

## Особенности взаимодействия акустических волн в воздушной среде

*В.А. Воронин, А.В. Воронин*

*Южный федеральный университет*

**Аннотация:** В статье рассматриваются вопросы нелинейного взаимодействия акустических волн в воздушной среде в процессе распространения. Показывается, что коэффициент нелинейности в воздушной среде значительно превышает таковой в воде, поэтому генерация вторичных волн в воздушной среде эффективнее, чем в воде. Рассчитываются основные характеристики взаимодействия. Для реализации параметрической антенны для передачи информации узким лучом предлагается использовать в качестве преобразователей в антенне накачки высокочастотные громкоговорители с высокой чувствительностью в режиме излучения. Для уменьшения уровня боковых лепестков в характеристике направленности антенны предлагается рекомендация по расположению преобразователей в антенне накачки и согласованию их со средой с помощью акустических рупоров. В качестве исходных параметров для расчетов выбираются паспортные данные громкоговорителей. Анализируются характеристики параметрической антенны при расположении ее в воздушных потоках. Взаимодействие волн в потоке описывается неоднородным волновым уравнением, в котором влияние потока оценивается членом с конвективной производной. Рассмотрены неоднородные уравнения для различных составляющих результирующего генерируемого сигнала параметрической антенной в среде с воздушным потоком. Выведены выражения для расчета добавок к генерируемым в однородной среде сигналам для перпендикулярного и параллельного направлению распространения волн потока. Показано, что воздушный поток в ближней зоне антенны накачки увеличивает амплитуду генерируемых нелинейным взаимодействием вторичных волн. Даются рекомендации по использованию параметрической антенны для передачи информации в воздушной среде.

**Ключевые слова:** параметрическая антенна, воздушная среда, преобразователь накачки, воздушный поток, волновое уравнение.

В настоящее время получили широкое распространение акустические приборы для дистанционного исследования нижних слоев атмосферы с

целью определения различных ее параметров [1]. Результаты исследования существенно зависят от существующих условий распространения звука в атмосфере [2] и от параметров излучающих систем. Причина различий результатов исследований заключается в высокой чувствительности распространяющегося звукового излучения в атмосфере к таким параметрам как скорость и направление ветра, температура, влажность, атмосферное давление и их изменения по трассе распространения волн с одной стороны и наличие таких характеристик излучающих систем как уровень боковых лепестков в характеристике направленности, зависимость параметров характеристики направленности от частоты излучаемых волн и параметров атмосферы [3].

Для устранения различий результатов исследований от параметров атмосферы применяют многочастотные системы. Однако традиционные антенные решетки, обычно применяемые в содарах, имеют существенные недостатки, такие как зависимость ширины характеристики направленности от частоты излучаемых сигналов, большие размеры активной поверхности на низких частотах при узких характеристиках направленности. Такие решетки невозможно установить на передвижных носителях, особенно на воздушных.

Новый класс излучателей – параметрические излучающие антенны – имеют существенные преимущества перед традиционными. В параметрических антеннах излучение ведется антеннами накачки на достаточно высоких частотах, а колебания рабочих частот возникают в среде за счет нелинейного взаимодействия волн накачки в канале распространения. В результате виртуальная антенна обладает такими характеристиками как малый уровень боковых лепестков (порядка минус 50 дБ), широкий диапазон излучаемых частот (две и более октавы), узкую, не зависящую от частоты излучения характеристику направленности и малые габариты антенной системы, поскольку излучение ведется на частотах накачки. Однако

недостатками такой виртуальной антенны являются сильная зависимость уровня излучаемых волн от частоты, и параметров взаимодействия в условиях изменяющейся атмосферы.

В монографиях [4,5] рассмотрены вопросы взаимодействия акустических волн в канале распространения, построения излучающих параметрических антенн, их характеристики и сферы применения в гидроакустике.

Взаимодействие акустических волн в канале распространения можно рассмотреть, используя неоднородное волновое уравнение [4,5].

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2},$$

где  $\varepsilon$  - нелинейный параметр;  $P$  - звуковое давление;  $z$  - координата вдоль распространения волны;  $P_0$  - звуковое давление волн накачки;  $c_0$  и  $\rho_0$  - скорость звука и плотность среды.

Правая часть этого уравнения описывает виртуальные источники, образованные за счет взаимодействия (самовоздействия) первичных волн (волн накачки). Вторая производная по времени от квадрата звукового давления волн накачки описывает амплитуды и спектральный состав генерируемых волн, а коэффициент перед производной эффективность генерации вторичных волн. Сравним, как различаются эти коэффициенты для воздушной среды и водной среды при равных значениях амплитуд волн накачки. Для сравнения примем скорости звука в воде и воздухе равными 1500 и 340 м/с, а плотность 1000 и 1,29 кг/м<sup>3</sup>. Нелинейный параметр для воды  $\varepsilon = 3,5$ , а для воздуха  $\varepsilon = 1,2$ .

