

В.П. Мамышев, С.Л. Одинцов

Оценка влияния направленности излучения на интерференцию звуковых волн на коротких приземных трассах

Институт оптики атмосферы СО РАН, г. Томск

Поступила в редакцию 16.04.2007 г.

Обсуждается эффект влияния направленности источника звукового излучения на интерференцию прямой и отраженной от поверхности волны при распространении звука на коротких приземных трассах. Приводятся результаты сравнения теоретических и экспериментальных данных.

При изучении процессов распространения звуковых волн вдоль приземных трасс необходимо учитывать многочисленные факторы, влияющие на амплитудные и фазовые характеристики сигналов. Одним из таких факторов является интерференция — суммирование в точке приема прямой и отраженной от подстилающей поверхности волны. Как теоретические, так и экспериментальные работы по интерференции звука в атмосфере в основном посвящены изучению статистических характеристик сигналов. При этом интерпретация полученных результатов базируется, как правило, на предположении, что излучаемые звуковые волны являются сферическими или плоскими.

В статье акцентируется внимание на эффекте, возникающем при работе с неизотропной диаграммой направленности источника звукового излучения. Его учет помогает избежать неточностей в интерпретации экспериментальных результатов. Наиболее просто данный эффект можно продемонстрировать, зафиксировав геометрию эксперимента и варьируя только несущую частоту звуковых сигналов. Ниже кратко излагаются методическая часть работы, а также результаты экспериментов, проведенных на короткой трассе над жесткой площадкой (плоской крышей здания) в условиях слабого ветра.

Для проверки теоретических моделей и изучения влияния атмосферных условий на интерференцию звуковых волн был создан акустический стенд, содержащий: управляющий компьютер, генерирующий сигналы через стандартную звуковую плату и принимающий сигналы через специализированный многоканальный АЦП; усилитель мощности излучаемых сигналов; рупорный источник звукового излучения; приемные микрофоны, расположенные на разных уровнях в вертикальной плоскости и подключенные к соответствующему многоканальному усилителю принимаемых сигналов, от которого сигналы поступали в АЦП. Для контроля текущих атмосферных условий использовалась ультразвуковая метеостанция,

расположенная рядом с трассой распространения звука на высоте примерно 1,6 м. Режим работы стенда заключался в последовательном излучении набора частот с автоматическим переходом от одной частоты к другой. Схема эксперимента представлена на рис. 1.

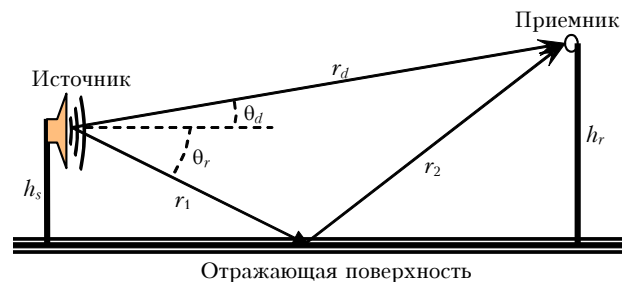


Рис. 1. Схема эксперимента

Предполагая выполненными условия, позволяющие применять лучевую теорию акустики в неподвижной и нестратифицированной среде, запишем соотношение для квадрата амплитуды давления $p^2(f)$ звуковой волны с учетом направленности только источника звукового излучения в виде

$$p^2(f) = A^2(f)B^2(f)D(f, r_1, r_2, r_d, \theta_d, \theta_r), \quad (1)$$

$$D(f, r_1, r_2, r_d, \theta_d, \theta_r) = r_d^{-2} e^{-2r_d \alpha(f)} \{g^2(\theta_d, f) + |Q|^2 g^2(\theta_r, f) + 2|Q|C(f) g(\theta_d, f) g(\theta_r, f) \times \cos[k(r_1 + r_2 - r_d) + \Omega]\}. \quad (2)$$

Здесь $A(f)$ — амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) источника; $B(f)$ — АЧХ приемника; $g(\theta, f)$ — нормированная диаграмма направленности (ДН) источника по амплитуде; θ_d и θ_r — углы между осью ДН источника и направлением на приемный микрофон и на точку отражения от поверхности (см.

рис. 1); r_d — расстояние между источником и приемным микрофоном; r_1 и r_2 — расстояния от источника до точки отражения и от точки отражения до приемника; $C(f)$ — функция когерентности прямого и отраженного сигналов; $|Q|$ — модуль коэффициента отражения звука от поверхности; Ω — сдвиг фазы в отраженной звуковой волне (комплексный коэффициент отражения звука от поверхности $Q = |Q|e^{i\Omega}$); $\alpha(f)$ — амплитудный коэффициент поглощения звука, рассчитываемый по стандарту ANSI (США) с учетом текущих значений температуры, влажности и давления воздуха; $k = 2\pi f/c$ — волновое число; f — частота; c — скорость звука. В равенствах (1) и (2) предполагается, что поглощение звука по прямой трассе и по трассе с отражением примерно одинаково, а в амплитудных множителях допустимо приближение $r_1 + r_2 \approx r_d$.

