Метод определения скорости воздушных судов по акустическим измерениям на местности

С.В. Дроздов,^{*a*} С.П. Драган,^{*б*} А.В. Богомолов,^{*в*} А.Э. Сулейманов^{*г*}

Государственный научный центр РФ — Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России,

отдел неионизирующих излучений. Россия, 119991, Москва, улица Живописная, д. 46.

Поступила в редакцию 09.04.2020, после доработки 16.08.2020, принята к публикации 24.08.2020.

Представлены результаты определения путевой скорости воздушного судна по измерениям параметров шума на местности, включая уровни звука, уровни звукового давления и доплеровское смещение частоты спектральных компонент равных уровней звукового давления. Показано, что определение скорости по измеренным в разных точках максимальным значениям уровня звука или уровня звукового давления приводит к большой погрешности (более 200%). Погрешность определения скорости воздушного судна, по измерениям доплеровского смещения частоты спектральных уровней звукового давления в одной точке на местности, составила менее 10%. Для уменьшения погрешности определения скорости воздушного судна, по измерениям в одной точке на местности, составила менее 10%. Для уменьшения погрешности определения скорости воздушного судна в зависимости определения и доплеровского смещения частоты спектральных компонент равных уровней звукового давления в одной точке на местности, составила менее 10%. Для уменьшения погрешности определения скорости воздушного судна погрешности определения скорости звуковой волны, а также изменения скорости распространения звука воздушного судна в зависимости от высоты полета. При измерениях в трех точках этот метод позволит корректно определять путевую скорость и пространственное положение воздушных судов, тем самым восполнит пробелы в исходных данных, необходимых, в частности, для расчета санитарно-защитных зон аэродромов, эксплуатирующих летательные аппараты с неизвестными шумовыми характеристиками.

Ключевые слова: акустические измерения, скорость воздушного судна, эффект Доплера, конус Доплера, авиационный шум, зонирование приаэродромных территорий. УДК: 534.6. PACS: 42.25.Fx, 03.65.Ud.

введение

В соответствии с требованиями нормативноправовых актов на территориях всех аэродромов Российской Федерации должны быть выделены подзоны, в которых, ввиду превышения уровня шумового воздействия, запрещается размещать объекты, предполагающие длительное присутствие персонала или населения [1, 2]. Выделение таких подзон на приаэродромных территориях осуществляется по границам, установленным по расчетам, учитывающим типы используемых воздушных судов (ВС), траектории их взлета, посадки и маневрирования в районе аэродрома, расписание полетов в дневное и ночное время, рельеф местности и климатологическое описание аэродрома [3].

Расчет границ подзон приаэродромных территорий по шумовому воздействию производится на основании расчетных или измеренных на местности характеристик шумности ВС, включая эквивалентный (L_{Aeq}) и максимальный уровни звука (L_{Amax}) [4–6]. Применительно к ВС для таких расчетов используют летно-технические и шумовые характеристики ВС, представленные в международной базе данных по шуму и летно-техническим характеристикам воздушных судов ANP [7]. Для ВС государственной авиации аналогичная база данных отсутствует.

Для расчета границ подзон приаэродромных территорий по шумовому воздействию необходимо измерение уровня шума в контрольных точках на местности осуществлять с «привязкой» к положению ВС в пространстве и его скоростью, а также с эксплуатационными характеристиками [8–14]. В гражданской авиации при расчетах скорости и положении ВС используют дифференциальные системы глобального позиционирования (DGPS), радиолокационное сопровождение, метод теодолитной триангуляции или масштабный фотометод [15–22]. В условиях установления границ санитарно-защитных зон аэродромов государственной авиации нет возможности получить данные о пространственном положении и скорости ВС. Поэтому разработка новых методов расчета путевой скорости ВС и их позиционирования в пространстве на основе акустических измерений, проводимых на местности, является актуальной междисциплинарной задачей.

1. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения уровней шума на местности для расчета границ подзон приаэродромных территорий по шумовому воздействию проводились на территории, прилегающей к аэродрому, вдали от жилой застройки. В качестве измерительных средств использованы два шумомера Туре 2250 с микрофонами Bruel & Kjaer Type 4193, оснащенных ветрозащитными колпаками. Микрофоны размещали мембраной вверх на высоте 1.5 м от земли на удалении друг от друга. Выбор микрофонов обусловлен наличием круговой диаграммы направленности в широком диапазоне частот. Измерения синхронизировались по времени. При помощи навигационных устройств осуществлялось определение координат микрофонов и расстояния от микрофонов до линии пути ВС. Также были получены значения путевой скорости и высоты полета семи ВС. Во время исследований угол тангажа BC составлял 0°.

Для определения скорости ВС апробированы два метода.

^{*a*} E-mail: drozdovsv87@gmail.com

⁶ E-mail: s.p.dragan@mail.ru

^e E-mail: a.v.bogomolov@gmail.com

^{*e*} E-mail: sulejmanov@gmail.com



Рис. 1. Результаты измерения усредненных УЗ и УЗД в двух разнесенных точках (по оси абсцисс — время, мс; по оси ординат — УЗ (L_{Aeq} , дБА) и УЗД (L_{Zeq} , дБ))

В первом методе скорость ВС определяли путем измерения эквивалентных уровней звука (УЗ) и уровней звукового давления (УЗД) за время 100 мс в местах установки микрофонов, расположенных на расстоянии 750 м друг от друга вдоль траектории полета. На основании полученных данных определяли время достижения максимумов значений эквивалентных УЗ и УЗД, что соответствует точкам минимального расстояния между ВС и микрофоном. В процессе измерения скорость ВС была равномерной на участке траектории между двумя микрофонами; зная расстояние между ними, определяли скорость ВС.

Во втором методе скорость ВС определяли по доплеровскому смещению частоты спектральных компонент, равных УЗД. При приближении ВС к микрофону, в соответствии с эффектом Доплера, частоты равных УЗД увеличиваются, а при удалении уменьшаются. Здесь предполагается, что в процессе пролета ВС вблизи микрофона спектр излучения не изменяется, а изменяются только регистрируемые частоты равных УЗД в соответствии с эффектом Доплера. Построение изолиний, т.е. линий равных УЗД, образует фигуру, которую можно назвать конусом Доплера. Время точки перегиба, или точки вершины конуса, соответствует времени минимального расстояния между измерительным микрофоном и ВС. Фиксируя интервал времени, в течение которого частота изменяется в сторону увеличения или в сторону уменьшения, определяется скорость ВС.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На рис. 1 представлены результаты измерения эквивалентных УЗ и УЗД за интервалы времени 100 мс при пролете транспортного самолета. Оранжевый цвет соответствует измерениям в точке 1, синий в точке 2.

График изменения УЗ (*L*_{Aeq}) имеет несколько максимумов. Определение времени достижения максимума в двух точках измерения сопряжено с большой погрешностью вследствие «размытости» пиков. Измерение максимумов УЗД вносит еще большую неопределенность в установление времени максимального сближения ВС с микрофонами. Значения

Таблица 1. Расчетная и путевая скорость ВС

	Скорость, м/с							
Номер пролета	1	2	3	4	5	6	7	
Путевая скорость ВС	111	111	103	111	106	97	106	
По измерениям L_{Aeq}	74	169	324	125	101	136	_	
По измерениям $L_{\rm Zeq}$	73	_	287	—	—	82	214	

Примечание: пропуски обусловлены неопределенностью измерений максимумов.

эквивалентных УЗД сильно зашумлены порывами ветра, несмотря на использование ветрозащитного колпака. При измерениях, эквивалентных УЗ и УЗД, часто регистрировали локальные максимумы, что усложняет установление однозначного критерия определения времени максимального сближения ВС с измерительным микрофоном.

В табл. 1 представлены значения скорости семи пролетов ВС, полученные по данным системы объективного контроля ВС и рассчитанные по максимуму эквивалентных УЗ и УЗД.

Результаты расчетов свидетельствуют, что погрешность определения путевой скорости ВС по измерению максимальных эквивалентных УЗ или УЗД в двух разнесенных точках относительно истинного значения достигает более 200%. Применение этого метода определения скорости ВС и последующими расчетами эквивалентного (L_{Aeq}) и максимального уровней звука (L_{Amax}) нецелесообразно, т.к. приведет к большим погрешностям и некорректному установлению границ санитарно-защитых зон аэродромов.

