

УДК 681.518.25

С.Н. Овсянников, М.С. Овсянников

РАСЧЕТ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ УРОВНЕЙ ШУМОВОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ СЕЛИТЕБНОЙ ТЕРРИТОРИИ МЕТОДОМ ОБРАТНОЙ ТРАССИРОВКИ НА РАСТРЕ

Рассматриваются два основополагающих подхода к решению задачи численного моделирования процесса зашумления селитебной территории транспортными потоками. Предлагается описание альтернативного подхода – моделирование на растре средствами обратной трассировки лучей. Приводится алгоритм, особенности его реализации. Получена оценка трудоемкости.

Ключевые слова: шумовые загрязнения, планирование, обратная трассировка.

Шум является одним из основных факторов загрязнения территории современных городов. Значительным источником шума на селитебной территории является транспорт. В связи с этим при проектировании жилой застройки, планировании новых транспортных магистралей и при разработке планов развития территорий необходимо производить оценку возможного негативного влияния шума на примагистральные территории и соответствие его значений нормам, установленным действующими документами СНиП [1, 2] и санитарными нормами [3]. Для этого требуется эффективная методика численного моделирования процесса шумового загрязнения для расчета на ЭВМ.

1. Сравнительный обзор существующих методик

В настоящее время существуют два принципиальных подхода к решению задачи оценки шумового воздействия транспортных потоков на прилегающую территорию. Наиболее общим является непосредственное моделирование физического процесса распространения шума от источника в виде транспортных средств на магистрали до точек оценивания, расположенных на прилегающей территории. При этом принимаются во внимание такие основополагающие факторы, как отражение звуковых волн от фасадов зданий и экранов, дифракция для разных длин волн. Такой подход потенциально обеспечивает высокую достоверность полученных результатов, поскольку предполагает точное моделирование распространения звуковых волн.

Однако данный подход достаточно сложен в реализации на ЭВМ. Главным его недостатком является высокая трудоемкость. Применяющийся алгоритмический подход в виде прямой и обратной трассировки лучей (Ray Tracing) [4] является сам по себе значительной по трудоемкости задачей. Однако при моделировании распространения шума требуется принимать во внимание такие факторы, как зависимость процессов распространения звука от частоты, различные характеристики атмосферы как среды распространения шума и т.д. Ещё одной сложностью на пути использования данного подхода является то, что он в значительной степени чувствителен к точности компьютерной модели местности, на которой проводится моделирование. Учет характера подстилающей поверхности, характера

озеленения, наличия экранирующих сооружений также требует дополнительных вычислительных ресурсов.

Несмотря на некоторые сложности использования данного подхода на ЭВМ, существует ряд программных реализаций. Одной из первых была система макетного моделирования BRUIT, реализованная ещё в 80-е годы XX века [5]. Несмотря на то, что в этой расчетной системе был допущен ряд упрощений и использовалась схематическая модель местности, она позволяла эффективно моделировать процесс зашумления примыкающей территории.

Из современных систем этого класса можно отметить FHWA Traffic Noise Model, разработанную по заказу Федерального управления магистралями подразделения Департамента транспорта США [6]. К особенностям данного программного комплекса можно отнести моделирование пяти различных видов автотранспортных средств, расчет для непрерывного и прерывистого транспортных потоков. Анализ различного профиля дороги и учет шумозащитных барьеров также присутствует в этом программном пакете.

В тех случаях, когда непосредственное моделирование процесса распространения шума не является целесообразным, может быть применен другой подход. Он основан на использовании статистических оценок, характеризующих распространение шума. Основные принципы этого подхода описаны в СНиП II-12-77 «Защита от шума» [2] и ГОСТ 20444-85 «Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики» [7]. Наиболее полное описание этого подхода представлено в коллективной монографии под редакцией Г.Л. Осипова и Е.Я. Юдина [8].