В результате для воды этот коэффициент приблизительно равен  $6,9 \cdot 10^{-13}$ , а для воздуха -  $6,9 \cdot 10^{-8}$ . Следовательно, генерация вторичных волн в воздухе в точке происходит значительно эффективнее, чем в воде. Эффект накопления результатов взаимодействия по мере распространения может

изменить это соотношение из-за разных длин взаимодействующих волн, разных соотношений частот генерируемых и взаимодействующих волн, разного затухания, однако эти эффекты не приводят к существенному изменению эффективности генерации волн в воде и воздухе. Этот результат отличается от сравнений, приведенных в [6], где указывается обратное, исходя из нелинейного параметра среды и высокого затухания в воздухе.

Для реализации параметрической антенны в воздушной среде выберем в качестве преобразователей для антенны накачки высокочастотные громкоговорители Hertz ST 25, собранные в антенну накачки. Такие громкоговорители имеют следующие характеристики: чувствительность в режиме излучения 107 дБ/2,83 В/м, пиковая мощность 100 Вт. Номинальное сопротивление 4 Ом, диапазон частот 3000 – 20000 Гц, диаметр корпуса 43,5 мм, диаметр излучающей поверхности 25 мм. Расчет характеристик параметрической антенны с такими преобразователями необходимо вести из расчета, что интенсивность излучения с поверхности антенны будет меньше из-за распределения ее между излучающими поверхностями преобразователей и не активной части поверхности антенны. Для уменьшения боковых лепестков в характеристике направленности антенны накачки можно рекомендовать применение рупоров для равномерного распределения излучаемой энергии по поверхности антенны накачки.

При выборе частот накачки в диапазоне 18 – 20 кГц и ширине пучка 3 градуса диаметр антенны накачки составит не более 35 см.

Ранее в [4,5] показано, что в гидродинамическом потоке характеристики параметрической антенны меняются в зависимости от скорости и направления потока. Рассмотрим влияние воздушных потоков на характеристики параметрической излучающей антенны.

При взаимодействии волн в воздушной среде с аэродинамическим потоком особенностью является большее соотношение скорости потока и

скорости распространения акустических волн и гораздо большее затухание, как волн накачки, так и волн разностной частоты. Рассмотрим характеристики поля параметрической антенны в воздушной среде.

Для анализа процесса нелинейного взаимодействия можно воспользоваться неоднородным волновым уравнением, в котором правая часть описывает нелинейное взаимодействие волн в виде суммы взаимодействий в стационарной среде и в среде с воздушными потоками.

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t}, \quad (1)$$

В выражении (1) приняты следующие обозначения:  $U$  - скорость потока ось которого расположена под углом к направлению распространения акустических волн;  $\left( \frac{\partial}{\partial t} + (U, \nabla) \right)$  - конвективная производная.

Проанализируем процесс нелинейного взаимодействия коллинеарных акустических волн в среде с компактным аэродинамическим потоком, при этом под компактным потоком будем понимать поток, который имеет границы в пределах зоны взаимодействия волн накачки. С другой стороны, размеры потока много больше длин взаимодействующих волн.

Решение уравнения (1) ведется с использованием борновского приближения, которое в данном случае сводится к пренебрежению рассеянием волн накачки на градиенте плотности воздуха, обусловленной наличием градиента давления, и сжимаемостью воздуха. В этом приближении рассеянное звуковое поле можно представить в виде двух составляющих, одна из которых описывает снос волны, а вторая рассеянное поле, такая интерпретация составляющих звукового давления возможна на основе анализа направления их распространения.

Решение для генерируемого поля представить в виде суммы двух составляющих

$$P = P_1 + P_2, \quad (2)$$

где  $P_1$  - низкочастотное поле, генерируемое волнами накачки в однородной среде, а  $P_2$  - добавка к низкочастотному полю за счет влияния движения среды.

Эти два эффекта, за счет которых появляются источники, являются эффектами одного порядка малости - второго, и, следовательно, их можно представить аддитивными.

Решения для  $P_1$  и  $P_2$  можно найти из уравнений

$$\Delta P_1 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2}, \quad (3)$$

$$\Delta P_2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} = - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t}. \quad (4)$$

Решения (3) и (4) не учитывают явлений дифракции и диссипации волн накачки и генерируемых волн и могут быть использованы для анализа поля генерируемых волн в ближней зоне параметрической антенны.