Помимо двухточечного метода определения скорости ВС, был апробирован метод, основанный на эффекте Доплера. Для этого записанный при пролете ВС сигнал с одного микрофона анализировался методом анализа постоянной относительной полосы пропускания (СРВ-анализ) в фиксированные промежутки времени. СРВ-анализ проводился с шириной полосы, равной 1/24 октавы, и шагом усреднения 100 мс, 300 мс, 500 мс, 1 с. СРВ-анализ позволяет представлять информацию о линиях равного уровня — изолиниях звукового давления в трехмерном виде. Такой вид анализа позволяет регистрировать



Рис. 2. СРВ-анализ шума ВС с шириной полосы 1/24 октавы относительно времени пролета

эффект Доплера при изменении частоты равных УЗД в зависимости от скорости ВС. При приближении ВС к измерительному микрофону частота увеличивается, а при удалении — снижается. На графиках линий равного уровня можно видеть конус Доплера, сначала частота линий равного уровня (изолиний) увеличивается от 2 кГц до 6 кГц, а затем снижается. Вершина конуса соответствует точке максимального сближения ВС с измерительным микрофоном. Для изолиний конус Доплера имеет четкие границы, что позволяет с минимальной погрешностью определить время максимального сближения ВС с измерительным микрофоном.

Для выявления факторов, влияющих на погрешность определения вершины конуса Доплера, проведен СРВ-анализ с разным шагом усреднения по времени. На рис. 2 приведены результаты анализа пролета транспортного ВС государственной авиации с шагом усреднения 1 с (рис. 2, a) и 100 мс (рис. 2, в). Слева представлены результаты СРВанализа, а справа — соответствующие изолинии. На графиках по оси абсцисс – частоты, по ординате — время, а уровень звукового давления изображен разной цветностью. Правый нижний график (рис. 2, г) демонстрирует изолинии в большом диапазоне частот и представляет собой «зашумленную» картину. На верхнем графике (рис. 2, б) изолинии имеют более четкие контуры очертания и соответствуют огибающим изолиниям нижнего графика. Вероятно, это обусловлено сглаживанием за счет увеличения времени усреднения от 100 мс до 1 с.

Следовательно, увеличение времени усреднения снижает количество помех, что сказывается на неравномерности изолинии — кривой доплеровского сдвига. Однако дальнейшее увеличение времени усреднения нецелесообразно, так как это приведет к снижению точности определения времени максимального сближения BC с измерительным микрофоном.

Для определения скорости ВС режим усреднения выбран равным 1 с. Для уменьшения воздействия шума, создаваемого помеховыми источниками и ветром, спектр рассматривался в диапазоне частот от 1 кГц до 16 кГц. На рис. 2, а стрелкой 1 показаны интерференционные полосы, возникающие в результате взаимодействия прямой и отраженной от земли волны, стрелкой 2 показаны тональные компоненты [23, 24].

Для определения доплеровского смещения частот построены изолинии равного давления для каждого пролета. На рис. 2, б стрелками 3 показаны неравномерности изолиний, вызванные интерференционными полосами. С повышением частоты неравномерность сглаживается.

В связи с неравномерностью диаграммы направленности излучаемого звука от пролетающего мимо микрофона ВС возникают шумовые флуктуации, затрудняющие точное определение времени максимального сближения. Для этого экстраполировались кривые при приближении и отдалении ВС и находилась точка пересечения. Временные точки выбирались вблизи точки перегиба изолинии.

После нахождения точки максимального сближения для четырех временных интервалов с известным значением частоты, равных УЗД, определены скорости ВС в соответствии с уравнением, описывающим эффект Доплера от приближающегося или удаляющегося источника звука:

$$f_0 = rac{f_n}{1 \pm rac{v \cdot \cos heta}{u}}, \quad \cos heta = rac{v \cdot (t_0 - t_n)}{\sqrt{v^2 \cdot (t_0 - t_n)^2 + r^2 + h^2}},$$

	Скорость в семи пролетах, м/с								
Характеристика	1	2	3	4	5	6	7		
Путевая скорость ВС	111	111	103	111	106	97	106		
Рассчитанная скорость	107	109	96	115	112	105	105		
Ошибка расчета, %	3.7	1.5	6.2	3.1	5.9	8.2	1.0		

