

УДК: 534.6
OECD: 01.03.AA

Применение доплеровского смещения частоты для определения скорости воздушных судов по акустическим измерениям на местности

Дроздов С.В.

Научный сотрудник, ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна ФМБА России,
г. Москва, РФ

Аннотация

Представлены результаты использования доплеровского смещения частоты для определения путевой скорости воздушного судна (ВС) по измерениям параметров шума на местности. Погрешность расчета скорости воздушного судна, по зарегистрированным значениям доплеровского смещения частоты спектральных компонент равных уровней звукового давления в одной точке на местности, составила менее 10% как для турбовинтовых, так и для реактивных ВС. Для уменьшения погрешности расчета скорости воздушного судна необходимо учесть влияние интерференции прямой и отраженной от земной поверхности звуковой волны, а также изменения скорости распространения звука воздушного судна в зависимости от высоты полета. Для расчета границ подзон приаэродромных территорий в гражданской авиации используют материалы международной базы данных шумовых и летно-технических характеристик ВС. Для государственной авиации не существует единой базы летно-технических характеристик ВС. Применение доплеровского смещения частоты при измерениях позволит корректно определять путевую скорость, тем самым восполнит пробелы в исходных данных, необходимых, в частности, для расчета санитарно-защитных зон аэродромов, эксплуатирующих ВС с неизвестными шумовыми характеристиками.

Ключевые слова: акустические измерения, скорость воздушного судна, эффект Доплера, авиационный шум, нормирование, зонирование приаэродромных территорий, защита окружающей среды.

Application of Doppler frequency shift to determine aircraft speed from acoustic measurements on the ground

Droz dov S.V.

Research fellow, State Research Center - Burnasyan Federal Biophysical Center of Federal Medical Biological Agency, Moscow, Russia

Abstract

The results of the Doppler frequency shift application for determining the ground speed of an aircraft from measurements of noise parameters on the ground are presented. It is shown that the application of methods for determining the speed for civil aviation is often not applicable to the aircraft of state aviation. The error in determining the speed of an aircraft, based on measurements of the Doppler level of the frequency of spectral components of equal sound pressure levels at one point on the ground, which are less than 10% for turboprop and jet aircraft. To reduce the error in determining the speed of the aircraft, it is necessary to take into account

the influence of the interference of the direct and reflected from the earth's surface sound waves, as well as changes in the speed of sound propagation of the aircraft depending on the flight altitude. The use of Doppler with frequency violation during measurements allows to correctly determine the ground speed, thereby filling in the gaps in the initial data necessary, in particular, for calculating the sanitary protection zones of aerodromes operating aircraft with unknown noise characteristics.

Keywords: *acoustic pollution, guidelines, sound insulation, noise mapping, noise.*

Введение

В настоящее время наиболее неблагоприятным фактором, воздействующим на авиационных специалистов и население, проживающее на территориях, прилегающих к аэродромам, является авиационный шум[1]. Имеются многочисленные данные о вредном влиянии авиационного шума на организм человека[4,5,6,7]. Так, по данным исследований [2] нарушения состояния здоровья и повышенная смертность отмечены у населения, проживающего рядом с аэродромами.

Для уменьшения неблагоприятного воздействия авиационного шума и определения шумовой обстановки на прилегающих к аэродромам территориях в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами осуществляется шумовое зонирование приаэродромных территорий. Расчет контуров авиационного шума осуществляется по двум параметрам – эквивалентным и максимальным уровням звука. Для таких расчетов необходимо знать продолжительность шумового воздействия, зависящую от скорости ВС[8].

В современной практике для расчета границ подзон приаэродромных территорий в гражданской авиации используют материалы международной базы данных шумовых и летно-технических характеристик ВС. Для ВС государственной авиации соответствующих баз данных не существует.

При расчете границ подзон приаэродромных территорий аэродромов государственной авиации в большинстве случаев не представляется возможным получить летно-технические характеристики ВС, такие как скорость ВС, положение ВС в пространстве. Таким образом, разработка новых методов определения скорости и пространственного положения воздушных судов является актуальной междисциплинарной задачей.

В гражданской авиации для расчета скорости и положения ВС в пространстве используют дифференциальные системы глобального позиционирования (DGPS), радиолокационное сопровождение, метод теодолитной триангуляции или масштабный фотометод[3]. В настоящее время акустических методов определения скорости и пространственного положения ВС не существует. Расчет скорости ВС, основанный на измерении максимумов эквивалентных уровней звука или звукового давления в двух точках, разнесенных в пространстве, приводит к большим погрешностям за счёт размытости пиков УЗ или УЗД[10]. Использование спектрально-временных характеристик сигнала (СРВ анализ) для определения скорости ВС представляется наиболее перспективным акустическим методом, т.к. обладает минимальной погрешностью.

