

УДК 534.321.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ АКУСТО-ЭМИССИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОЗДУШНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ РЕГИСТРИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА СВЧ И ОПТИЧЕСКИХ ЛУЧАХ

В.Д. РУБЦОВ, С.А. ДУБЯНСКИЙ

Рассматривается метод определения акусто-эмиссионных характеристик воздушных судов (ВС) с использованием параметрических регистрирующих устройств на СВЧ и оптическом лучах. Приводятся результаты исследования акустической чувствительности и ширины полосы регистрирующих устройств при использовании этих лучей.

Ключевые слова: акусто-эмиссионные характеристики, воздушное судно, регистрирующее устройство, СВЧ и оптический лучи.

Проблема снижения шума самолетов и вертолетов является частью общей программы охраны окружающей среды. Сила звука I – это энергия, переносимая волной через единицу площади за единицу времени, и измеряется в $Вт/м^2$. В нормативных документах в качестве характеристики интенсивности звука используется не сила звука I , а величина $\beta = 10 \lg(I/I_0)$ дБ.

В зависимости от частоты f акустические колебания подразделяются на *инфразвуковые* ($f < 20$ Гц), *акустические* (слышимые, 20 Гц $< f < 20$ кГц) и *ультразвуковые* ($f > 20$ кГц). Спектральный состав шума, излучаемого ВС, существенно зависит от типа ВС.

Основным источником шума реактивных самолетов является реактивный двигатель, 2/3 акустической мощности которого приходится на ультразвук. Основными источниками шума винтовых самолетов и вертолетов являются двигатель и винт. Их шум содержит более низкие по сравнению с шумом реактивных самолетов частотные составляющие, причем значительная часть мощности шума вертолетов приходится на инфразвук.

Представляется актуальной задачей разработка чувствительных технических средств контроля акусто-эмиссионных характеристик ВС, обеспечивающих регистрацию акустических волн в широком диапазоне от инфразвука до ультразвука. Стандарты по шуму устанавливают допустимый уровень шума дозвуковых реактивных и винтовых самолетов и вертолетов в пределах 68 – 107 дБ, что при пороге слышимости $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² соответствует диапазону подлежащих контролю значений силы звука I от $6,2 \cdot 10^{-6}$ до $5,1 \cdot 10^{-2}$ Вт/м², что соответствует избыточному звуковому давлению δP в стандартной атмосфере, вызванному возмущением среды типа акустических волн, равному 0,52 – 4,7 мбар.

В [1] рассмотрен принцип приема упругих (в частности акустических) волн, основанный на регистрации продуктов параметрического взаимодействия волн в среде, накопленных по длине зондирующего луча, колебания в котором имеют ту же, что и регистрируемые колебания, или отличную от них физическую природу, позволяющий регистрировать волновые возмущения среды в широком диапазоне частот. В [1] также показано, что в предположении малости ширины луча девиация фазы колебаний в луче, вызванная изменением скорости распространения волн в нем под воздействием возмущения среды в виде упругой волны, равна $\delta\psi(\rho, \alpha) = \Delta\psi \left| \sin[\pi\rho(\cos\alpha - g)] / \pi\rho(\cos\alpha - g) \right|$, где $\Delta\psi = (vL/c^2) \cdot (dc/dP) \cdot \delta P$ – максимум девиации фазы; $v = 2\pi f$ и f – круговая и циклическая частоты колебаний в луче; L – его длина; δP – вызванное возмущением среды избыточное давление; α – угол между лучом и направлением распространения возмущения; $g = a/c$, a и c – скорости распространения регистрируемых волн и волн в луче; $\rho = L/\lambda$, dc/dP – крутизна зависимости $c(P)$. При приеме акустических волн в воздухе на оптический луч $dc/dP = 81$ м/с мбар [1]. Анализ показал, что это справедливо также и для волн СВЧ диапазона.

Так как ультразвук в воздушной среде быстро затухает, использование ультразвукового луча для определения акусто-эмиссионных характеристик ВС представляется нецелесообразным. При регистрации акустических волн с использованием электромагнитного (оптического или СВЧ) луча изменение скорости распространения волн в луче и соответственно фазы колебаний в нем обусловлено изменением под воздействием возмущения диэлектрической проницаемости среды.