Таблица 2. Расчетная и путевая скорость ВС

где t_n , f_n — время и частота, определяемая по изолинии равного звукового давления; f_0 — частота, регистрируемая при максимальном сближении BC с микрофоном; r — кратчайшее расстояние от микрофона до линии пути BC; h — высота полета BC; v — расчетная путевая скорость BC; u — скорость звука в воздухе (в расчетах принято u = 340 м/с); θ — текущий угол между пролетающим BC и измерительным микрофоном.

В табл. 2 приведены результаты расчетов путевых скоростей ВС и их сопоставление с истинными значениями.

Как видно из табл. 2, максимальная ошибка зарегистрирована при пролете 6 и составила 8.2%. Средняя ошибка расчета относительно истинной скорости ВС по всем пролетам составила 4.2%.

3. ОБСУЖДЕНИЕ

В исследовании не учтено влияние интерференции на построение изолиний. При определении скорости ВС изложенным методом следует выбирать временные интервалы, ближайшие к вершине конуса. То есть следует учитывать, что расстояние от ВС до измерительного микрофона при приближении убывает, а затем, при удалении, возрастает, а эффект Доплера регистрируется по изолиниям равного звукового давления. Поэтому необходимо использовать такие временные интервалы, в течение которых расстояния от ВС до микрофона, а соответственно, и УЗД спектральных компонент отличаются несущественно. Увеличение количества точек для экстраполяции изолинии позволит повысить точность расчета времени максимального сближения. Кроме того, для увеличения точности расчета в дальнейшем планируется осуществлять построение изолиний с учетом изменения скорости распространения звука в зависимости от высоты полета ВС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Определение скорости ВС по результатам акустических измерений на местности по доплеровскому смещению частоты равных УЗД имеет приемлемую погрешность (менее 10%). Для уменьшения этой погрешности необходимо учесть влияние интерференции, обусловленной взаимодействием прямой и отраженной от земной поверхности звуковой волны, а также изменение скорости распространения звука воздушного судна в зависимости от высоты полета, введя поправки в расчет изолиний. При измерении доплеровского смещения частоты равных УЗД в трех точках на местности этот метод позволит корректно определять путевую скорость и пространственное положение воздушных судов, а используя эти данные, определить усредненные

и эталонные характеристики шумности эксплуатируемых самолетов и тем самым восполнить пробелы в исходных данных, необходимых для расчета границ подзон приаэродромных территорий аэродромов государственной авиации по шумовому воздействию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Zaporozhets O., Tokarev V., Attenborough K. Aircraft Noise: Assessment, Prediction, and Control. Abingdon: SPON Press, 2011.
- 2. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 97.
- 3. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики. М.: Физматлит, 2019.
- Картышев О.А., Николайкин Н.И. // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2017. 20. № 3. С. 30.
- 5. *Dragan S. P., Bogomolov A. V., Zinkin V. N.* Methodical support of monitoring the acoustic safety of flight personnel // AIP Conference Proceedings. 2019.
- Bogomolov A. V., Dragan S. P., Zinkin V. N., Alekhin M. D. Acoustic Factor Environmental Safety Monitoring Information System // Proceedings of 22nd International Conference on Soft Computing and Measurements (SCM 2019). SPb, 2019. P. 215.
- 7. www.aircraftnoisemodel.org (дата обращения 01.03.2020).
- Техническое руководство по окружающей среде. Том 1. Методики сертификации воздушных судов по шуму. ICAO Doc 9501 AN/929
- 9. Суторихин И.А., Литвиненко С.А. // Известия Алтайского государственного университета. 2011. № 1-1 (69). С. 197.
- 10. Сыч Т. В., Герасимов С. И., Кулешов В. К. // Дефектоскопия. 2012. № 3. С. 3.
- 11. Гаврилюк В. Н., Тимушев С. Ф., Аксенов А. А. // Noise Theory and Practice. 2017. **3**, № 4 (10). С. 21.
- Хромулина Т.Д., Шеронова Т.С. // Актуальные исследования. 2020. № 3 (6). С. 32.
- 13. Коломиец С. М. // Исследования в области естественных наук. 2014. № 7 (31). С. 55.
- 14. Воронков С. С. // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2015. **1**, № 2. С. 183.
- Бойчук И.П., Руднев Ю.И., Руденко В.В., Гринек А.В. // Морские интеллектуальные технологии. 2019. 3, № 4 (46). С. 137.
- Гончаренко Б. И., Ермолаева Е. О. // Ученые записки физ. ф-та Моск. ун-та. 2014. № 6. С. 1.
- 17. Мошков П.А. // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). 2016. **15**, № 2. С. 152.
- Заграй Н. П., Вишневецкий В. Ю. // Известия ЮФУ. Технические науки. 2018. № 6 (200). С. 27.
- Петрухин Н. С., Пелиновский Е. Н., Бацына Е. К. // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. 2011. 93, № 10. С. 625.