Суть данной методики заключается в том, что транспортный поток рассматривается не как набор отдельных источников шума, а как некоторый линейно-протяженный источник. При этом для оценки характеристик этого источника по ГОСТ 20444-85 [7] используется следующая формула:

$$L_{A, \text{экв}} = 10 \lg Q + 13,3 \lg V + 4 \lg(1 + \rho) + \Delta L_{A1} + \Delta L_{A2} + 15, \quad (1)$$

где Q – интенсивность движения, ед./ч; V – средняя скорость потока, км/ч; ρ – доля средств грузового и общественного транспорта в потоке; ΔL_{A1} – поправка, учитывающая вид покрытия проезжей части улицы или дороги, дБА; ΔL_{A2} – поправка, учитывающая продольный уклон улицы или дороги, дБА.

Таким образом, зная характеристики потока, можно получить оценку уровня звукового давления на расстоянии 7,5 м от линейного источника шума.

В дальнейшем данная методика предполагает использование следующей формулы для вычисления прогнозируемого уровня звукового давления для некоторой точки, находящейся в области прямой видимости от источника шума:

$$L_{A, \text{тер}} = L_{A, \text{экв}} - \Delta L_{A, \text{рас}} - \Delta L_{A, \text{экр}} - \Delta L_{A, \text{зел}}, \quad (2)$$

где $L_{A, \text{экв}}$ – исходная шумовая характеристика источника шума на расстоянии 7,5 м, дБА; $\Delta L_{A, \text{рас}}$ – снижение уровня звука в зависимости от расстояния от источника до расчетной точки, дБА; $\Delta L_{A, \text{экр}}$ – снижение уровня звука экранами на пути распространения звука, дБА; $\Delta L_{A, \text{зел}}$ – снижение уровня звука полосами зеленых насаждений, дБА.

Эта формула может быть расширена за счет учета других факторов, способствующих затуханию звуковой волны. Однако они исключены из базовой формулы, установленной СНиП [1], поскольку их влияние на итоговый результат незначительно.

Что касается величины $\Delta L_{A, \text{рас}}$, описывающей снижение шума с увеличением расстояния от источника, то ее вычисление в простейшем случае возможно по формуле

$$\Delta L_{A, \text{рас}} = 10 \lg \frac{r}{r_0}, \quad (3)$$

где r – расстояние от оси транспортного потока до расчетной точки, м; r_0 – базисное расстояние, на котором определяется шумовая характеристика транспортного потока, м ($\text{const} = 7,5$ м).

Используя данные формулы, можно произвести оценку уровня зашумления на примагистральной территории и определить границы предельно допустимых уровней шума, установленных нормативной базой.

К недостатку методики, описанной в СНиП II-12-77 [1] и ГОСТ 20444-85 [7], можно отнести то, что она ориентирована в большей степени на ручной расчет, нежели на численное моделирование средствами ЭВМ. На это указывает и отсутствие формальных правил для разбиения магистрали на отдельные участки, различающиеся по условиям распространения шума. Кроме того, данный подход не позволяет учитывать шум, отраженный от соседних строений. Отсутствует и возможность учета распространения шума за пределами прямой видимости за счет дифракции. И хотя предлагаемые формулы допускают дополнительный учет факторов, способствующих снижению шума, но в целом они не могут обеспечить высокую точность расчета. Авторами данной методики предполагалось компенсировать это статистическими поправками, однако они были достоверны лишь на период, когда эта методика была разработана, для существовавших на тот период характеристик транспортных потоков. Таким образом, реальная картина шумового загрязнения может отличаться от полученных по этой методике результатов.

Тем не менее, существуют программные комплексы, реализующие предложенную методику средствами ЭВМ. Примером может служить программный модуль «Расчет шума от транспортных потоков» (компания «Интеграл», г. Санкт-Петербург) [9].

2. Метод обратной трассировки на растре

Описанные выше две методики моделирования процесса распространения шума на примагистральной застройке имеют как достоинства, так и недостатки. Главная их общая особенность, осложняющая их реализацию на ЭВМ, заключается в том, что оба метода предполагают точное моделирование в избранных точках. Однако представление окружающего мира в виде компьютерной модели само по себе не может быть точным. Таким образом, целесообразно использовать подход, исходно предполагающий дискретность моделирования местности.

В качестве альтернативного решения предлагается использовать подход, основывающийся на следующих ключевых особенностях:

- использование растровой модели местности;
- разбиение магистрали как линейно-протяженного источника шума на независимые точечные источники;
- использование метода обратной трассировки лучей независимо для каждого точечного источника шума;
- использование энергетического суммирования в точках измерений.

