

УДК 534.2

Н.П. Красненко, А.С. Раков, Д.С. Раков, Ц.Д. Сандуков

Приземное распространение звуковых волн в пределах прямой видимости

Рассмотрен алгоритм расчета уровня звукового давления при приземном распространении звука в пределах прямой видимости. Определены компоненты ослабления звука, которые необходимо учитывать при проведении расчетов. Приведены результаты экспериментов и сравнение с теоретическими расчетами.

Ключевые слова: атмосфера, звук, распространение, ослабление, подстилающая поверхность, звуковое давление.

Акустические системы различного назначения широко используются в приземной атмосфере – это установки звукового оповещения и вещания, пассивные системы локации и приема (направленные микрофоны) и др. Характеристики их работы (дальность действия, слышимость, разборчивость речи) во многом определяются условиями применения. Для оценки эффективности работы акустических систем в атмосфере необходимо знать, как влияет атмосферный канал распространения на характеристики распространяющихся звуковых сигналов. Поэтому детальное изучение и понимание процессов распространения звуковых волн в приземном слое атмосферы необходимо для решения задач по увеличению эффективности работы акустических систем.

Распространение звука вблизи поверхности земли имеет свои особенности, в отличие от распространения в свободном пространстве. Это обусловлено тем, что на приземное распространение звука влияет много разных факторов, к которым относятся метеорологические условия (значения метеопараметров: скорости и направление ветра, температуры воздуха, давления, влажности, характеристик турбулентности атмосферы и поведение их вертикальных профилей), а также геометрия распространения звука (длина трассы, высоты источника и приемника над уровнем земли), характеристики трассы распространения.

Как правило, рекламные проспекты разработчиков и производителей акустических систем приводят данные по дальности их действия, учитывающие в лучшем случае только сферическую расходимость звуковой волны в свободном пространстве, хотя системы предназначены для использования в приземной атмосфере.

Отсюда следует, что основной проблемой стоящей при разработке и использовании акустических систем в приземной атмосфере, является учет влияния атмосферного канала распространения на характеристики звуковых волн.

Поэтому ниже были проведены теоретические и экспериментальные исследования по распространению звуковых волн в приземном слое атмосферы. В частности, был рассмотрен вопрос определения уровня звукового давления на различных расстояниях от звукового источника в пределах прямой видимости, где работает большинство цитируемых выше акустических систем.

Модель приземного распространения звуковых волн в пределах прямой видимости. Модель распространения звука в приземном слое в пределах прямой видимости основывается на том, что в заданную точку пространства от источника приходит только два луча: прямой и отраженный от поверхности Земли, причем прямой луч не имеет точки поворота (нет рефракции). Такая ситуация возможна при одновременно малых значениях скорости ветра ($v < 1$ м/с) и абсолютного значения градиента температуры воздуха $g < 1$ град/км или при малых длинах трасс распространения звука d порядка нескольких десятков и сотен метров. Данная модель распространения звука в приземном слое атмосферы соответствует нейтральному режиму распространения звука (рис. 1) [1].

Оценка уровня звукового давления в заданной точке пространства обычно проводится на основе расчета так называемого дополнительного ослабления звука $L_{\text{доп}}$, состоящего из суммы различных компонент ослабления звука в атмосфере: L_3 – ослабления, обусловленного подстилающей поверхностью (приземное ослабление звука, учитывающее влияние интерференции прямой и отраженной волны); L_T – ослабления, вызванного атмосферной турбулентностью; $L_{\text{КМ}}$ – ослабле-

ния, вызванного классическим поглощением звука за счет вязкости и теплопроводности воздуха и молекулярным поглощением звука, обусловленного релаксационными процессами в молекулах кислорода, азота и углекислого газа; $L_{\text{сф}}$ – ослабления звуковой волны, обусловленного ее угловой расходимостью (в отсутствие рефракции – сферической).