Поскольку скорость распространения электромагнитных волн в луче много больше скорости распространения регистрируемых акустических волн, для электромагнитного луча можно положить $g \approx 0$. При этом имеем $\delta\psi(\rho, \alpha) = \Delta\psi |\sin[\pi\rho(\cos\alpha)] / \pi\rho(\cos\alpha)|$.

Полученное выражение отражает зависимость девиации фазы колебаний в луче от угла α и может рассматриваться как амплитудная диаграмма направленности (ДН) регистрирующего устройства. Максимум ДН имеет место при $\alpha = \pm \pi/2$, причем ширина ее главного лепестка по нулевому уровню при $\rho \gg 1$ равна $\delta\alpha = 2/\rho$.

Для сравнительной оценки чувствительности регистрирующих устройств на оптическом и СВЧ лучах необходимо произвести анализ максимума девиации фазы. Примем следующие значения параметров: f - для СВЧ луча $9,4 \cdot 10^9$ Гц, что соответствует типовой для техники СВЧ длине волны $\lambda_0 = 3,2$ см; для оптического луча $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц, что соответствует длине волны $\lambda_0 = 0,63$ мкм колебаний, генерируемых газовым Ne-He лазером; L - для оптического луча 1 м, для СВЧ луча 100 м; δP - для обоих лучей 1 мбар.

Из проведенных расчетов следует, что максимум девиации фазы $\Delta\psi$ при $\delta P = 1$ мбар равен: для оптического луча $2,7$ рад, для СВЧ луча $5,3 \cdot 10^{-3}$ рад. Поскольку $\Delta\psi$ пропорционально δP , для определенного выше диапазона возможных при контроле акусто-эмиссионных характеристик ВС значений избыточного звукового давления δP 0,52 – 4,7 мбар значения максимума девиации фазы для оптического и СВЧ лучей будут лежать соответственно в пределах: 1,4 – 12,7 рад и $2,8 \cdot 10^{-3}$ – $2,5 \cdot 10^{-2}$ рад.

Как видно, существенно большей чувствительностью обладает устройство регистрации на оптическом луче. С учетом относительно большой протяженности СВЧ луча его использование целесообразно лишь при размещении средств контроля акусто-эмиссионных характеристик ВС на местности. Устройство же контроля на оптическом луче может быть использовано как для внешнего контроля шума ВС, так и для контроля шума в салонах и кабинах самолетов и вертолетов.

Заметим, что в случае использования оптического луча отсутствует присущее устройству на СВЧ луче ограничение снизу на длину волны регистрируемых акустических колебаний, связанное с тем, что для обеспечения модуляционного эффекта длина волны колебаний в луче должна быть много меньше длины волны регистрируемых акустических колебаний. При использовании оптического луча это условие выполняется практически всегда. Так при регистрации ультразвука с частотой $F = 100$ кГц, которой соответствует длина волны $\lambda = a/F = 3,3$ мм, что существенно больше длины волны колебаний в оптическом луче $\lambda_0 = 0,63$ мкм. В то же время при регистрации акустических волн с использованием СВЧ лучей сантиметрового диапазона с длиной волны $\lambda_0 = 3,2$ см или миллиметрового диапазона с длиной волны $\lambda_0 = 8$ мм, полагая, что длина волны $\lambda = 10 \lambda_0$, получаем максимальную частоту регистрируемых колебаний $F = a/\lambda$ соответственно равной 1 кГц и 4 кГц.

Для регистрации достаточно малых фазовых сдвигов в устройстве на СВЧ луче целесообразно использование метода микрофазометрии, позволяющих регистрировать фазовые сдвиги порядка 10^{-8} рад [2]. Суть метода заключается в следующем. Производится периодическое векторное вычитание колебаний, разность фаз между которыми подлежит измерению, из опорного сигнала той же частоты. При этом амплитуды сигналов предварительно выровнены до одной величины. В результате формируется амплитудно-модулированное колебание с глубиной

модуляции, определяемой измеряемой разностью фаз. Выходной сигнал микрофазометра получается путем амплитудного детектирования этого колебания.

