

УДК 534.321.9

**РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ МЕТЕОСЛУЖБ АЭРОПОРТОВ
О ШТОРМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО
УСТРОЙСТВА ПРИЕМА ИНФРАЗВУКА
НА УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И СВЧ ЗОНДИРУЮЩИХ ЛУЧАХ**

Дубянский С.А.

*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
Москва, e-mail: sergeydubynskiy@rambler.ru*

В статье рассматривается метод раннего предупреждения метеослужб аэропортов о штормах с использованием параметрического устройства приема инфразвука на ультразвуковом и СВЧ зондирующих лучах. Описаны особенности возбуждаемого океаническими волнами инфразвука, затрудняющие его регистрацию обычными измерительными приборами. Показано, что регистрирующее устройство на ультразвуковом луче существенно узкополоснее устройства на СВЧ луче. Узкополосность регистрирующего устройства в этом случае следует отнести к его положительным качествам, так как оно не реагирует на волновые возмущения вне инфразвукового диапазона частот и, следовательно, достаточно хорошо защищено от помех. Приведены результаты сравнительного исследования чувствительности и направленных свойств регистрирующих устройств при использовании ультразвукового и СВЧ зондирующих лучей. Предложена схема аппаратурной реализации параметрического регистрирующего устройства. Показано, что для регистрации достаточно малых фазовых сдвигов в регистрирующем устройстве на ультразвуковом зондирующем луче целесообразно использование методов микрофазометрии.

Ключевые слова: шторм, метеослужба аэропорта, инфразвук, параметрическое устройство, зондирующий луч

**EARLY WARNING OF WEATHER SERVICES OF AIRPORTS ABOUT STORMS
WITH USE OF PARAMETRIC DEVICE OF RECEPTION OF INFRA-AUDIBLE
SOUND ON ULTRASONIC AND MICROWAVE PROBING BEAMS**

Dubyanskiy S.A.

Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, e-mail: sergeydubynskiy@rambler.ru

The method of early warning of weather services of airports about storms with use parametric device of reception of infra-audible sound on ultrasonic and microwave boring beams is considered. The distinctive features of ocean waves-induced infra-sound complicating its registration by ordinary measuring equipment are described. The device registering wave disturbances on ultrasonic beam is proven to be more narrow-banded than the microwave beam based device. The bandlimitedness of this device can be considered as an advantage because of its interference protection properties. The results of comparative analysis of sensitivity and directional response characteristics of considered devices are revealed. The scheme of hardware realization of the parametrical registering device is offered. For registration of enough small phase shifts in the registering device on the ultrasonic probing beam the method of phase deviation analysis is proven to be the most appropriate.

Keywords: storm, airport weather service, infra-audible, parametric device, probing beam

Штормы в морях и океанах являются мощными источниками инфразвука. Он возникает вследствие турбулентности потоков жидкостей и газов, имеющей место при шторме. При этом инфразвуковые волны, называемые «голосом моря» и имеющие частоту 8–13 Гц, обгоняя распространение самого шторма, передвигающегося со скоростью $V_{ш} = 20–30$ м/с (72–108 км/ч), могут служить предвестником шторма в приморских районах [1].

Они распространяются своеобразно: излучение сначала идет вверх, на высотах порядка 50 км изменяет свое направление, а затем на расстоянии 200–300 км от источника возвращается к поверхности Земли, отражается от нее и вновь уходит вверх, обгоняя распространение самого шторма, и доходит до берега по воде со

скоростью $V_{вода} = 1600$ км/ч, а по воздуху – $V_{возд} = 1200$ км/ч. Его регистрация может быть использована для раннего предупреждения метеослужб приморских аэропортов о приближающихся опасных атмосферных возмущениях. При расстоянии $R = 1000$ км от района шторма до аэропорта время прихода инфразвука составляет:

по воде –

$$T_{вода} = R/V_{вода} \approx 0,63 \text{ ч} \approx 37,5 \text{ мин},$$

а по воздуху

$$T_{возд} = R/V_{возд} \approx 0,83 \text{ ч} \approx 50 \text{ мин},$$

что существенно меньше времени прихода шторма

$$T_{ш} = R/V_{ш} = 9,3–13,9 \text{ ч}.$$

Инfrasound занимает относительно небольшой участок частотной шкалы: от 20 до 0 Гц. Он разбит на ряд поддиапазонов: от 20 до 1 Гц; от 1 до 0,1 Гц; от 0,1 до 0,01 Гц; от 0,01 до 0,001 Гц. При этом акустические колебания ниже 0,01 Гц называются субинфразвуковыми. Интенсивность инфразвука в децибелах относительно порога слышимости $I_0 = 10^{-12}$ Вт/м² [3] составляет 75–95 дБ, что соответствует интенсивности $I = 3,2 \cdot 10^{-5} - 3,2 \cdot 10^{-3}$ Вт/м². Поскольку избыточное звуковое давление δP , вызванное возмущением среды типа акустических волн, связано с их интенсивностью соотношением

$$\delta P = \sqrt{I m a}, \quad (1)$$

где m и a – плотность среды и скорость распространения в ней регистрируемой волны, для воды соответственно, равные 10^3 кг/м³ и $1,5 \cdot 10^3$ м/с, а для воздуха – $1,3$ кг/м³ и 330 м/с, указанному выше диапазону значений интенсивности соответствует диапазон значений избыточного давления δP : 6,9–69 мбар для воды и 0,4–3,6 мбар для воздуха.

Многие составляющие спектра инфразвука, особенно в его низкочастотной части, не регистрируются обычными измерительными приборами. В этой связи поиск технических средств, не имеющих таких ограничений, является актуальной научно-технической задачей. В [4] 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. Это могут быть СВЧ, оптический или ультразвуковой лучи. При этом с точки зрения условий распространения для регистрации возмущений в воздухе целесообразно использование СВЧ луча, а в воде – ультразвукового.

В [4] показано, что девиация фазы колебаний в луче, вызванная изменением скорости распространения волн в нем под воздействием возмущения среды, равна

$$\delta \psi(\rho, \alpha) = \Delta \psi \left| \frac{\sin[\pi \rho (\cos \alpha - g)]}{\pi \rho (\cos \alpha - g)} \right|, \quad (2)$$

где $\Delta \psi = 2\pi \mu g z \rho$ – максимум девиации фазы; $\mu = \delta c/c$ – относительное изменение скорости в луче под воздействием возмущения среды; $g = a/c$; $z = v/\omega$; $\rho = L/\lambda$, L и λ – длины луча и волны регистрируемых

колебаний; a и c – скорости распространения регистрируемых волн и волн в зондирующем луче; ω и v – угловые частоты этих волн; α – угол между лучом и направлением распространения возмущения.

Поскольку для накопления полезного эффекта в зондирующем луче необходимо, чтобы за время распространения в нем волн $\tau = L/c$ волновой процесс существенно не изменялся, полоса пропускания регистрирующего устройства на зондирующем луче может быть принята равной

$$\delta f = 1/\tau = c/L. \quad (3)$$

При этом, так как скорость распространения ультразвука существенно меньше скорости распространения электромагнитных волн, регистрирующее устройство на ультразвуковом луче существенно узкополоснее устройства на СВЧ луче. При регистрации инфразвука с использованием устройств на ультразвуковом и СВЧ лучах в (1) параметр g приближенно можно положить соответственно равным 1 и 0.