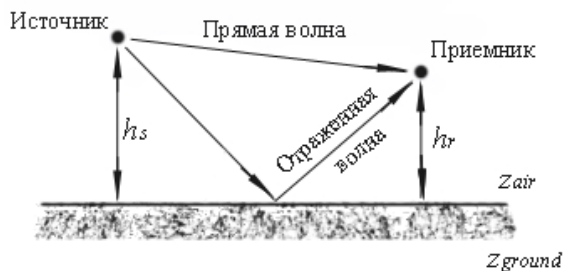


Рис. 1. Геометрия приземного распространения звука

В целом по дополнительному ослаблению звука на приземных трассах имеется достаточно много информации в литературе [1, 2, 5–7]. В то же время для определения отдельных компонент ослабления звука при известной геометрии распространения звука от источника до приемника необходимо знание как различных характеристик атмосферы, так и импедансных свойств подстилающей поверхности. Последние, в свою очередь, зависят от частоты звука и типа поверхности (снег, песок, асфальт, рыхлая почва и т.д.). Комплексный импеданс различных поверхностей Земли обычно рассчитывают по модели Делани–Безли [6], построенной для волокнистых поглощающих материалов, или её модификаций [7]. Формулы для расчета других компонент дополнительного ослабления звука: классического, молекулярного и турбулентного – можно, например, найти в [1]. При распространении звуковых волн низких частот, как правило в сотни герц и ниже, атмосферным ослаблением на расстояниях прямой видимости можно пренебречь и учитывать только ослабление за счет поверхности Земли.

Экспериментальные исследования распространения звуковых волн в пределах прямой видимости. Для проверки расчетов уровня звука по формуле (1) проводились экспериментальные исследования приземного распространения звука.

Экспериментальная установка [3–4] включала в себя излучающую систему в виде направленной акустической антенны с апертурой диаметром 1 м, на которую с компьютера через усилитель мощности подавался сигнал, и приемную систему в виде двух микрофонов в составе шумомеров Mediator 2238 фирмы Brüel&Kjær. Ось излучающей антенны находилась на высоте 6 м над землей. Первый приемный микрофон (шумомер) размещался в базовой точке на мачте на расстоянии 20 м от излучателя на оси диаграммы направленности антенны и служил в качестве опорного для контроля АЧХ источника. Второй – путем переноса использовался в четырех последующих измерительных точках на расстояниях 90, 180, 210, 270 м от излучателя. В каждой точке измерения проводились на 4 высотах расположения микрофона над подстилающей поверхностью: 0; 0,5; 1 и 1,5 м. В качестве исходного излучаемого сигнала моделировался белый шум в частотном диапазоне электроакустического преобразователя. Шумомеры фиксировали измерения уровня звука по третьоктавной сетке частот в диапазоне от 315 до 12500 Гц, используя третьоктавные приемные фильтры. В качестве средств метеорологического обеспечения эксперимента использовались стандартные метеорологические датчики, измерявшие скорость и направление ветра, температуру и влажность воздуха, атмосферное давление, которые затем использовались для определения величины молекулярного поглощения звука и контроля отсутствия рефракции звука. Эксперименты проводились в различные сезоны года. Подстилающая поверхность трассы распространения звуковых волн представляла собой относительно ровное поле: с редким кустарником высотой до 1 м, снежным покровом в зимнее время и травяным покровом в весенний и летний период.

Теоретически ослабление звука рассчитывалось по формуле (1) для каждой точки приема. При этом дополнительное ослабление звука определялось по формулам, приведенным в литературных источниках [1, 2, 5–6]. В качестве модели импеданса земной поверхности была использована модель Делани–Безли [6, 7], численные значения характеристик которой задавались исходя из типа под-

В итоге уровень звукового давления в заданной точке r можно записать в следующем виде:

$$R_{\text{res}}(f, r) = S(f) - L_{\text{доп}}(f, r) + D(\theta, f), \quad (1)$$

где $R_{\text{res}}(f, r)$ – уровень звука в точке приема в дБ; S – уровень звука (амплитудно-частотная характеристика) источника (АЧХ), приведенный к 1 м, в дБ; $L_{\text{доп}}(f, r)$ – дополнительное ослабление звука в дБ, учитывающее перечисленные выше виды ослабления звука; f – частота звуковых колебаний; $D(\theta)$ – параметр, учитывающий характеристику направленности источника или (и) приемника звука, в дБ.

