

УДК 534.321.9

РАННЕЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ МЕТЕОСЛУЖБ АЭРОПОРТОВ О ШТОРМАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПРИЕМА ИНФРАЗВУКА НА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ И СВЧ ЗОНДИРУЮЩИЕ ЛУЧИ

С.А. ДУБЯНСКИЙ

Статья представлена доктором технических наук, профессором Рубцовым В.Д.

Рассматривается метод раннего предупреждения метеослужб аэропортов о штормах с использованием параметрического устройства приема инфразвука на ультразвуковой и СВЧ зондирующие лучи.

Ключевые слова: шторм, метеослужба, аэропорт, инфразвук, параметрическое устройство, зондирующий луч.

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 (ИВ), называемые «голосом моря» и имеющие частоту 8 – 13 Гц, обгоняя распространение самого шторма, передвигающегося со скоростью $V_{ш} = 20 - 30 \text{ м/с}$ (72 – 108 км/ч), могут служить предвестником шторма в приморских районах [1].

ИВ 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 доходят до берега по воде со скоростью $V_{вода} = 1600 \text{ км/ч}$, а по воздуху – $V_{возд.} = 1200 \text{ км/ч}$. Его регистрация может быть использована для раннего предупреждения метеослужб приморских аэропортов о приближающихся опасных атмосферных возмущениях. При расстоянии $R = 1000 \text{ км}$ 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 $T_{ш} = R/V_{ш} = 9,3 - 13,9 \text{ ч}$.

Инфразвук 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 $I_0 = 10^{-12} \text{ Вт/м}^2$ [2] составляют 75 – 95 дБ, что соответствует интенсивности $I = 3,2 \cdot 10^{-5} - 3,2 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м}^2$. Поскольку избыточное звуковое давление δP , вызванное возмущением среды типа акустических волн, связано с их интенсивностью соотношением

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

где t и a - плотность среды и скорость распространения в ней регистрируемой волны, для воды, соответственно, равные 10^3 кг/м^3 и $1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, а для воздуха – $1,3 \text{ кг/м}^3$ 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 [3] 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 [3] показано, что девиация фазы колебаний в луче, вызванная изменением скорости распространения волн в нем под воздействием возмущения среды, равна

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

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:

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

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

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 [3]. Для случая регистрации акустических (в частности инфразвуковых) волн, как показано в [4], эта крутизна равна $6,7 \cdot 10^{-7} \text{ м/с мбар}$.

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:

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

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, $\delta f_{max} = 13 \text{ Гц}$, из (3), полагая скорость распространения ультразвука в воде $c = 1,5 \cdot 10^3 \text{ м/с}$, имеем $L_{max} = 111,5 \text{ м}$. Поскольку при скорости распространения СВЧ радиоволн в воздухе $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$, 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 ре-

Раннее предупреждение метеослужб аэропортов о штормах с использованием параметрического устройства приема инфразвука на ультразвуковой и СВЧ зондирующие лучи

гистрирующего 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. $\approx 36^\circ$. 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 устройства, так как оно не реагирует на волновые возмущения вне инфразвукового диапазона частот и, следовательно, достаточно хорошо защищено от помех.

На рис. 1 приведен вариант структурной схемы радиоакустического 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.

Особенностью 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 [5], 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.