Зависимость $\delta \psi(\rho, \alpha)$ от α может рассматриваться как диаграмма направленности (ДН) регистрирующего устройства. Из анализа (2) следует, что максимум ДН в случае использования СВЧ зондирующего луча имеет место при $\alpha = \pm \pi/2$, а в случае использования ультразвукового луча – при $\alpha = 0$. При этом ширина ее главного лепестка по нулевому уровню в указанных случаях при условии $\rho \gg 1$ соответственно равна

$$\delta \alpha = (2/\rho) \text{ рад.} \quad (4)$$

и

$$\delta \alpha = 2(2/\rho)^{1/2} \text{ рад.} \quad (5)$$

В предположении относительно небольшой величины вызванного возмущением среды избыточного давления δP приближенная линеаризованная зависимость приращения скорости распространения волн в зондирующем луче δc от δP может быть представлена в виде

$$\delta c = (dc/dP) \delta P, \quad (6)$$

где dc/dP – крутизна зависимости $c(P)$ для невозмущенной среды, которая в случае регистрации акустических волн в воздухе с использованием электромагнитного, в частности СВЧ, луча равна 81 м/с мбар [4]. Для случая регистрации акустических (в частности, инфразвуковых) волн, как показано в [5], эта крутизна равна $6,7 \cdot 10^{-7}$ м/с мбар.

Для оценки чувствительности устройств регистрации волновых возмущений на зондирующих лучах различной физической природы необходимо произвести анализ

максимума девиации фазы, который с учетом (2) и (6) можно представить в виде

$$\Delta\psi = (2\pi fL/c^2)(dc/dP) \delta P, \quad (7)$$

где $f = v/2\pi$ – частота волн в зондирующем луче в герцах.

Максимально возможная длина ультразвукового зондирующего луча L_{\max} может быть определена из условия согласования полосы пропускания регистрирующего устройства, определяемой соотношением (3), с полосой, занимаемой регистрируемым инфразвуком, порождаемым океаническими штормами. При этом с учетом того, что, как отмечалось, $\delta f_{\max} = 13$ Гц, из (3), полагая скорость распространения ультразвука в воде $c = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, имеем $L_{\max} = 111,5$ м. Поскольку при скорости распространения СВЧ радиоволн в воздухе $c = 3 \cdot 10^8$ м/с, как следует из (3), полоса пропускания регистрирующего устройства на СВЧ луче при любых реальных длинах луча практически не ограничена, длина луча может выбираться достаточно произвольно.

Заметим, что узкополосность регистрирующего устройства с ультразвуковым зондирующим лучом может рассматриваться как его достоинство, поскольку она позволяет избежать влияния на него помех с частотами, выходящими за диапазон инфразвука.

При анализе примем следующие значения параметров зондирующего луча и среды. Для СВЧ луча при работе в воздушной среде: $f = v/2\pi = 9,4$ ГГц, что соответствует типичной для СВЧ техники длине волны $\lambda = 3,2$ см; $L = 100$ м; $c = 3 \cdot 10^8$ м/с; $dc/dP = 81$ м/с·мбар; $\delta P = 0,4-3,6$ мбар. Для ультразвукового луча при работе в водной среде: $f = v/2\pi = 100$ кГц; $L = 100$ м, $c = 1,5 \cdot 10^3$ м/с, $dc/dP = 6,7 \cdot 10^{-7}$ м/с·мбар, $\delta P = 6,9-69$ мбар.

При этом из проведенных по формуле (7) расчетов следует, что для диапазонов значений избыточного давления δP , соответствующих указанной выше интенсивности сопровождающего океанические штормы инфразвука $I = 3,2 \cdot 10^{-5} - 3,2 \cdot 10^{-3}$ Вт/м² максимум девиации фазы для СВЧ луча в воздухе находится в пределах $\Delta\psi = 2,1 \cdot 10^{-3} - 1,9 \cdot 10^{-2}$ рад., а для ультразвукового луча в воде $\Delta\psi = 1,3 \cdot 10^{-4} - 1,3 \cdot 10^{-3}$ рад.