стилающей поверхности трассы распространения звука во время проведения эксперимента (травя соответствующей высоты и густоты, сухая, влажная или замерзшая почва и др.).

Экспериментально значения ослабления звукового сигнала определялись на основе разности приведенного уровня звукового сигнала в точке изучения, полученного по измерениям опорного микрофона, и измеренного значения уровня звука в точке наблюдения.

Один из примеров сравнения теоретически рассчитанной и экспериментальной частотных зависимостей уровня звука для конкретных условий проведения эксперимента приведен на рис. 2. Можно сказать, что используемая модель расчета уровня звука при приземном распространении в пределах прямой видимости дает достаточно хорошее совпадение теоретических и экспериментальных данных в области речевого диапазона частот (до 4000 Гц). Увеличивающееся различие данных на более высоких частотах можно объяснить тем фактом, что при теоретическом расчете не учитывалось влияние турбулентного ослабления звука, которое сильно проявляется при узких звуковых пучках [2] (соответственно на высоких частотах при фиксированной апертуре излучателя). Этот неучет был вызван отсутствием соответствующих измерителей характеристик турбулентности при проведении эксперимента.

При малых длинах трасс распространения сигналов ослабление звука за счет его поглощения в воздухе (классического и молекулярного) обычно мало [2] и уровень звукового давления принимаемого сигнала в основном определяется геометрией трассы распространения и влиянием подстилающей поверхности Земли. Располагая приемный микрофон на различных высотах, можно оценить степень этого влияния. На рис. 3 в качестве примера представлены результаты изменения уровня звукового давления сигнала для различных длин трасс распространения звука и высот расположения приемного микрофона.

При расположении приемного микрофона на уровне подстилающей поверхности ($h_r = 0$ м) регистрируется только прямая проходящая звуковая волна от источника. При поднятых над поверхностью Земли микрофонах регистрируется и отраженная волна (рис. 1), приводящая к интерференции в точке приема. Данный вклад особенно сильно заметен на малых расстояниях. Также за счет влияния подстилающей поверхности с расстоянием изменяется и амплитудно-частотная характеристика излучаемого сигнала.

Заключение. Результаты проведенных экспериментальных исследований приземного распространения звуковых волн в пределах прямой видимости показывают достаточно хорошее совпадение значений уровня звука принимаемых сигналов с теоретическими расчетами, использующими импедансную модель Делани-Безли по учету дополнительного ослабления звука за счет подстилающей поверхности Земли. В большей степени это соответствует частотам ниже 4000 Гц. При более высоких частотах необходимо учитывать влияние и других факторов ослабления звука.

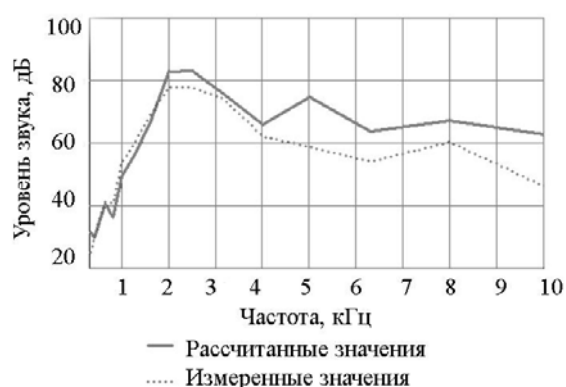


Рис. 2. Зависимость уровня звука от частоты для дальности 90 м. Вертикальные черточки характеризуют разброс экспериментальных значений. Высота источника 6 м, высота приемника 1 м. Тип подстилающей поверхности – промерзшая земля с засохшей травой