На рис. 1 представлена структурная схема устройства регистрации волновых возмущений с СВЧ зондирующим лучом. Устройство работает следующим образом. Из колебаний опорного генератора (ОГ) с помощью умножителя (Ум.) формируются излучаемые СВЧ радиопередающим устройством (СВЧ РПДУ) зондирующие колебания. Из колебаний того же ОГ формируются также излучаемые УКВ РПДУ колебания, предназначенные для передачи опорной фазы в пункт приема.

Когерентные колебания СВЧ и УКВ каналов принимаются соответствующими радиоприемными устройствами (РПУ). При этом принятый по УКВ каналу опорный сигнал используется, с одной стороны, для формирования гетеродинной частоты в СВЧ РПУ, а с другой стороны, для демодуляции СВЧ сигнала.

Демодуляция осуществляется в кольце фазовой автоподстройки (ФАП), включающем в себя фазовый дискриминатор (ФД), фильтр нижних частот (ФНЧ), управляющий элемент (УЭ) и фазовращатель (Фв.). С помощью ФАП осуществляется подстройка опорного сигнала с выхода УКВ РПУ под среднее значение фазы сигнала промежуточной частоты с выхода СВЧ РПУ, равной частоте опорного сигнала. При этом инерционность ФАП, определяемая полосой пропускания ФНЧ, выбирается такой, чтобы система ФАП успевала отслеживать лишь медленные изменения фазы сигнала за счет дестабилизирующих факторов (температурных изменений, изменений условий распространения и т.п.). Полезный сигнал, обусловленный фазовой модуляцией СВЧ сигнала со стороны источника возмущений, с выхода ФД поступает на усилитель (Ус.) и далее после дополнительной фильтрации в полосовом фильтре (ПФ) на выход.

Рассмотренное регистрирующее устройство может быть упрощено, если перейти от фазовых измерений к частотным, что возможно с учетом того, что мгновенная частота $\nu(t)$ колебаний в луче является производной полной фазы этих колебаний, с последующим обратным переходом к фазовым измерениям, осуществляемым путем пропускания принятого сигнала через узкополосный ПФ и измерения разности фаз колебаний на входе и выходе этого фильтра. При этом, поскольку в результате этих преобразований осуществляется переход от прямых фазовых измерений к относительным, отпадает необходимость в организации канала передачи опорной фазы. Подробнее принцип работы такого устройства изложен в [3]. Там же приведена структурная схема устройства.

Максимум девиации разности фаз колебаний на входе и выходе ПФ, характеризующего чувствительность устройства [3] $\Delta\psi_{\text{ПФ}} = (2 Q/\nu_{\text{ПФ}}) (\omega \nu L/c^2) (dc/dP) \delta P$, где Q и $\nu_{\text{ПФ}}$ - добротность и частота колебательного контура; ω - частота регистрируемых колебаний. При $Q=100$, $F=\omega/2\pi=1 \text{ кГц}$, $L=100 \text{ м}$, $\delta P=1 \text{ мбар}$, полагая $c=3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, $dc/dP=81 \text{ м/с мбар}$, $f=(\nu/2\pi)=9,4 \text{ ГГц}$, $f_{\text{ПФ}}=(\nu_{\text{ПФ}}/2\pi)=100 \text{ кГц}$, получаем $\Delta\psi_{\text{ПФ}}=1,1 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$.

Для определенного выше диапазона возможных при контроле акусто-эмиссионных характеристик ВС значений избыточного звукового давления δP 0,52 – 4,7 мбар значения максимума девиации фазы будут лежать в пределах $5,7 \cdot 10^{-6} - 5,2 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$. Как видно, при переходе от прямых фазовых измерений к относительным чувствительность устройства снижается.

На рис. 2 представлена структурная схема устройства регистрации волновых возмущений с оптическим зондирующим лучом, построенного по принципу интерферометра. Устройство работает следующим образом. Формируемые оптическим квантовым генератором (ОКГ) электромагнитные волны оптического диапазона поступают на интерферометр, включающий в себя отражатель (Отр.) и пьезоэлемент (ПЭ) с отражающей поверхностью, далее после двукратного отражения от этих элементов колебания поступают в среду с источником возмущения и после отражения еще от одного отражателя возвращаются обратно, где складываются с колебаниями от ОКГ в фотоприемнике (ФП), осуществляющем прием «на темном фоне».