1. Материалы и методы

Акустические измерения на местности проводились на территории, прилегающей к аэродрому, вдали от жилой застройки.

В качестве измерительных средств использован шумомер Type 2250 с микрофоном Bruel & Kjaer Type 4193 оснащенный ветрозащитным колпаком. Микрофон размещали мембраной вверх, на высоте 1,5 метра от земли. При помощи навигационных устройств осуществлялось определение координат микрофонов и расстояния от микрофонов до линии пути ВС. Также были получены от штурманской службы значения путевой скорости и высоты полета для семи ВС. Во время исследований угол тангажа ВС составлял 0 градусов, т.е. параллельно земле, таким образом имелась возможность точного определения ВС относительно положения микрофона.

Скорость ВС рассчитывали 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. 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 равных УЗД образует коническую фигуру. Вершина конуса соответствует времени минимального расстояния между измерительным микрофоном и ВС. Для расчета скорости ВС использовали короткие временных интервалов, в течении которых частота увеличивается или уменьшается.

2. Результаты исследования

Сигнал, записанный при пролете ВС анализировался методом СРВ-анализа (Constant Percentage Bandwidth) в фиксированные промежутки времени, равные 100 мс, 300 мс, 500 мс, 1 с. СРВ-анализ проводился с шириной полосы пропускания, равной $1/24$ октавы. В результате анализа был получен массив значений УЗД в зависимости от времени и частоты. На рисунке 1а приведены результаты визуализации СРВ-анализа пролета реактивного самолета.

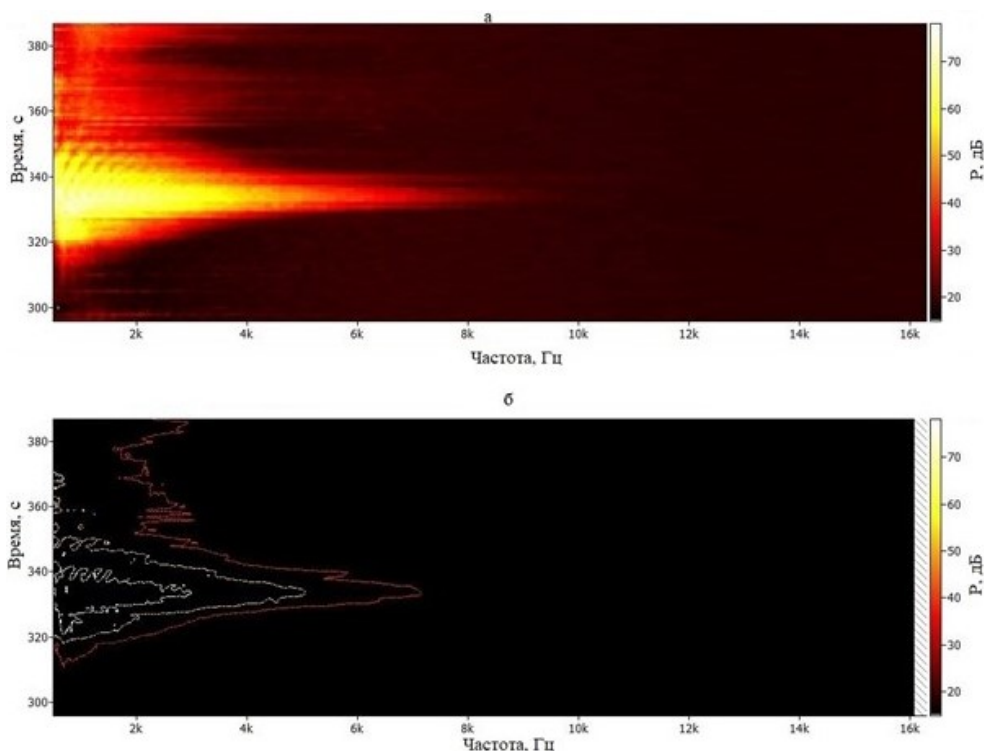


Рис. 1. СРВ анализ шума реактивного ВС с шириной полосы $1/24$ октавы относительно времени пролета

При приближении ВС к измерительному микрофону частота увеличивается, а при удалении – снижается. На нижнем графике (б) представлены изолинии равного звукового давления. Как видно из графика линии равного уровня представляют собой конус, вершина которого соответствует точке максимального сближения ВС с измерительным микрофоном.