Поскольку во время работы возможны (и это наблюдалось при наших измерениях) спонтанные изменения АЧХ источника звука, необходимо проводить непрерывный контроль излучаемого сигнала. Для этого при проведении экспериментов мы помещали вблизи источника контрольный приемник (микрофон). Влияние отражений от подстилающей поверхности на амплитуду сигналов контрольного приемника не учитывалось (это в определенной мере обосновано ввиду несферичности ДН источника, использовавшегося в эксперименте).

Комбинирование сигналов основного и контрольного акустических приемников (микрофонов) позволяет преобразовать (1) в удобное для сравнения экспериментальных и теоретических результатов соотношение и избавиться от необходимости оценки АЧХ источника излучения:

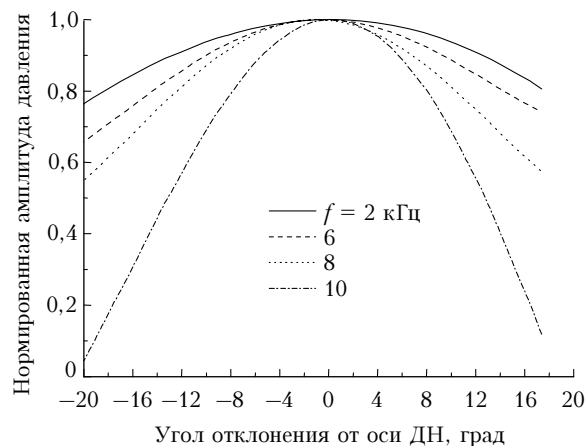
$$W^2(f) = p^2(f)/p_c^2(f) = \kappa^2(f)g^{-2}(\theta_c, f)r_c^2 D(f, r_1, r_2, r_d, \theta_d, \theta_r). \quad (3)$$

Здесь $p_c(f)$ — амплитуда звукового давления на контрольном микрофоне; r_c — расстояние от источника до контрольного микрофона; θ_c — угол между осью ДН источника и направлением на контрольный микрофон. Функция $\kappa(f) = p^0(f)/p_c^0(f)$ учитывает АЧХ приемников и оценивается на этапе подготовки к работе. Здесь $p^0(f)$ и $p_c^0(f)$ — амплитуды звукового давления, измеряемые соответственно рабочим и контрольным микрофонами на оси ДН источника на малом одинаковом расстоянии от него. ДН источника $g(\theta, f)$ также измеряется на предварительном этапе. Аппроксимация экспериментальных значений κ и g некоторыми функциями позволяет использовать их аналитическое представление в соотношении (3).

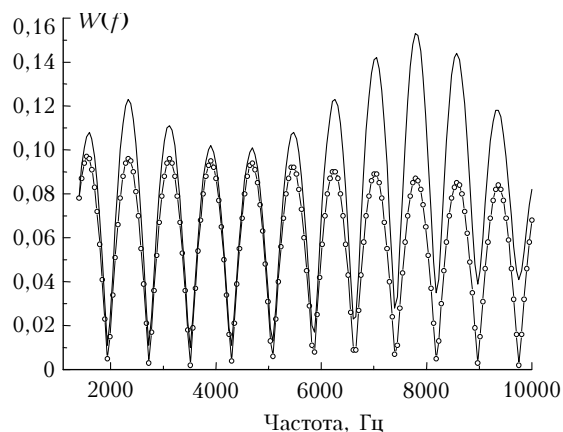
Проведя предварительные калибровочные измерения и зафиксировав пространственное положение источника и приемников звукового излучения, можно рассчитать правую часть (3), которая будет зависеть только от частоты, при условии, что эксперименты проходят в штатных условиях, функция когерентности $C(f)$ постоянна и равна единице

(отсутствие турбулентности в ветровом и температурном полях), поглощение звука постоянно (нет существенных изменений температуры, влажности и давления воздуха). Левая часть соотношения (3) оценивается по экспериментальным результатам. Таким образом, при корректно поставленных экспериментах можно достаточно эффективно проверить теоретические модели, формирующие функцию $D(f, r_1, r_2, r_d, \theta_d, \theta_r)$.

Так как в проводившихся нами экспериментах расстояния между источником и приемником звука, а также высоты их размещения были небольшими, то при аппроксимации измеренной ДН излучателя аналитическим выражением можно ограничиться только ее главным лепестком. Результаты аппроксимации ДН использовавшегося в наших экспериментах источника функцией Гаусса для нескольких частот приведены на рис. 2, а.



