванных пространственным разнесением излучателей и анизотропией среды. Кроме того, отмечаются незначительные флуктуации амплитуды давления, обусловленных случайным расположением элементов антенны относительно средних величин, что объясняется усредняющим действием противофазных излучателей. В этом случае при равномерном законе распределения положения источников относительно среднего значения приблизительно для половины пар диполей расстояние l_i между ними увеличивается, что приводит к увеличению амплитуды давления, а для другой половины пар диполей расстояние между ними уменьшается, что соответственно уменьшает амплитуду давления указанных пар. Таким образом, в среднем суммарная амплитуда давления изменяется незначительно. Аналогичные рассуждения можно привести для случая вариации расстояния L_i между квадрупольями.

Исследуем зависимость давления движущейся антенны от частоты излучения. На рис. 4 приведены угловые зависимости амплитуды давления для двух излучаемых частот ω и 3ω .

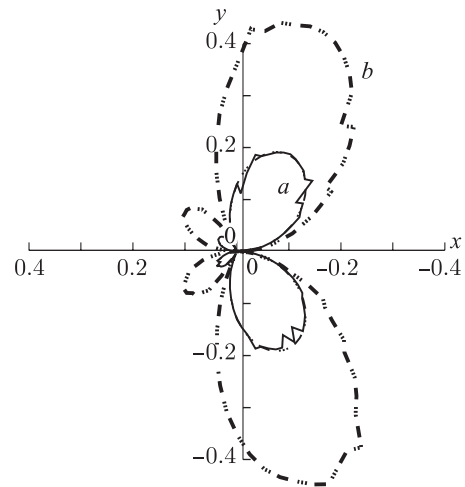


Рис. 4. Угловое распределение амплитуды акустического давления, создаваемого движущейся антенной в зависимости от частоты излучения: *a* — $\omega = 1000$ рад/с, *b* — $\omega = 3000$ рад/с. Число квадрупольей в антенне $N=20$, число Маха $M=0.5$, относительная ошибка расположения диполей $\delta l = \delta L = 0.1$, $\alpha = 0$

Как следует из анализа кривых рис. 4 при увеличении частоты излучения происходит увеличение амплитуды давления и существенный поворот лепестков к оси y в передней полусфере. В монографии [12] отмечается, что экспериментально измеренный высокочастотный шум газовой струи излучается в основном в направлении, перпендикулярном истечению, а низкочастотный — в направлении истечения, что согласуется с настоящими результатами.

Для выяснения физической причины поворота лепестков на рис. 5 приведены кривые углового распределения амплитуды акустического давления, создаваемого неподвижной антенной при частотах ω и 3ω . Как и выше, пунктирные линии на рис. 5 показывают угловые распределения амплитуды давления антенны при случайных положениях излучающих элементов.

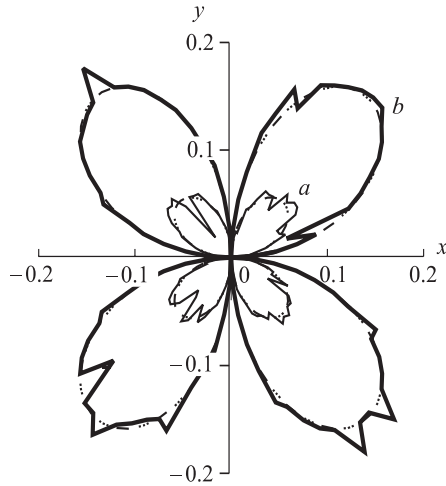


Рис. 5. Угловое распределение амплитуды акустического давления, создаваемого неподвижной антенной в зависимости от частоты излучения: $a - \omega = 1000$ рад/с, $b - \omega = 3000$ рад/с. Число квадрупольей в антенне $N = 20$, число Маха $M = 0.5$, относительная ошибка расположения дипольей $\delta l = \delta L = 0.1$, $\alpha = 0$

Подобный характер кривых рис. 5 позволяет сделать вывод о малом влиянии фазовых набегов, возникающих между акустическими волнами за счет пространственного разнесения элементов неподвижной антенны. Следовательно, поворот лепестков диаграммы направленности, наблюдаемый на рис. 4, обусловлен изменением фазовых набегов, вызванных движением источников.

Число квадрупольей в антенне может меняться. Математическое моделирование акустических характеристик излучения показало, что изменение числа квадрупольей в антенне и соответственно изменение ее линейного размера приводит к пропорциональному изменению амплитуды акустического давления.

Более интересной с физической точки зрения выглядит ситуация, когда изменение числа квадрупольей в антенне происходит при неизменной длине антенны, при этом средние расстояния l_i и L_i между элементами будут изменяться. На рис. 6 представлены соответствующие кривые углового распределения амплитуды давления, создаваемого движущейся антенной, для двух случаев числа квадрупольей и неизменной апертуры. Линия расположения квадрупольей антенны совпадает с направлением движения.