Для решения задачи взаимодействия волн с учетом дифракционных и диссипативных эффектов будем использовать уравнение Хохлова-Заболоцкой-Кузнецова (ХЗК), которое описывает взаимодействие волн в ограниченных звуковых пучках в рамках квазиоптического приближения. Заметим, что квазиоптическое приближение не рассматривает рассеяние первичных волн на неоднородностях среды [4,5].

$$\Delta P - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2} - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \left( U \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t} \right). \quad (5)$$

Запишем уравнения для  $P_1$  и  $P_2$  как

$$\Delta P_1 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_1}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P_1 = - \frac{\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \frac{\partial^2 (P_0^2)}{\partial t^2}, \quad (6)$$

$$\Delta P_2 - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 P_2}{\partial t^2} + \frac{b}{c_0^2 \rho_0} \frac{\partial}{\partial t} \Delta_{\perp} P_2 = - \frac{2\varepsilon}{c_0^4 \rho_0} \left( \vec{U}, \nabla \frac{\partial (P_0^2)}{\partial t} \right) \quad (7)$$

Решение уравнения (6) для взаимодействия волн в среде без потока получено в виде [4,5].

Уравнение (7) описывает звуковое поле, возникающее благодаря потоку. Поскольку правые части уравнений (5) и (6) имеют один и тот же порядок малости и одинаковую физическую интерпретацию их решения ведется также методом последовательных приближений.

Звуковое поле, полученное в результате взаимодействия волн в потоке, можно представить в виде двух составляющих, одна из которых описывает снос волны, а вторая рассеянное поле, такая интерпретация составляющих звукового давления возможна на основе анализа направления их распространения. Таким образом, с учетом борновского приближения представим искомое решение для  $P_2$  в виде суммы двух компонент

$$P_2 = P_r + P_z, \quad (8)$$

где  $P_z$  - вклад продольной составляющей вектора скорости неоднородного аэродинамического потока,  $P_r$  - вклад поперечной составляющей вектора скорости потока.

Решая уравнение, получим выражение для  $P_r$  в виде

$$P_r(r, z) = \left( - \frac{2\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} \right) \int_0^z e^{-\alpha z'} \int_0^{\infty} A(r', z') U_r \frac{\partial A}{\partial r'} \int_0^{\infty} J_0(v, r') \times \\ \times J_0(v, r) v \exp\left( i \frac{v^2}{2k} (z - z') \right) dv dr' dz' \quad (9)$$

а для  $P_z$  в виде

$$P_z(r, z) = \left( -\frac{2\varepsilon}{c_0^3 \rho_0} \right) \int_0^z e^{-\alpha z'} \int_0^\infty A(r', z') U_z \frac{\partial A}{\partial z'} \int_0^\infty J_0(v, r') \times \\ \times J_0(v, r) v \exp\left( i \frac{v^2}{2k} (z - z') \right) d v d r' d z' \quad (10)$$

Выражения (9), (10) дают возможность рассчитать добавку значения поля, образованного в результате взаимодействия волн в неоднородной среде, которая суммируется с полем, образованным в результате взаимодействия волн в однородной среде. Дальнейшие преобразования полученных выражений проведем с учетом следующих предположений. Пусть амплитуды волн накачки распределены по поверхности преобразователя накачки по гауссовому закону. Такое предположение используется при решении задач взаимодействия в однородной среде. При таких предположениях решение уравнения первого приближения для амплитуд волн накачки будет следующим

$$A(r, z)_{1,2} = \frac{P_{01,02}}{1 - iz / l_{D1,2}} \exp\left( -\frac{r^2}{a^2} \frac{1}{1 - iz / l_{D1,2}} \right), \quad (11)$$

где  $P_{01,02}$  - максимальные значения амплитуд накачки на поверхности преобразователя, а индексы 1 и 2 означают первую и вторую взаимодействующие волны.

Будем считать, что неоднородности в виде потока занимают всю область взаимодействия волн и скорости движения частиц в потоке равномерно распределены в пространстве взаимодействия как по продольной координате, так и по поперечной. Подставляя  $A(r, z)$  в выражения (9) и (10) и выполняя интегрирование, получим выражения для расчета добавок к полю генерируемых волн для радиальной и осевой составляющих:



$$P_r = i \frac{4\varepsilon K P_0^2}{c_0^3 \rho_0} U_r \int_0^z \frac{e^{-\alpha z'}}{(1 - iz'/l_D)^2} \frac{1}{B_1} \exp\left(-i \frac{k}{2} \frac{4r^2}{B_1}\right) dz', \quad (12)$$

где  $B_1 = 4(z - z') + ia^2 k(1 - iz'/l_D)$ .