- 20. Воскобойникова Г.М., Караваев Д.А., Хайретдинов М.С. // Сибирский журнал индустриальной математики. 2019. **22**, № 1 (77). С. 24.
- 21. Сорокова А.А., Шеронова Т.С., Булкин В.В. // Znanstvena Misel. 2020. № 39-1 (39). С. 48.
- 22. Балашова А.А. // Машиностроение и безопасность жизнедеятельности. 2018. № 2 (36). С. 43.
- 23. Berckmans D., Janssens K., Van der Auweraer H. et al. // Journal of Sound and Vibration. 2008. № 311. Pp. 1175.
- 24. *Allen M. P.* Analysis and synthesis of aircraft engine fan noise for use in psychoacoustic studies. Master's thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University; 2012.

A Method to Determine Aircraft Speed from Ground Acoustic Measurements

S. V. Drozdov^a, S. P. Dragan^b, A. V. Bogomolov^c, A. E. Suleymanov^d

State Scientific Center of the Russian Federation — Burnazyan Federal Medical Biophysical Center FMBA of Russia, department of non-ionizing radiation. Moscow 119991, Russia. E-mail: ^adrozdovsv87@gmail.com, ^bs.p.dragan@mail.ru, ^ca.v.bogomolov@gmail.com, ^dsulejmanov@gmail.com.

In present study we present some results on the measurement of the ground speed of an aircraft using noise parameters measured on the ground level, including sound levels, sound pressure levels, and Doppler frequency translations of the spectral components of equal sound pressure levels. It is shown that attempts to determine aircraft speed from the maximum values of the sound level or sound pressure level measured at different points leads to a relatively large error (more than 200%). On the other hand, the error in determining aircraft speed from measurements of the Doppler frequency translation of spectral components of equal sound pressure levels at one point on the ground is less than 10%. In order to reduce the error in determining the speed of an aircraft, it is necessary to consider the interference from direct and reflected sound waves from the earth's surface, as well as changes in the sound propagation speed of an aircraft and it's dependence on the aircraft altitude. When measurements are performed at three points this method correctly determines the ground speed and spatial position of an aircraft. Our approach fills in the gaps in the initial data, which is necessary, in particular, for calculating sanitary protection zones of airfields accommodating for aircrafts with unknown noise characteristics.

Keywords: acoustic measurements, aircraft speed, Doppler effect, Doppler cone, aircraft noise, zoning of aerodrome territories.

PACS: 42.25.Fx, 03.65.Ud. Received 09 April 2020.

English version: Moscow University Physics Bulletin. 2020. 75, No. 5. Pp. 459-464.

Сведения об авторах

- 1. Дроздов Сергей Владимирович науч. сотрудник; тел.: (499) 190-95-00, е-mail: drozdovsv87@gmail.com.
- 2. Драган Сергей Павлович доктор техн. наук, зав. лабораторией; тел.: (499) 190-95-00, e-mail: s.p.dragan@mail.ru.
- 3. Богомолов Алексей Валерьевич доктор техн. наук, профессор, вед. науч. сотрудник; тел.: (499) 190-95-00, e-mail: a.v.bogomolov@gmail.com.
- 4. Сулейманов Артем Эдуардович науч. сотрудник; тел.: (499) 190-95-00, e-mail: sulejmanov@gmail.com.