

А. М. Осипова¹✉, А. А. Якименко^{1,2}

Оценка влияния погодных условий на погрешность локализации акустического источника

¹Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск, Российская Федерация

²Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: rowleynau@mail.ru

Аннотация. В статье исследуется влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника с использованием метода TDOA (Time Difference of Arrival). Рассматриваются такие факторы, как температура воздуха, скорость и направление ветра, которые влияют на скорость распространения звука и, как следствие, вносят погрешность в определение координат акустического источника. Для оценки воздействия этих факторов разработано программное обеспечение, включающее клиентскую часть на основе web-технологий и серверную часть на Python. Проведены эксперименты в различных условиях: без учета погодных параметров, с учетом температуры, скорости и направления ветра, а также их комбинаций. Результаты показали, что наибольшие отклонения наблюдаются при сильном ветре (32 м/с) и низкой температуре (-40°C), что подчеркивает необходимость комплексного учета метеорологических данных в алгоритмах акустической локализации. Исследование служит основой для дальнейшего совершенствования методов учета внешних факторов в системах акустической локализации.

Ключевые слова: погодные факторы, скорость распространения звука, локализация акустического источника

А. М. Osipova¹✉, А. А. Yakimenko^{1,2}

Assessment of the influence of weather conditions on the localization error of an acoustic source

¹Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

²Institute of Computational Mathematics and Mathematical Geophysics SB RAS,
Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: rowleynau@mail.ru

Abstract. The article investigates the impact of weather conditions on the localization error of an acoustic source using the TDOA (Time Difference of Arrival) method. Factors such as air temperature, wind speed, and wind direction are considered, as they alter the speed of sound propagation and consequently introduce errors in determining the coordinates of the acoustic source. To assess the influence of these factors, software was developed, including a client-side web-based interface and a server-side component written in Python. Experiments were conducted under various conditions: without accounting for weather parameters, with consideration of temperature, wind speed and direction, as well as their combinations. The results showed that the greatest deviations occurred under strong wind conditions (32 m/s) and low temperatures (-40°C), highlighting the necessity of comprehensively accounting for meteorological data in acoustic localization algorithms.

This research provides a foundation for further improvement of methods for incorporating external factors into acoustic localization systems.

Keywords: weather factors, speed of sound propagation, acoustic source localization

Введение

Современные города – это сложные акустические среды с множеством источников шума, что затрудняет локализацию акустических источников. Звук отражается, поглощается и искажается под действием среды, например, ветра, что повышает погрешность расчётов [1]. Для точной локализации необходимо учитывать внешние условия. С развитием технологий область применения акустической локализации охватывает наблюдение, робототехнику, транспорт и экологию [1].

Под локализацией звукового источника понимается определение его пространственного положения на основе параметров, измеряемых с помощью нескольких микрофонов, таких как время прихода сигнала (TDOA), разность фаз (PDOA) или разница частот прибытия (FDOA) [2]. Наиболее точные и распространённые методы основываются на анализе временных характеристик сигнала, так как они менее подвержены влиянию амплитудных искажений и внешних шумов.

Несмотря на активное развитие области, многие из них предполагают идеальные условия распространения звука – без учета погодных условий или с учетом только одного параметра. Однако в реальных условиях на распространение звукового сигнала существенно влияет несколько факторов. Их игнорирование может приводить к значительным погрешностям в определении местоположения источника.

В работе исследуется влияние погодных условий – температуры и скорости ветра – на погрешность акустической локализации. Для этого разработан программный прототип и проведены испытания в разных метеоусловиях. Результаты позволили выявить ключевые факторы среды и оценить их влияние, что станет основой для улучшения методов учёта внешних условий.

Методы и материалы

Для локализации источника звука используется метод TDOA (Time Difference of Arrival) [3], основанный на разнице времени прихода сигнала к микрофонам. Это позволяет определить направление и координаты источника при наличии трёх и более приёмников. Метод отличается высокой точностью и устойчивостью к шуму, так как опирается на временные характеристики, а не амплитуду или фазу. Также TDOA не требует знания момента начала сигнала, что удобно для работы в реальном времени и в шумной среде. Временную задержку между двумя приёмниками можно выразить как:

$$\Delta t_{i(j)} = \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}}{c_i} - \frac{\sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2}}{c_j}, \quad (1)$$

Где $\Delta t_{i(j)}$ – временная задержка между i и j приемниками, (x, y) – координаты источника звука; (x_i, y_i) – координаты i -го микрофона; v_i – скорость звука для i -го микрофона; (x_j, y_j) – координаты j -го микрофона; C_j – скорость звука для j -го микрофона.