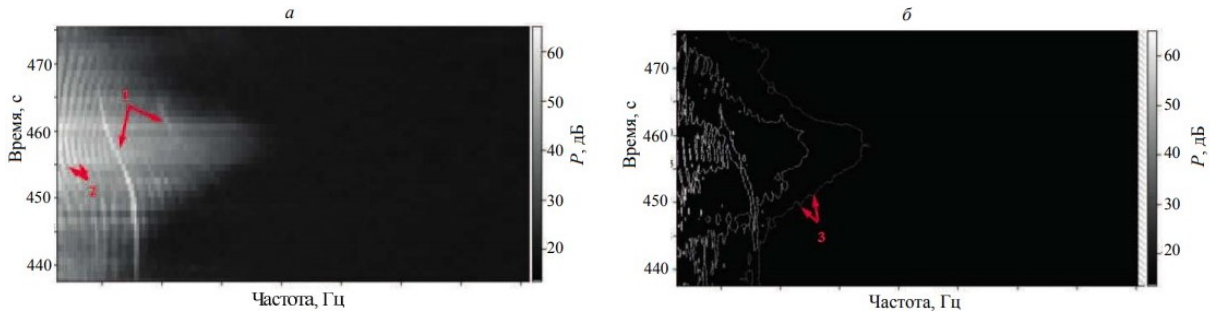


Рис. 2. СРВ анализ шума ВС с шириной полосы 1/24 октавы относительно времени пролета

Для определения скорости ВС режим усреднения выбран равным 1 с, что приводит к более сглаженным изолиниям равного давления, чем при интервалах 100, 300 и 500 мс. Для снижения помехового действия постороннего шума, спектр анализировался 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, стрелкой 3 показана неравномерность изолиний, вызванная интерференционными полосами[9].

Определение точного времени максимального сближения ВС с измерительным микрофоном усложнено зашумленностью исходного сигнала, что может быть вызвано неравномерностью диаграммы направленности акустического излучения ВС. Для нивелирования шумов кривые изолиний экстраполировались вблизи точки максимального сближения на разных сторонах конуса, соответствующих приближению или отдалению ВС. Точка пересечения сглаженных образующих конуса соответствует времени максимальному сближению ВС с микрофоном.

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

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

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

В таблице 1 приведены результаты расчетов [10] путевых скоростей ВС и их сопоставление со значениями скорости ВС, полученными непосредственно от диспетчеров.

Таблица 1

Расчетная и путевая скорость ВС

| Характеристика | Номер пролета | | | | | | |
|---------------------------|---------------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| Путевая скорость ВС, м/с | 111 | 111 | 103 | 111 | 106 | 97 | 106 |
| Расчетанная скорость, м/с | 107 | 109 | 96 | 115 | 112 | 105 | 105 |
| Ошибка расчета, % | 3,7% | 1,5% | 6,2% | 3,1% | 5,9% | 8,2% | 1,0% |

Как видно из табл. 1 средняя ошибка расчета, относительно истинной путевой скорости ВС по всем пролетам составила 4,2%. Максимальная ошибка не превышала 8,2%.

3. Обсуждение

Для уточнения формы изолиний необходимо учитывать влияние интерференции. В настоящей методике эффект Доплера регистрируется по изолиниям равного звукового давления и не учитывает изменение расстояния от ВС до микрофона, поэтому для сглаживания изолиний используются временные интервалы, в течение которых расстояния от ВС до микрофона, а соответственно и УЗД спектральных компонент отличаются несущественно. Так же в дальнейшем, для увеличения точности расчетов необходимо учитывать изменение скорости распространения звука в зависимости от высоты полета ВС. В настоящем методе не учитывается диаграмма направленности акустического излучения ВС. Дальнейшая модификация метода позволит наиболее точно определять скорость ВС и положение в пространстве по измерениям на местности.

Заключение

При измерениях авиационного шума на местности, в условиях отсутствия информации о скорости и положении ВС в пространстве, прогнозирование безопасных уровней может быть выполнено с большой погрешностью. Применение эффекта Доплера позволяет с достаточной точностью определить искомые параметры и рассчитать границы санитарно-защитных зон аэродромов государственной авиации. Возможно увеличение точности расчетов, введя соответствующие поправки, связанные с влиянием интерференции, обусловленной взаимодействием прямой и отраженной от земной поверхности звуковой волны, а также поправки, связанные с изменением скорости распространения звука воздушного судна в зависимости от высоты полета.