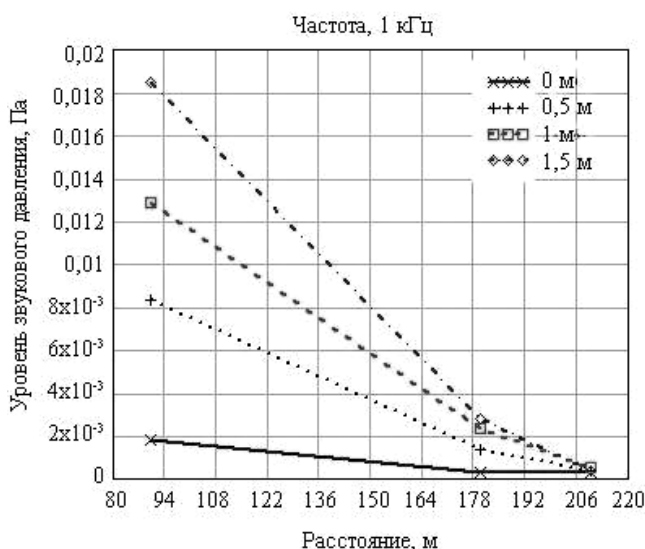


Рис. 3. Зависимость уровня принимаемого звукового сигнала частоты 1 кГц от расстояния при различных высотах расположения микрофона. Тип подстилающей поверхности – травяной покров высотой около 0,5 м

При передаче (или приеме) широкополосных звуковых сигналов необходимо учитывать влияние приземного канала распространения волн на изменения их амплитудно-частотных характеристик из-за геометрии распространения и влияния подстилающей поверхности.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 12-02-31154/мол_а.

Литература

1. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Акустические измерения и стандартизация. Ультразвук и ультразвуковые технологии. Атмосферная акустика. Акустика океана: сб. тр. XV сессии Российского акустического общества. – М.: ГЕОС, 2004. – Т. 2. – С. 97–102.
2. Красненко Н.П. Акустическое зондирование атмосферного пограничного слоя. – Томск, 2001. – 278 с.
3. Красненко Н.П. Технические средства для исследования приземной атмосферы и распространения звуковых волн / Н.П. Красненко, А.Н. Кудрявцев, Д.С. Раков, П.Г. Стафеев // Оптика атмосферы и океана. – 2012. – Т. 25, № 2. – С. 158–164.
4. Красненко Н.П. Мощные излучающие акустические антенные решетки / Н.П. Красненко, А.С. Раков, Д.С. Раков, Ц.Д. Сандуков // Приборы и техника эксперимента. – 2012. – №3. – С. 129–130.
5. Красненко Н.П. Методика определения дальности действия направленных микрофонов с учетом канала распространения / Н.П. Красненко, Д.С. Раков // Методы и устройства передачи и обработки информации: межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. В.В. Ромашова, В.В. Булкина. – М.: Радиотехника, 2009. – Вып. 11. – С. 154–164.
6. Delany M.E. Acoustical properties of fibrous absorbent materials / M.E. Delany, E.N. Bazley // Appl. Acoust. – 1970. – № 3. – P. 105–116.
7. Attenborough K. Predicting outdoor sound / K. Attenborough, K.M. Li, K. Horoshenkov. – London; New York: Taylor & Francis, 2007. – 441 p.

Красненко Николай Петрович

Д-р физ.-мат. наук, профессор каф. радиотехнических систем ТУСУРа,
вед. науч. сотрудник Института мониторинга климатических и экологических систем
Сибирского отделения Российской академии наук (ИМКЭС СО РАН)
Тел.: 8 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: krasnenko@imces.ru

Раков Александр Сергеевич

Мл. науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН

Раков Денис Сергеевич

Канд. техн. наук, мл. науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН
Тел.: 8 (382-2) 49-24-18
Эл. почта: rakov@imces.ru

Сандуков Цыден Даваевич

Мл. науч. сотрудник ИМКЭС СО РАН

Krasnenko N.P., Rakov A.S., Rakov D.S., Sandukov Ts.D.
Near-ground line-of-sight propagation of sound waves

Algorithm for calculation of sound pressure level is considered for near-ground line-of-sight sound wave propagation. Components of sound attenuation that must be taken into account to perform calculations are determined. The results of experiments are presented together with their comparison with theoretical calculations.

Keywords: atmosphere, sound, propagation, attenuation, underlying surface, sound pressure.