Скорость распространения звука сильно зависит от погодных условий. В исследовании отмечают такие параметры как температура и ветер[4].

Формула Лапласа[5] используется для расчета скорости распространения звука в воздухе с учетом температуры. Она выражается следующим образом:

$$C = \sqrt{\frac{\gamma \cdot R \cdot T}{M}}, \quad (2)$$

где c – скорость звука, γ – коэффициент адиабаты (для воздуха примерно 1.4), R – Универсальная газовая постоянная, T – абсолютная температура в Кельвинах и M – молярная масса воздуха.

Учет влияния ветра на скорость распространения звука осуществляется с помощью поправки, учитывающей направление и скорость воздушного потока относительно направления звуковой волны[6]. Эффективная скорость звука при наличии ветра определяется формулой:

$$C_{\text{вект}} = C + v_{\text{ветра}} \cdot \cos(\theta_{\text{ветра}} - \theta_{\text{звука}}), \quad (3)$$

где $C_{\text{вект}}$ – эффективная скорость распространения звука в направлении распространения, C – скорость распространения звука в неподвижном воздухе, $v_{\text{ветра}}$ – скорость ветра, $\theta_{\text{ветра}}$ – направление ветра, $\theta_{\text{звука}}$ – направление распространения звука. В работе в качестве скорости распространения звука в неподвижном воздухе используется скорость, полученная по формуле Лапласа.

Для проведения экспериментов разработано программное обеспечение, архитектура которого показана на рисунке 1.

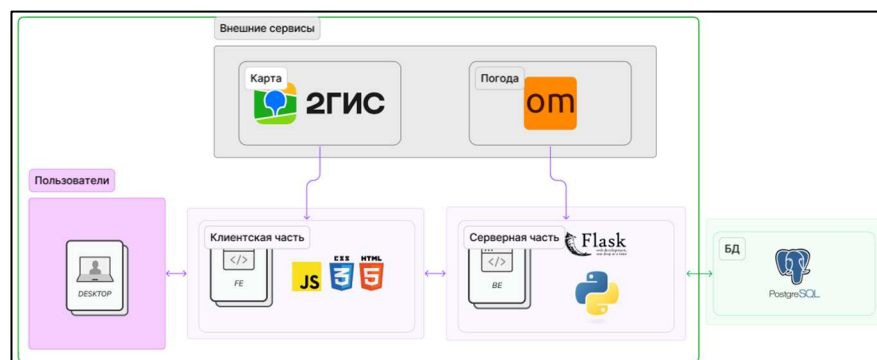


Рис. 1. Архитектура программного обеспечения

Клиентская часть реализована в виде web-приложения с использованием js, css и html. С помощью 2гис отображается карта и поступает информация о ме-

стоположении объектов. Главный экран программного обеспечения показан на рисунке 2.

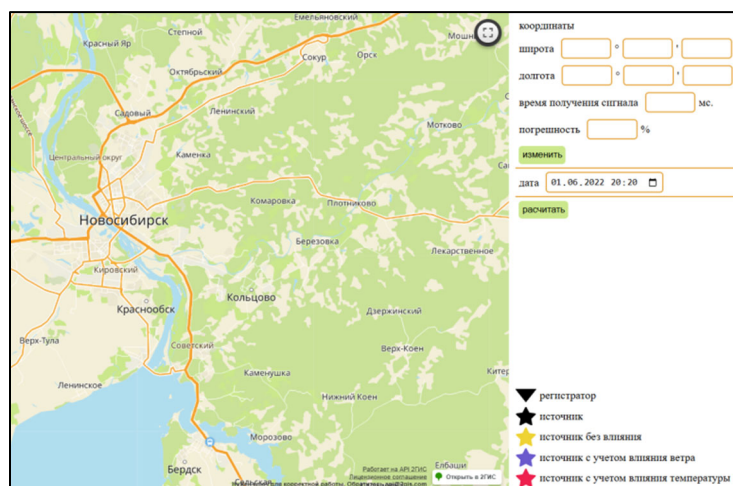


Рис. 2. Фрагмент главного экрана разработанного программного обеспечения

Серверная часть реализована на языке Python. Для обработки запросов и управления API используется Flask. Информация о погоде запрашивается с open-meteo.