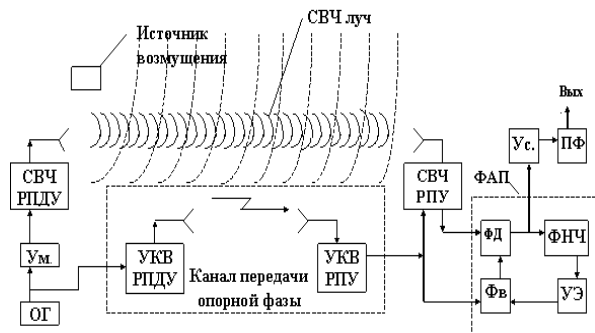


Рис. 1

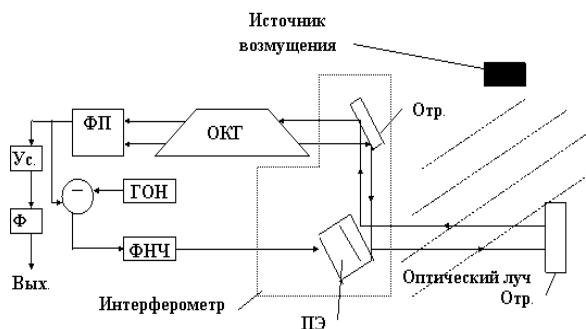


Рис. 2

Сигнал с выхода ФП вычитается из постоянного напряжения, генерируемого генератором опорного напряжения (ГОН), предназначенного для обеспечения разнополярного напряжения на выходе вычитающего устройства. Сигнал с выхода вычитающего устройства через фильтр нижних частот (ФНЧ) поступает на ПЭ с отражающей поверхностью, выполняющий роль исполнительного элемента кольца фазовой автоподстройки.

Фаза колебаний, отраженных от внешнего отражателя сигналов, меняется путем изменения с помощью ПЭ длины луча до тех пор, пока среднее значение фазы не станет сдвинутым относительно колебаний с выхода ОКГ на близкий к π угол относительно колебаний с выхода ОКГ, что соответствует равенству нулю среднего значения напряжения с выхода вычитающего устройства.

Вызванные волновыми возмущениями отклонения фазы колебаний в луче от среднего значения приводят к появлению на выходе ФП полезного сигнала, усиливаемого далее усилителем (Ус.) и фильтруемого фильтром (Ф), полоса пропускания которого согласована со спектром флуктуаций фазы колебаний в зондирующем луче.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // Радиотехника и электроника. - 1997. - Т. 42. - № 6.
2. Бернштейн И.Л. Опыт Санька на радиоволнах // Доклады АН СССР. - 1950. - Т. 36. - № 4.
3. Дубянский С.Н. Анализ характеристик устройств регистрации волновых возмущений в среде с использованием оптических, СВЧ и ультразвуковых лучей // Статья в данном Вестнике.

DEFINITION OF ACOUSTIC-EMISSION CHARACTERISTICS OF AIRCRAFT WITH THE USE OF PARAMETRIC REGISTERING DEVICES ON SUPERHIGH FREQUENCIES AND OPTICAL BEAMS

Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A.

This article describes the method of definition of acoustic-emission characteristics of aircraft with the use of parametric registering devices on superhigh frequencies and optical beams. The results of the research of acoustic response and bandwidth of registering devices when using those beams are given.

Keywords: acoustic-emission characteristics, aircraft, registering devices, superhigh frequencies and optical beams.

Сведения об авторах

Рубцов Виталий Дмитриевич, 1938 г.р., окончил МАИ им. С. Орджоникидзе (1961), профессор, доктор технических наук, почетный работник науки и техники РФ, профессор кафедры технической эксплуатации радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта МГТУ ГА, автор более 200 научных работ, область научных интересов - радиотехника, радионавигация, акустика, навигация и управление воздушным движением, эксплуатация воздушного транспорта.

Дубянский Сергей Александрович, 1986 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (2009), соискатель МГТУ ГА, эксперт ООО «Альфа-серт», автор 8 научных работ, область научных интересов - радиофизика, радиотехника, нанотехнология, эксплуатация воздушного транспорта.