Список литературы

1. Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Ахметзянов И.М., Шешегов П.М. Экологические аспекты безопасности жизнедеятельности населения, подвергающегося действию авиационного шума // Теоретическая и прикладная экология. 2011. № 3. С. 97-101.
2. Цыплухина Ю.В., Манченко Е.В. Воздействие авиационного шума на здоровье населения // Современные технологии обеспечения гражданской обороны и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. 2016, № 1-1 (7). С. 356-360.
3. Техническое руководство по окружающей среде. Том 1. Методики сертификации воздушных судов по шуму. ICAO Doc 9501 AN/929

4. Солдатов С.К., Зинкин В.Н., Богомолов А.В., Драган С.П., Кукушкин Ю.А. Фундаментальные и прикладные аспекты авиационной медицинской акустики // Физматлит. 2019.
5. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Драган С.П., Кукушкин Ю.А., Сомов М.В., Пенчученко В.В., Харитонов В.В., Шешегов П.М. — Акустическая безопасность летного и инженерно-технического состава государственной авиации // Национальная безопасность / 2017. – № 4. – С. 19 - 35.
6. Зинкин В.Н., Драган С.П., Харитонов В.В., П.М. Шешегов, Мищенко А.А. Характеристика гигиенической обстановки на рабочих местах авиационных специалистов воздушных судов государственной авиации // Вестник российской военно-медицинской академии. 2018. С. 64-67
7. Зинкин В.Н., Солдатов С.К., Драган С.П., Кукушкин Ю.А., Сомов М.В., Пенчученко В.В., Харитонов В.В., Шешегов П.М. — Акустическая безопасность летного и инженерно-технического состава государственной авиации // Национальная безопасность /2017. – № 4.
8. ГОСТ 22283-2014 "Шум авиационный. Допустимые уровни шума на территории жилой застройки и методы его измерения"(дата обращения 12.01.2021).
9. Berckmans D., Janssens K., Van der Auweraer H. et al. Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance // Journal of Sound and Vibration. 2008. № 311. Pp. 1175–1195
10. Дроздов С.В. , Драган С.П., Богомолов А.В., Сулейманов А.Э. Метод определения скорости воздушных судов по акустическим измерениям на местности//ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2020. № 5. С. 70–74.

References

1. Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Akhmetzyanov I.M., Sheshegov P.M. Environmental aspects of life safety of the operating population exposed to aircraft noise // Theoretical and Applied Ecology. 2011. No. 3. P. 97-101.
2. Tsyplukhina Y.V., Manchenko E.V. The impact of aircraft noise on public health // Modern technologies for civil defense and emergency response. 2016, No. 1-1 (7). P. 356-360.
3. Technical manual for the environment. Volume 1. Techniques for noise certification of aircraft. ICAO Doc 9501 AN / 929
4. Soldatov S.K., Zinkin V.N., Bogomolov A.V., Dragan S.P., Kukushkin Yu.A. Fundamental and applied aspects of aviation medical acoustics // Fizmatlit. 2019.
5. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Dragan S.P., Kukushkin Yu.A., Somov M.V., Penchuchenko V.V., Kharitonov V.V., Sheshegov P.M. - Acoustic safety of flight and engineering personnel of state aviation // National Security / 2017. - No. 4. - P. 19 - 35.
6. Zinkin V.N., Dragan S.P., Kharitonov V.V., Sheshegov P.M., Mishchenko A.A. Characteristics of the hygienic situation at the workplaces of aviation specialists of state aviation aircraft //Bulletin of the russian military-medical academy. 2018. p. 64-67
7. Zinkin V.N., Soldatov S.K., Dragan S.P., Kukushkin Yu.A., Somov M.V., Penchuchenko V.V., Kharitonov V.V., Sheshegov P.M. - Acoustic safety of flight and engineering personnel of state aviation // National Security / 2017. - No. 4.
8. GOST 22283-2014 "Aviation noise. Permissible noise levels on the territory of residential buildings and methods of its measurement" (date of the application 12.01.2021)
9. Berckmans D., Janssens K., Van der Auweraer H. et al. Model-based synthesis of aircraft noise to quantify human perception of sound quality and annoyance // Journal of Sound and Vibration. 2008. № 311. Pp. 1175–1195

10. Drozdov, S.V., Dragan, S.P., Bogomolov, A.V. et al. A Method to Determine Aircraft Speed from Ground Acoustic Measurements. *Moscow Univ. Phys.* 75, 459–464 (2020).