Результаты

Для определения значимости влияния различных факторов окружающей среды проведен эксперимент. Он заключается в локализации акустического источника с учетом различных погодных факторов. Выбраны состояния природы, при которых будут проводиться расчеты:

- без учета влияния погодных условий;
- температура окружающей среды;
- скорость и направление ветра;
- температура окружающей среды, скорость и направление ветра.

Вычисления выполнялись относительно трех микрофонов, расположенных на координатах (54,93, 82,98), (54,8, 82,66) и (54,97, 82,61). Время прихода звуковой волны на каждый 46,52, 36,81 и 36,82 секунд соответственно.

На первом этапе локализация акустического источника осуществляется с использованием фиксированного значения скорости распространения звука, равного 331,4 м/с, соответствующего стандартной температуре 0 °С при отсутствии ветра [7].

Цель данного этапа – определить базовый уровень погрешности локализации, с которым впоследствии будут сравниваться результаты, полученные с учетом различных факторов окружающей среды.

При визуализации области погрешности локализации наблюдается достаточно симметричное распределение, обусловленное геометрическим расположе-

нием микрофонов и отсутствием поправок на варьирующиеся метеорологические параметры (см. рисунок. 3).

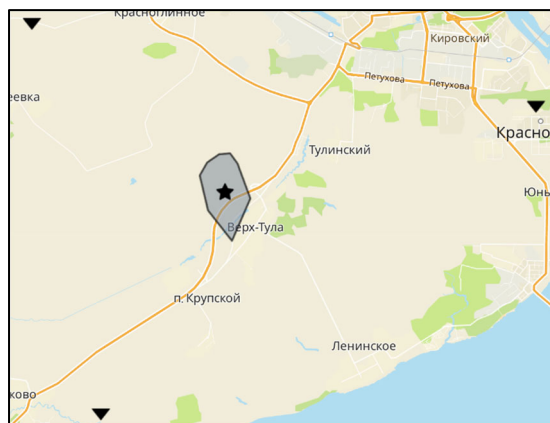


Рис. 3. Вычисленное местоположение источника без учета погодных условий

Результат служит референсной точкой для дальнейшего сравнения и количественной оценки вклада погодных факторов в общее смещение и разброс оценок координат источника.

На следующем этапе эксперимента была учтена поправка на температуру окружающей среды. Скорость звука рассчитывалась индивидуально для каждого микрофона с учетом локального значения температуры воздуха в его окрестности. Для расчета использовалась термодинамическая формула (2), описанная выше. Рассмотрены температурные значения, равные -40 и $+40$ °C, что соответствует типичным краевым диапазонам для наружных условий.

Результаты позволяют оценить влияние неоднородной температурной обстановки на точность локализации источника звука при иных неизменных условиях.

При вычислениях относительно температуре -40 °C (см. рисунок 4), аналогично предыдущему этапу, визуализированная область погрешности локализации достаточно симметрична распределена, но заметно уменьшена. Расположение выбранной референсной точки и полученной отличаются на 150,96 метров.

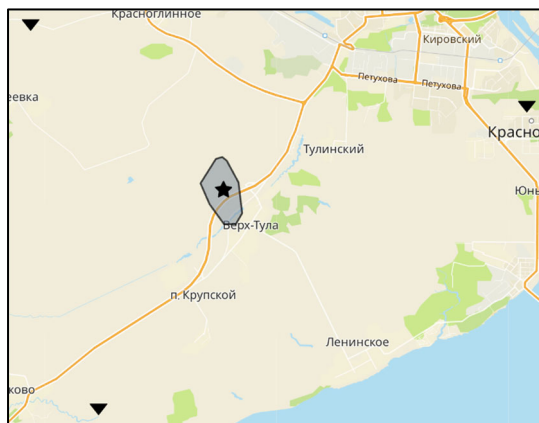


Рис. 4. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния низкой температуры окружающей среды

Для оценки влияния высокой температуры была проведена аналогичная серия вычислений при температуре окружающей среды $+40^{\circ}\text{C}$ (см. рисунок 5). Область погрешности увеличилась, а разница между референсной точкой и полученной составила 139,49 метров.