$$P_z = \frac{4\sqrt{2\pi} \varepsilon K P_0^2 a}{c_0^3 \rho_0} U_z \int_0^z \frac{e^{-\alpha z'}}{(z - z')^{1/2} (1 - iz'/l_D)^{5/2}} \frac{1}{\sqrt{B_1}} \times$$
$$\times \exp\left(\frac{-r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1(z - z')}\right) \times$$
$$\times \left( 2I_0\left(\frac{r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1(z - z')}\right) - I_1\left(\frac{r^2 a^2 k^2 (1 - iz'/l_D)}{4B_1(z - z')}\right) \right) dz' \quad (13)$$

Анализируя эти выражения можно отметить, что и радиальная и осевая составляющая скорости потока вносит добавку в генерируемую волну. Однако даже ортогональный ламинарный поток влияет на эффективность процесса генерации волн, а такие потоки часто встречаются на практике при использовании параметрических антенн на движущихся носителях.

Исследования, проведенные методом численного моделирования, показывают, что эффективность процесса нелинейного взаимодействия в среде с потоком увеличивается. Зависимости имеют характерный для взаимодействия волн в ограниченных пучках вид – нарастание амплитуды добавки в ближней зоне антенны накачки за счет преобладания процессов генерации волн над остальными процессами, стабилизация в переходной зоне за счет конкуренции процессов генерации и дифракции и спадание в дальней зоне за счет преобладания процессов дифракции и затухания. Необходимо отметить, что фазы добавок к полю за счет потока воздуха вблизи поверхности антенны накачки различны. Так добавка за счет поперечной составляющей потока имеет одинаковую начальную фазу с волной разностной частоты, генерируемой в однородной среде, а фаза

добавки за счет продольной составляющей потока отличается на  $\pi/2$ , поэтому суммарная добавка имеет амплитуду меньшую, чем суммы амплитуд добавок. Скорость звука и затухание волн накачки в средах с потоком и без различаются незначительно. Следует ожидать, что неоднородности в виде потоков не окажут существенного влияния на характеристику направленности параметрической антенны, так как не изменяется длина зоны взаимодействия волн накачки.

Таким образом, наличие неоднородностей в среде ведет к изменению параметров среды и параметров процесса нелинейного взаимодействия волн накачки с акустическими полями и полями другой природы (пример – взаимодействие волн в однородной среде и среде с потоком воздуха). Разработанный единый подход к решению задачи нелинейного взаимодействия позволяет получить необходимые для анализа зависимости в каждом конкретном случае. Показано, что применение такого подхода приводит как к результатам, полученным другими методами, так и к оригинальным решениям, как в случае с воздушным потоком.

### Литература

1. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D. Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network. - Bound. - Layer Meteor. 143, 2012, p. 159 – 175.
2. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере. Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2013. № 2 (28). С. 86-94
3. Красненко Н.П. Методы и средства дистанционного акустического зондирования атмосферы. Методы и устройства передачи и обработки информации. 2009. № 11. С. 143-154

4. В.А.Воронин, В.П. Кузнецов, Б.Г.Мордвинов, С.П.Тарасов, В.И. Тимошенко. Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростиздат. Ростов-на-Дону. 2007. – 448 с.
5. В.А. Воронин, С.П.Тарасов, В.И. Тимошенко. Гидроакустические параметрические системы. – Ростов-на-Дону: Ростиздат. 2004. – 400 с.
6. Куличков С.Н. Нелинейная генерация низкочастотной компоненты при распространении в атмосфере интенсивной модулированной звуковой волны. Физика атмосферы и океана. 1979, Том 15, № 4. С. 384-391.

#### References

1. Kallistratova M.A., Kouznetsov R.D. Low-level jets in the Moscow region in summer and winter observed with a sodar network. Bound. Layer Meteor. 143, 2012, pp. 159 – 175.
2. Krasnenko N.P. Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravlenija i radioelektroniki. 2013. № 2 (28). pp. 86-94
3. Krasnenko N.P. Metody i ustrojstva peredachi i obrabotki informacii. 2009. № 11. pp. 143-154
4. V.A.Voronin, V.P. Kuznecov, B.G.Mordvinov, S.P.Tarasov, V.I. Timoshenko. Nelinejnye i parametriceskie processy v akustike okeana. [Non-linear and parametric processes in the ocean acoustics]. Rostizdat. Rostov-na-Donu. 2007. 448 p.
5. V.A. Voronin, S.P.Tarasov, V.I. Timoshenko. Gidroakusticheskie parametriceskie sistemy. [Parametric sonar system]. Rostov-na-Donu: Rostizdat. 2004. 400 p.
6. Kulichkov S.N. Fizika atmosfery i okeana. 1979, Tom 15, № 4. pp. 384-391.