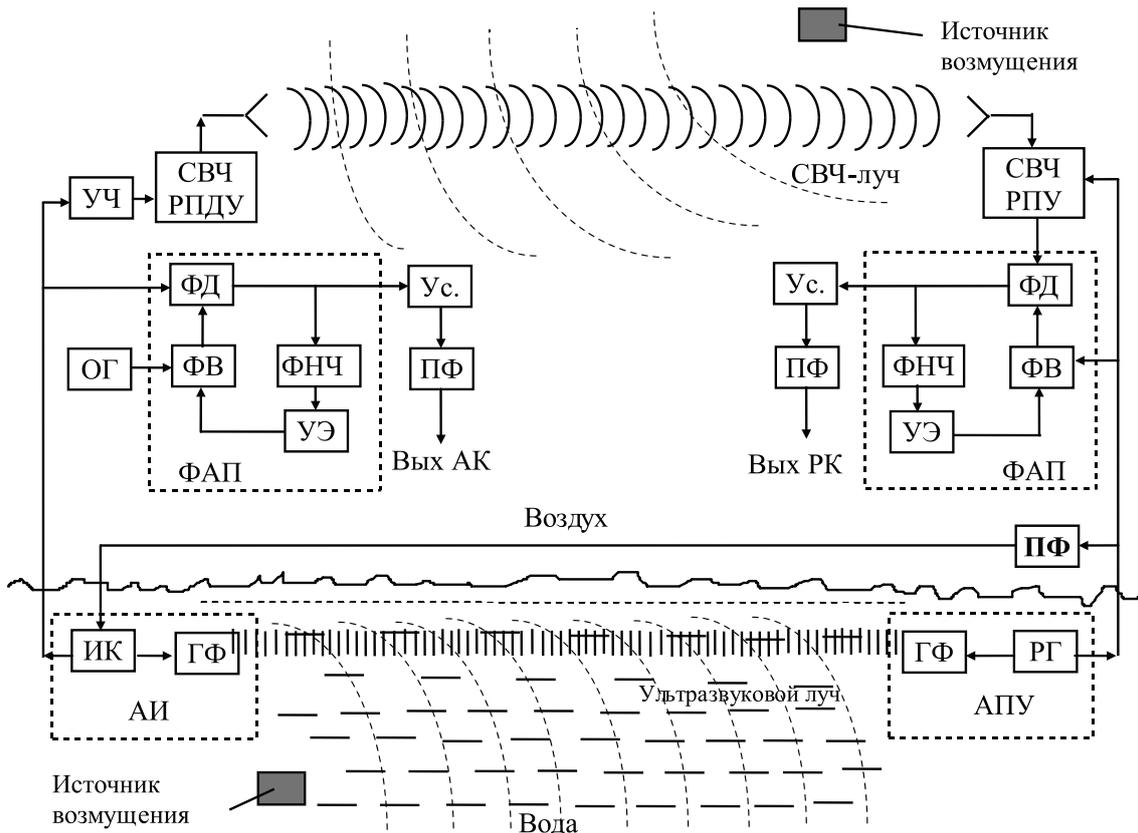
Оценим также направленные свойства рассматриваемых устройств регистрации инфразвука. При длине луча $L = 100$ м, полагая частоту вызываемой штормом инфразвуковой волны равной ее среднему значению $f = 10,5$ Гц, которому соответствует длина волны в воде $\lambda = a/f = 143$ м ($a = 1,5 \cdot 10^3$ м/с) и длина волны в воздухе $\lambda = a/f = 31,4$ м ($a = 330$ м/с), имеем: для ультразвукового луча в воде $\rho = L/\lambda = 0,7$,

для СВЧ луча в воздухе $\rho = L/\lambda = 3,2$. При этом из (4) получаем ширину ДН регистрирующего устройства на СВЧ луче $\delta\alpha = 0,63$ рад. = 36° . Что касается ДН регистрирующего устройства на ультразвуковом луче, то ее можно считать практически всенаправленной, поскольку при $\rho < 1$ ДН устройства близка к круговой. С учетом того, что направление прихода инфразвуковой волны точно не известно, слабую направленность ДН устройства на СВЧ луче и всенаправленность ДН устройства на ультразвуковом луче следует отнести к их достоинствам.

Узкополосность регистрирующего устройства на ультразвуковом луче в рамках решаемой задачи также следует отнести к его положительным качествам, так как оно не реагирует на волновые возмущения вне инфразвукового диапазона частот и, следовательно, достаточно хорошо защищено от помех.