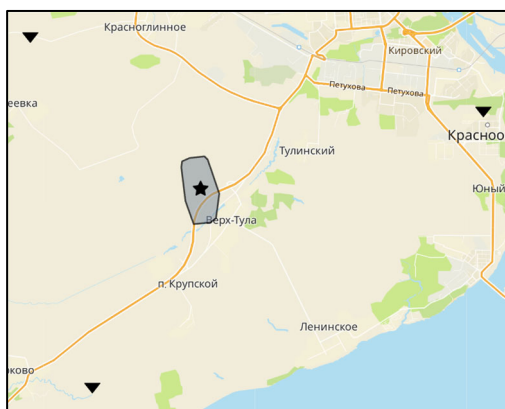


Рис. 5. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния высокой температуры окружающей среды

По результатам можно сказать, что повышение температуры приводит к увеличению скорости звука, а уменьшение температуры к уменьшению скорости звука, соответственно изменение температуры оказывает влияние на погрешность и стабильность процесса локализации.

На 3 этапе эксперимента была учтена поправка на скорость и направление ветра. Скорость звука для каждого микрофона корректировалась в зависимости от модуля скорости ветра и угла между направлением ветра и направлением на микрофон. Расчет эффективной скорости звука осуществлялся по формуле (3).

Были рассмотрены несколько сценариев:

- слабый северо – западный ветер (скорость 0,1 м/с, направление 300°),
- сильный северо – западный ветер (скорость 32 м/с, направление 300°).

При слабом ветре (0,1 м/с) отклонение локализованной точки от референсной было незначительным (4,01 метров), что соответствует ожидаемому результату (см. рисунок 6).

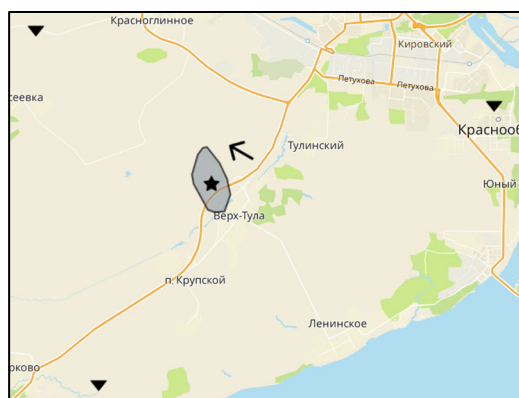


Рис. 6. Вычисленное местоположение источника с учетом влияния слабого ветра

При сильном ветре (32 м/с) ошибка локализации акустического источника существенно увеличилась (1319 метров), а смещение локализованной позиции происходило преимущественно в сторону противоположную направлению ветра (см. рисунок 7).

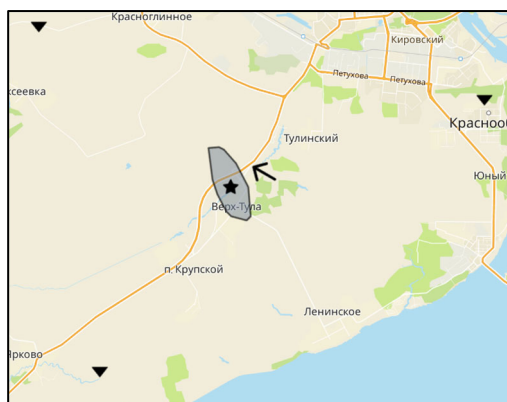


Рис. 7 Вычисленное местоположение источника с учетом влияния сильного ветра

На заключительном этапе эксперимента была проведена оценка влияния комбинации погодных факторов – температуры воздуха и параметров ветра (скорости и направления) – на погрешность локализации акустического источника.

В эксперименте одновременно варьировались следующие параметры:

- температура окружающей среды: -40°C и $+40^{\circ}\text{C}$;
- скорость ветра: 17 м/с и 32 м/с;
- направление ветра: 45° , 90° и 300° .

Этап направлен на определение характера изменений погрешности локализации при одновременном воздействии нескольких факторов и выявление наиболее критичных сочетаний условий. Подробнее показано в таблице 1.