а



б

Рис. 2. Аппроксимация нормированной диаграммы направленности реального источника излучения для нескольких частот (а) и рассчитанная по формуле (3) амплитуда сигнала для сферического (линия с символами) и несферического (сплошная линия) источников излучения (б)

Эффект влияния несферичности ДН излучателя звука на режим интерференции прямой и отраженной от поверхности волн демонстрирует рис. 2, б.

На нем представлены расчеты функции $W(f)$ для варианта, когда источник имеет изотропную ДН (линия с символами), а также для варианта ДН, показанной на рис. 2, *а*. При расчетах полагалось, что высоты источника и приемника излучения, а также калибровочного микрофона одинаковы и равны 1,5 м, расстояние между источником звука и рабочим микрофоном $r_d = 10$ м, а расстояние между источником и калибровочным микрофоном $r_c = 1$ м. Отражающая поверхность предполагалась абсолютно жесткой ($|Q| = 1, \Omega = 0$), величина $\kappa(f) = 1$, температура воздуха равна 20 °С, относительная влажность 50% и атмосферное давление 1014 гПа.

Согласно рис. 2, *б* при несферической ДН источника происходит «модуляция» интерференционной «волны», чего не наблюдается при изотропной ДН.

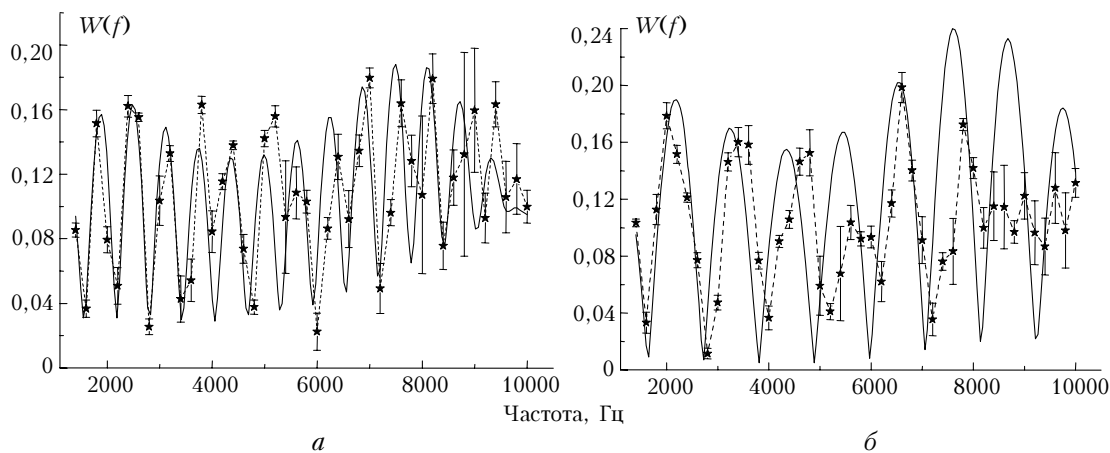


Рис. 3. Сравнение экспериментальных (звездочки) и теоретических (сплошные линии) результатов для расстояния между источником и приемниками излучения 13,6 м, высоты источника $h_s = 1,47$ м и высот приемника $h_r = 2,61$ м (*а*) и $h_r = 1,48$ м (*б*). Экспериментальные результаты представлены с указанием среднеквадратических отклонений в виде отрезков около точек. Предполагались полная когерентность прямого и отраженного сигналов, а также абсолютно жесткая поверхность ($|Q| = 1, \Omega = 0$)

Неучет этого эффекта может привести к определенным ошибкам при интерпретации результатов экспериментов, связанных с изучением функции $D(f, r_1, r_2, r_d, \theta_d, \theta_r)$.

Пример обработки экспериментальных результатов представлен на рис. 3.

Работа велась над относительно ровной поверхностью (крыша здания) при слабом ветре (0,2–1,5 м/с). Можно утверждать, что имеется неплохое совпадение результатов эксперимента с теоретическими расчетами по формуле (3), особенно для низких частот. Помимо совпадения с интерференционными «волнами», экспериментальные данные отслеживают и предсказываемую формулой (3) «модуляцию» за счет несферичности ДН. Ухудшение качества совпадения теории и эксперимента на высоких частотах можно объяснить, по-видимому, падением когерентности звуковых волн с ростом частоты из-за турбулентных пульсаций скорости ветра и температуры, идеализацией импедансных свойств

отражающей поверхности, а также, возможно, другими причинами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Программы ОФН РАН «Когерентные акустические поля и сигналы», проект № 2.11.1.

V.P. Mamyshev, S.L. Odintsov. Estimate of radiation direction effect on sonic wave interference at short near-ground paths.

The effect of sonic radiation source direction on the interference of direct and reflected from the wave surface at sound propagation along short ground paths is under discussion. The theoretic and experimental results of comparison are presented.