Остановимся на вопросах аппаратурной реализации параметрического регистрирующего устройства. На рисунке приведен вариант структурной схемы радиоакустического регистрирующего устройства с ультразвуковым и СВЧ зондирующими лучами, предназначенного для регистрации инфразвука в двух средах: водной и воздушной. Оно работает следующим образом. Формирование ультразвукового сигнала в зондирующем луче осуществляется с помощью акустического излучателя (АИ), состоящего из источника колебаний (ИК), в котором производится преобразование электрических колебаний в акустические колебания ультразвукового диапазона, и гидрофона (ГФ), излучающего ультразвуковые колебания в водную среду. На приемном конце зондирующего луча осуществляется обратное преобразование акустических колебаний в электрические с помощью акустического приемного устройства (АПУ), состоящего из ГФ и регенератора (РГ). Гидроакустический канал регистрирующего устройства может рассматриваться в качестве пространственного генератора, в котором роль цепи обратной связи играет радиоканал.

При этом из колебаний, поступающих с выхода ИК, с помощью умножителя частоты (УЧ) формируются СВЧ колебания, излучаемые далее СВЧ радиопередающим устройством (СВЧ РПДУ). Прием СВЧ колебаний в зондирующем луче осуществляется супергетеродинным СВЧ радиоприемным устройством (СВЧ РПУ), в котором гетеродинная частота формируется из сигнала, поступающего с выхода РГ на приемном конце гидроакустического канала, чем обеспечивается когерентность обработки в радиоакустическом регистрирующем устройстве.



Структурная схема радиоакустического регистрирующего устройства с ультразвуковым и СВЧ зондирующими лучами, предназначенного для регистрации инфразвука в водной и воздушной средах

Особенность обработки сигнала в радиоканале заключается в том, что опорная фаза колебаний передается не по УКВ радиоканалу, как это делается в регистрирующем устройстве с СВЧ зондирующим лучом, описанном в [6], а по гидроакустическому каналу, используемому для регистрации инфразвуковых колебаний в водной среде. Сигналы на выходах гидроакустического и радиоканала формируются с помощью усилителей (Ус.) и полосовых фильтров (ПФ), включенных на выходах фазовых дискриминаторов (ФД), выделяющих сигналы рассогласования в системах фазовой автоподстройки (ФАП).

Заметим, что рассматриваемое регистрирующее устройство может быть использовано как для раннего предупреждения об океанических штормах, так и для создания системы защиты акваторий от несанкционированного проникновения в них морских судов. При этом, поскольку полоса частот с максимальным уровнем акустического излучения морских судов расположена в диапазоне от 16 до 31,5 Гц, для расширения полосы пропускания регистрирующего устройства необходимо уменьше-

ние длины зондирующего луча L . Полагая $L = 40$ м, из (3) получаем $\delta f = c/L = 37,5$ Гц, что достаточно для регистрации акустического излучения морских судов.

Для регистрации достаточно малых фазовых сдвигов в регистрирующем устройстве на ультразвуковом зондирующем луче, целесообразно использование методов микрофазометрии, позволяющих регистрировать фазовые сдвиги порядка 10^{-8} рад. [2]. Предложен векторный микрофазометрический преобразователь, принцип работы которого состоит в следующем. Производится периодическое векторное вычитание колебаний, разность фаз между которыми подлежит измерению,

$$U_1(t) = U_m \sin(\nu t - \psi_1)$$

и

$$U_2(t) = U_m \sin(\nu t - \psi_2)$$

из опорного сигнала той же частоты $U_0(t) = U_m \sin \nu t$.