В рамках этого подхода предлагается метод обратной трассировки на растре, который является некоторым промежуточным решением по сравнению с описан-

ными ранее двумя методиками. В качестве отправной точки предлагается перейти от точной модели местности к дискретному приближению. Таким образом, представив местность в виде растровой модели, можно, в зависимости от выбранного масштаба и размера одной ячейки (пикселя), регулировать точность вычислений и трудоемкость. Потенциально это также позволяет увеличивать, во-первых, производительность расчета на открытых пространствах за счет увеличения размера ячеек и, во-вторых, точность в местах плотной застройки, при необходимости уменьшая размер пикселя.

Все вычисления, проводимые в рамках моделирования процесса распространения шума, предлагается производить именно на растровой модели. При этом, как и в используемой в геоинформатике растровой модели данных, каждому пикселю будет соответствовать некоторый набор атрибутов. Предлагается использовать следующие классы пикселей, описывающих соответствующие объекты на местности:

- источник шума (фрагмент магистрали);
- полностью непроницаемое препятствие (элемент застройки);
- частично проницаемое препятствие (шумозащитный экран);
- элемент зеленых насаждений (шумозащитный эффект);
- свободная, не рассматриваемая территория;
- исследуемая территория.

Стоит отметить, что последний класс пикселей может сочетаться со всеми прочими, за исключением «Источника шума». Это связано с тем, что могут потребоваться данные об эквивалентном уровне шума у фасада здания или на кромке шумозащитного экрана.

Таким образом, рассматривая местность в виде растрового приближения, мы можем достаточно точно представить исследуемую территорию. При этом масштаб может быть выбран такой, который отвечает требуемой точности вычислений. Но уже при размере пикселя в 1 м обеспечивается высокая точность представления реальных объектов застройки, и при этом, при относительно небольших площадях исследуемой территории, общее количество пикселей не будет требовать значительных аппаратных вычислительных ресурсов.

Рассмотрим основные этапы работы метода обратной трассировки на растре в виде неформального описания алгоритма.

Задача представления местности в виде растровой модели данных может решаться разными средствами. Это может быть растеризация существующей векторной модели данных с последующим формированием атрибутивной составляющей. Другая возможность – обработка растровых картографических и данных дистанционного зондирования. Исходный вариант подхода предполагает использование лишь двухмерной модели местности, однако при добавлении высотных отметок модель может быть расширена для учета высот объектов. В этом случае становится возможным определение прохождения звуковых волн и в вертикальной плоскости. Независимо от того, 2-мерная это модель или с высотными отметками, местность представляется именно в виде растровой модели, в противоположность триангуляционным моделям, используемым в методике точного моделирования процесса распространения звука.

Но каким бы образом ни была получена растровая модель, ее формирование является лишь первым этапом предлагаемого подхода.

Второй этап включает в себя операции по выделению отдельных классов объектов из растровой модели местности и задание атрибутивной составляющей. Цель

этой операции – фиксирование на растровой модели источников и исследуемых точек, а также выставление характеристик для различных классов пикселей. Это может быть сделано автоматически средствами ГИС при условии наличия соответствующей атрибутики для объектов в исходной модели местности либо определено вручную. Данная методика предполагает явное задание характеристик источника. В данном случае для магистрали может быть задан эквивалентный уровень шума $L_{A,экв}$ на расстоянии 7,5 м от осевой линии крайней полосы движения. Альтернативно величина $L_{A,экв}$ может быть определена по формуле (1) на основе статистических или прогнозируемых данных об интенсивности движения, скорости потока и процентном соотношении грузового и легкового автотранспорта. Поскольку магистраль представлена не одним объектом, а набором пикселей, то нет необходимости явного или неявного деления на отрезки с равными характеристиками. Достаточно задания соответствующих параметров сразу всем или определенным группам пикселей. Однако следует учитывать, что суммарная звуковая мощность всех точечных источников, заданных пикселями, должна соответствовать исходной звуковой мощности линейно-протяженного источника. Ещё одним вариантом получения величины $L_{A,экв}$ является использование систем микромоделирования, позволяющих установить положение машин на дороге в определенный момент времени. Анализируя количество машин, в определенном пикселе на растровой модели, и зная их шумовые характеристики можно получить оценку уровня шума для точечного источника шума, расположенного в этом пикселе.