Таблица 1

Комбинации факторов, влияющих на локализацию акустического источника

№	Скорость ветра (м/с)	Направление ($^{\circ}$)	Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Отклонение (м)	Относительная погрешность (%)
1	17	90	-40	632, 0	136
2	17	90	40	821, 9	176, 9
3	17	45	40	777, 8	167, 4
4	17	45	-40	625, 8	134, 7
5	17	300	-40	874, 5	188, 3
6	17	300	40	538, 2	115, 8
7	32	90	-40	1332, 1	286, 8
8	32	90	40	1434, 2	308, 7
9	32	45	40	1352, 3	291, 1
10	32	45	-40	1282, 4	276, 1
11	32	300	-40	1556, 0	335
12	32	300	40	1119, 5	241

Как видно из результатов экспериментов, наибольшее отклонение вычисленных координат акустического источника наблюдается при высокой скорости ветра (32 м/с) и отрицательной температуре (-40°C), особенно при направлении ветра 300° , где ошибка достигла 1556 метров, что соответствует относительной погрешности 335 %.

При умеренной скорости ветра (17 м/с) величины отклонений существенно ниже, в среднем на 600–800 метров, что соответствует относительной погрешности от 115 % до 188 %, при этом направление ветра также заметно влияет на величину ошибки.

Обсуждение

Сравнение полученных координат акустического источника при локализации без учета влияния погодных условий и с учетом влияния температуры окружающей среды, скорости и направления ветра отклонение составило от 115,9% до 335%, что показывает существенное влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника.,

Влияние каждого погодного параметра по отдельности также сказывается на погрешности локализации акустического источника. Скорость и направление ветра оказывают асимметричное влияние на распространение звуковых волн и, следовательно, на погрешность определения координат акустического источника. Учет температуры воздуха тоже влияет на скорость распространения звука, и его игнорирование может приводить увеличению погрешности при определении координат.

Следовательно, использование математической модели, учитывающей погодные условия, позволяет уменьшить погрешность без необходимости увеличения количества, микрофонов.

Заключение

Проведенное исследование подтвердило влияние погодных условий на погрешность локализации акустического источника. Эксперименты с использованием метода TDOA продемонстрировали, что температура воздуха способствует изменению скорости распространения звука, что приводит к смещению расчетных координат источника. При повышении температуры до $+40^{\circ}\text{C}$ ошибка локализации составила 139,49 м, а при понижении до -40°C – 150,96 м, что соответствует относительной погрешности около 30 %. Скорость и направление ветра оказывают асимметричное воздействие. Сильный ветер (32 м/с) вызвал отклонение до 1556 м, что соответствует относительной погрешности 335 % и на порядок превышает погрешности, связанные с температурой. Комбинация факторов (низкая температура и сильный ветер) приводит к наибольшим ошибкам, подчеркивая необходимость комплексного учета параметров среды. Результаты работы указывают на критическую важность интеграции метеорологических данных в алгоритмы акустической локализации.

В дальнейшем планируется расширение диапазона анализируемых параметров (например, влажность, рельеф местности). Полученные данные служат осно-

вой для оптимизации систем звуковой локализации в городских, промышленных и природоохранных участках.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Суторихин, И. А., Литвиненко С. А. Климатические и природные факторы, влияющие на распространение акустических волн // Известия Алтайского государственного университета. – 2011. – Т. 69, № 1-1. – С. 197-199.
2. Jinzhou, Li Joint TDOA, FDOA and PDOA Localization Approaches and Performance Analysis / Li Jinzhou // Remote Sensing. – 2023. – Т. 15, № 4
3. Шаход Д. М., Агафонов Е. Д. Анализ подходов и методов локализации акустических источников // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2024. – Т. 17, № 3. – С. 380–398.
4. Точилин, С. Н., Комиссаров П. В., Басакина С. С. Оценка погрешностей определения тротилового эквивалента воздушных взрывов // Химическая физика. – 2020. – Т. 39, № 8. – С. 35-39.
5. Laplace Correction – Explanation, Derivation, Examples, and FAQs [Электронный ресурс] // GeeksforGeeks. – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/laplace-correction/>
6. Sai Charan Trikootam, Maarten Hornikx The wind effect on sound propagation over urban areas: Experimental approach with an uncontrolled sound source // Building and Environment. – 2019. – № 149. – С. 561-570.
7. Wong G. S. K. Speed of sound in standard air // The Journal of the Acoustical Society of America. – 1986. – Т. 79, № 5. – С. 1359–1366

© А. М. Осипова, А. А. Якименко, 2025