В предположении малости ψ_1 и ψ_2 формируется амплитудно-модулированное колебание с глубиной модуляции, определяемой разностью фаз колебаний $U_1(t)$

и $U_2(t)$. При этом амплитуда этих колебаний с периодом $T = 2\pi/\Omega$, где Ω – частота коммутации устройства векторного вычитания колебаний, изменяется, принимая значения $\Delta U_i \cong U_m \psi_i$, $i = 1, 2$, причем изменение амплитуды пропорционально измеряемому фазовому сдвигу

$$\Delta U = U_2 - U_1 \cong U_m(\psi_2 - \psi_1) = U_m \Delta\psi. \quad (8)$$

Заметим, что различие в скорости распространения инфразвуковых волн, сопровождающих штормы в морях и океанах, может быть использовано для определения расстояния R до места возникновения шторма. Действительно, поскольку задержка момента регистрации инфразвука по воздушному каналу относительно момента регистрации по водному каналу равна

$$\Delta T = \left(\frac{R}{V_{\text{возд}}} \right) - \left(\frac{R}{V_{\text{вода}}} \right) =$$

$$= \frac{R}{(V_{\text{вода}} - V_{\text{возд}})/V_{\text{возд}} \cdot V_{\text{вода}}} = R_{[\text{км}]} / 4800 \text{ ч.}$$

$$\Delta T = (R/V_{\text{возд}}) - (R/V_{\text{вода}}) =$$

$$= R / [(V_{\text{вода}} - V_{\text{возд}})/V_{\text{возд}} \cdot V_{\text{вода}}] = R_{[\text{км}]} / 4800 \text{ ч.}$$

Отсюда получаем

$$R_{[\text{км}]} = 4800 \Delta T_{[\text{ч}]} \quad (9)$$

Список литературы

1. Андреева Б.Б. Физические основы распространения звука в океане. – М.: Гидрометеиздат, 1975.
2. Бернштейн И.Л. Опыт Саньяка на радиоволнах // Доклады АН СССР. – 1950. – т. 36, № 4.
3. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. – Т. 1. – М.: Наука, 1967.
4. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // Радиотехника и электроника. – 1997. – т. 42, № 6.

5. Рубцов В.Д., Дубянский С.А. Анализ характеристик устройств регистрации волновых возмущений в среде с использованием оптических, СВЧ и ультразвуковых лучей // Вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 209.

6. Рубцов В.Д., Дубянский С.А. Определение акусто-эмиссионных характеристик воздушных судов с использованием параметрических регистрирующих устройств на СВЧ и оптических лучах // Вестник МГТУ ГА. – 2014. – № 209.

References

1. Andreeva B.B. Fizicheskie osnovi rasprostraneniya zvuka v okeane (Physics basis of spreading of sound in ocean). M.: Gidrometeoizdat, 1975.
2. Bernsheyn I.L. Opyt Sanyaka na radiovolnax (Experience of Sanyak on radio-waves) // Doklady AN SSSR, 1950, t. 36, no. 4.
3. Zisman G.A., Todes O.M. Kurs obschey fiziki (The course of general physics). T. 1. - M.: Nauka, 1967.
4. Roubtsov V.D. Priyom volnovix vozmuscheniy pri pomoschi uzkonapravlennix kolebaniy (Reception of wave indignations with help narrow-direction oscillations) // Radiotekhnika i elektronika, 1997, t. 42, no. 6.
5. Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A. Analiz karakteristik ustroystv registratsii volnovix vozmuscheniy v srede s ispolzovaniem opticheskix, SVCh i ultrozvukovix luchey (Analysis of characteristics of register arrangements of wave indignations in environment with use of optics, microwave and ultrasonic beams) // Vestnik MGTU GA, 2014, no. 209.
6. Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A. Opredelenie akusto-emissionnix karakteristik vozdushnix sudov s ispolzovaniem parametricheskix registriruyuschix ustroystv na SVCh i opticheskix luchax (Definition of acoustic-emission characteristics of aircrafts with use parametric register arrangements on microwave and optics beams) // Vestnik MGTU GA, 2014, no. 209.

Рецензенты:

Строганова Е.П., д.т.н., профессор кафедры «Метрология, стандартизация и измерения в инфокоммуникациях», ФГБОУ ВПО «Московский технический университет связи и информатики», г. Москва;

Козлов А.И., д.ф.-м.н., профессор кафедры «Техническая эксплуатация радиоэлектронного оборудования воздушного транспорта», ФГБОУ ВПО «Московский государственный технический университет гражданской авиации», г. Москва.