Аналогичным образом должны быть заданы характеристики звукопроницаемости для шумозащитных экранов и элементов зеленых насаждений. В целом, операции, включенные во второй этап, могут проводиться заранее, при условии существования растровой модели данных с соответствующей атрибутикой. В этом случае первые два этапа могут быть заменены операцией импорта растровой модели местности.

После того, как подготовительные операции выполнены, производится непосредственный расчет в рамках третьего этапа. Поскольку фактически допускается множественность как точек являющихся источниками, так и точек, в которых производится оценка уровней шума, то для этих целей уже недостаточно использования только формулы (2). Вместо этого все точки, представляющие магистраль, рассматриваются как независимые источники шума.

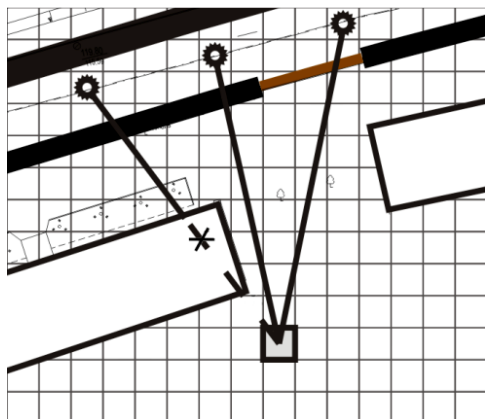


Рис 1. Расчет прямой видимости

Рассмотрим ситуацию, когда существует всего одна исследуемая точка, а магистраль представлена тремя соседними пикселями (рис. 1).

Тогда при условии, что прилегающая застройка будет достаточно близка к магистрали, на пути распространения звука из одной крайней точки будет находиться препятствие в виде пикселя класса «полностью непроницаемое препятствие», и воздействие этого источника можно принять за 0. В то же время, два других источника оказывают совместное воздействие на исследуемую точку. Для того чтобы учесть их общее влияние, необходимо

произвести энергетическое суммирование [8]:

$$L_{A, \text{тер}} = 10 \lg \sum_{i=1}^n 10^{0.1 L_{Ai}}, \quad (4)$$

где L_{Ai} – уровень звука, дБА, приходящего из i -го источника звука.

Таким образом, сколько бы ни было независимых источников, всегда можно оценить их суперпозицию и вычислить итоговую величину эквивалентного уровня шума в этой конкретной точке.

Резюмируя, суть предлагаемого алгоритма можно свести к последовательному вычислению уровня звука для пары точек (i, j) , где i – источник шума (фрагмент магистрали), а j – исследуемая точка. Результирующая трудоемкость в таком случае составит $O(n \cdot m \cdot T)$, где n – количество пикселей, представляющее независимые источники, m – количество точек для исследования и T – трудоемкость расчета величины L_{Ai} для одной пары (i, j) – источник – получатель. При этом T также зависит от выбранного алгоритма определения прямой видимости между источником и исследуемой точкой и может варьироваться в широких пределах. Возможно использование как простейшего алгоритма машинной графики для рисования прямых, так и алгоритмов, основывающихся на Ray Tracing и учитывающих отражение и дифракцию звуковых волн. В простейшем случае, при использовании модифицированного алгоритма Брезенхема [4] для проверки расположения исследуемой точки в прямой видимости от источника, максимальная трудоемкость T составит $O(\max(l, k))$, где l – размер исходного растра по горизонтали и k – размер растра по вертикали. Данная оценка следует из того, что в худшем случае источник и исследуемая точка могут располагаться в противоположных углах растровой карты, и потребуется проверить $\sqrt{2} \cdot \max(l, k)$ пикселей между ними. Таким образом, общая максимальная трудоемкость предлагаемого алгоритма составит $O(n \cdot m \cdot \max(l, k))$. Поскольку количество исследуемых точек m в общем случае пропорционально общему количеству точек на растре, трудоемкость алгоритма может быть оценена как $O(\max(l, k)^3)$, т.е. как кубическая.