Диаграммы направленности для обоих случаев практически совпадают друг с другом. Этот факт можно объяснить тем, что происходит компенсация амплитуды давления, вызванной, с одной стороны, увеличением числа излучателей, а с другой стороны — увеличением порядка мультипольности антенны, состоящей из противофазных излучателей. Можно дать следующее

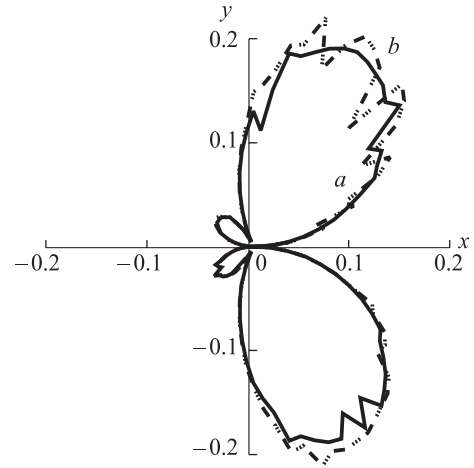


Рис. 6. Угловое распределение амплитуды акустического давления, создаваемого движущейся антенной в зависимости от числа элементов при неизменной длине антенны. $M = 0.5$, $\alpha = 0$, $N = 20$ (а), $N = 10$ (б)

качественное объяснение второму фактору. При неизменной апертуре антенны увеличение, например, числа излучателей приводит к уменьшению расстояния как между противофазными квадрупольями, так и между противофазными дипольями, из которых состоят квадрупольи, что вызовет уменьшение излучения от этих элементов и соответственно приведет к уменьшению суммарной амплитуды акустического сигнала. Таким образом, излучение одинаковых по размеру когерентных участков струи слабо зависит от числа входящих в нее источников.

Заключение

В статье получены аналитические выражения для расчета акустического давления, создаваемого движущейся антенной, образованной из поперечных распределенных квадрупольей со случайным расположением элементов. Проведенное математическое моделирование показывает, что в акустическом излучении такой антенны возникают деформации углового распределения амплитуды давления в зависимости от скорости движения, частоты излучения, числа элементов и размера антенны. Показано, что флуктуации расстояния между излучателями и изменение числа элементов при постоянной апертуре антенны несущественно изменяют характеристики акустического поля. Полученные результаты могут быть использованы для качественного объяснения экспериментальных данных акустики газовых струй, а также адаптированы при исследовании анизотропных сред в других разделах физики.

Список литературы

1. Андреев Н.Н., Русаков И.Г. Акустика движущейся среды. Л.-М., 1934.
2. Блохинцев Д.И. Акустика неоднородной движущейся среды. М., 1981.
3. Голдштейн М.Е. Аэроакустика. М., 1981.
4. Garrick I.E., Watkins C.E. // NASA report. 1954. N 1198.
5. Докучаев В.П. // Акуст. журн. 1967. **13**, № 2. С. 192.
6. Ганабов В.И., Власов Е.В., Ефимцев Б.М. и др. // Авиационная акустика. М., 1973.

7. Бубнов Е.Я. Аэроакустика // Труды XIX сессии Рос. акуст. об-ва. 2007. **3**. С. 300.
8. Бубнов Е.Я. // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. Радиофизика. 2010. № 9 (45). С. 23.
9. Бубнов Е.Я. // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. Радиофизика. 2011. № 6 (1). С. 99.
10. Бубнов Е.Я. // Вестн. Нижегород. ун-та. Сер. Радиофизика. 2012. № 2 (1). С. 51.
11. Бубнов Е.Я. // Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон. 2013. № 3. С. 34 (*Moscow University Phys. Bull.* 2013. **68**, N 3. P. 210).
12. Мунин А.Г., Самохин В.Ф., Шипов Р.А. и др. Авиационная акустика. В 2 ч. Ч. 1. Шум на местности дозвуковых пассажирских самолетов и вертолетов. М., 1986.

Acoustic irradiation of a moving uniform linear array with a transverse distribution of quadrupoles from an arbitrary disposition of radiators

E. Ya. Bubnov

*Volga State Academy of Water Transport (FBOU VPO VGAVT). Nizhny Novgorod 603950, Russia.
E-mail: physic@aqua.sci-nnov.ru.*

A study of the acoustic irradiation of a moving uniform linear array consisting of a transverse distribution of quadrupoles with an arbitrary disposition of radiators is described. Analytic expressions for the acoustic irradiation were obtained. A mathematical simulation of the pressure amplitude–angle curve vs. array speed, aerial element number, and radiation frequency was performed. The findings may be applied to the interpretation of experimental data related to gas-jet acoustics.

Keywords: acoustic irradiation, moving linear array, aerial elements' number, transversally distributed quadrupoles, arbitrary disposition of radiators, phase incursions, radiation directivity, irradiation frequency.

PACS: 43.28.–g.

Received 9 September 2014.

English version: *Moscow University Physics Bulletin* 5(2014).

Сведения об авторе

Бубнов Евгений Яковлевич — канд. техн. наук, доцент, доцент; e-mail: physic@aqua.sci-nnov.ru.