Рассматривая алгоритм в целом, можно отметить, что его отдельные элементы фактически базируются на традиционном методе обратной трассировки, когда для каждой конкретной результирующей точки последовательно рассматриваются пути, приводящие в нее из различных источников. Отсюда следует и название метода.

При использовании предложенного подхода к вычислению эквивалентных уровней шума во всех свободных от застройки участках возможно получить подробную картину распространения шума с явно выделенными тенями от экранов и зданий. В дальнейшем, становится возможным обработать получаемые данные для статистического анализа и построения линии равного уровня звукового давления, наглядно демонстрирующих зоны повышенного зашумления. При условии заданного критического значения для уровня шума у фасада зданий возможно получить линии, определяющие границы зашумления. Кроме того, можно повысить эффективность вычислений отбрасыванием тех точек, которые заведомо будут иметь меньший уровень зашумления только на основании их отдаленности от источника.

Предложенный подход имеет ряд допущений, потенциально снижающих точность вычислений. Тем не менее, поскольку результат в каждой точке является

суперпозицией нескольких источников, то компенсируется потеря точности при вычислении воздействия каждого источника в отдельности. Кроме того, возможность гибко регулировать соотношение точность – трудоемкость за счет управления процессом растеризации и выбора масштаба представления местности позволяет добиться достоверных результатов.

Безусловно, работа алгоритма только на основе принципа прямой видимости не может обеспечить высокие результаты. Предложенный подход позволяет рассматривать для пары (i, j) источник – получатель не только прямые пути распространения шума, но и побочные за счет отражения и дифракции.

Ещё одним немаловажным фактором в пользу данного алгоритма является возможность задания в рамках одного пикселя, представляющего фрагмент дороги, целого ряда источников с непересекающимися спектрами. Тем самым становится возможным получение октавного и треть-октавного анализа процесса распространения шума.

Следует отметить, что добавление новых оценок, уточняющих результат работы алгоритма за счет учета побочных путей распространения волн и оценки проницаемости деревьев и кустарников, а также шумозащитных экранов и малых архитектурных форм, не может не сказаться на трудоемкости алгоритма. В таком случае уже нельзя будет говорить о кубической трудоемкости по отношению к линейному размеру раstra.

Резюмируя все вышесказанное, можно утверждать, что предлагаемый метод обратной трассировки на растре может быть альтернативой трудоемкому методу прямой трассировки и устаревшей инженерной методике, предложенной в СНиП. Сочетая отдельные черты базовых подходов, данный алгоритм демонстрирует простоту реализации, достаточную эффективность и достоверность моделирования. Кроме того, расширяемость данного алгоритма позволит повысить точность моделирования за счет учета дополнительных факторов.

ЛИТЕРАТУРА

1. СНиП II-12-77 Защита от шума / Госстрой СССР. М.: Стройиздат, 1978.
2. СНиП 23-03-2003 Защита от шума / Госстрой России. М.: Стройиздат, 2003.
3. Санитарные нормы допустимого шума в помещениях жилых и общественных зданиях на территории жилой застройки / Минздрав СССР. М., 1984.
4. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. М.: Мир, 1989. 512 с.
5. Белоусов В.Н., Прутков Б.Г., Шицкова А.П. и др. Борьба с шумом в городах: Совм. сов.-фр. изд. М.: Стройиздат, 1987. 248 с.
6. FHWA Traffic Noise Model / Federal Highway Administration, U.S. Department of Transportation: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.fhwa.dot.gov/environment/noise/tnm/index.htm>.
7. ГОСТ 20444-85 Шум. Транспортные потоки. Методы измерения шумовой характеристики / Госстрой СССР. М.: Изд-во стандартов, 1985.
8. Осипов Г.Л., Юдин Е.Я., Хюбнер Г. и др. Снижение шума в зданиях и жилых районах / Под ред. Г.Л. Осипова, Е.Я. Юдина. М.: Стройиздат, 1987. 558 с.: ил.
9. Программный модуль «Расчет шума от транспортных потоков» / Фирма «Интеграл», Санкт-Петербург: [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.integral.ru/program.php?action=proglst&id_rzd=13&id_prog=100.

Статья представлена кафедрой теоретических основ информатики факультета информатики Томского государственного университета, поступила в научную редакцию 21 мая 2007 г.