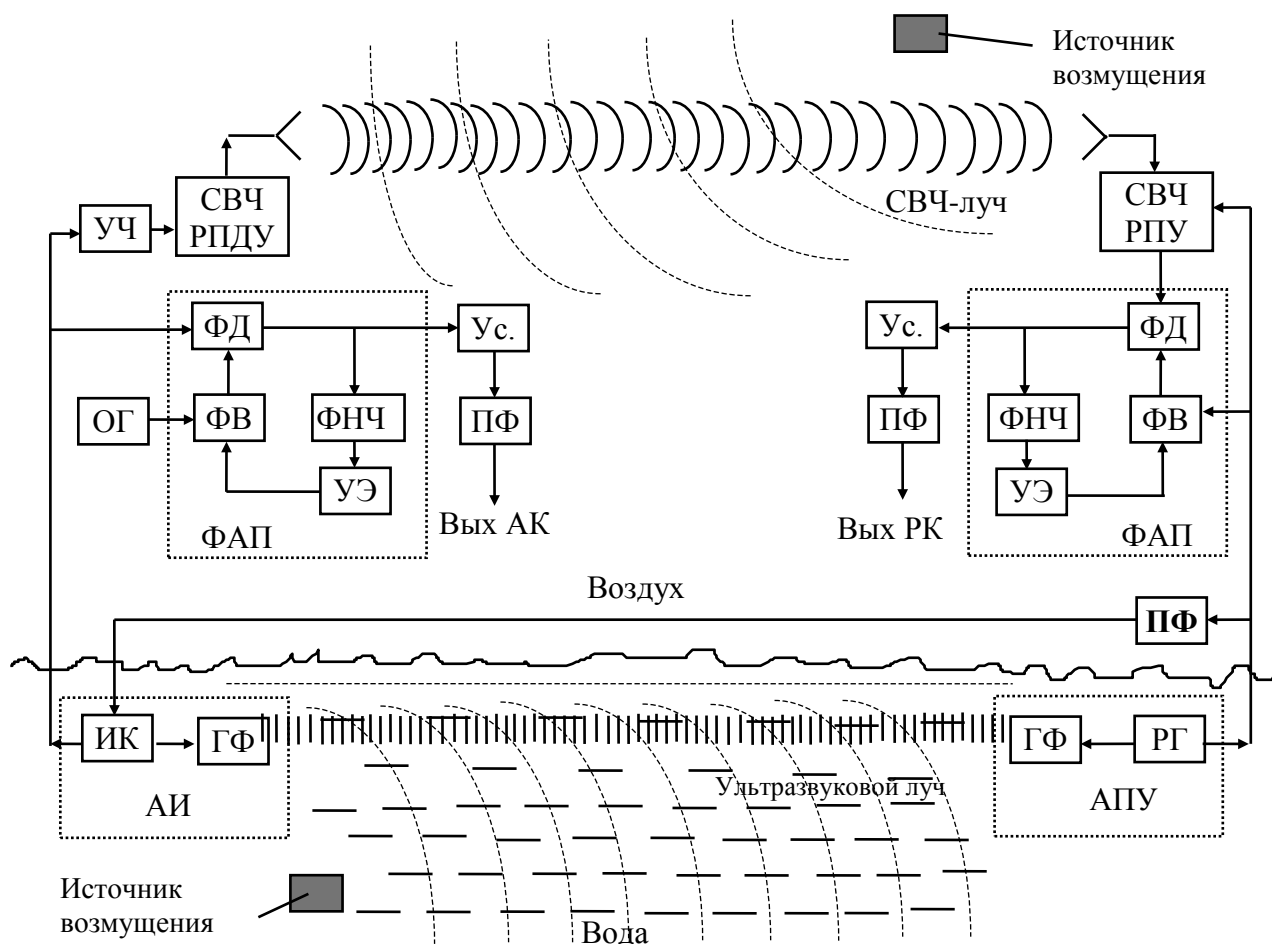


Рис.1

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 уменьшение 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. [6]. Предложен векторный микрофазометрический преобразователь, принцип работы которого состоит в следующем. Производится периодическое векторное вычитание колебаний, разность фаз между которыми подлежит измерению, $U_1(t)=U_m \sin(\omega t - \psi_1)$ и $U_2(t)=U_m \sin(\omega t - \psi_2)$ из опорного сигнала той же частоты $U_0(t)=U_m \sin \omega t$.

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 устрой-

Раннее предупреждение метеослужб аэропортов о штормах с использованием параметрического устройства приема инфразвука на ультразвуковой и СВЧ зондирующие лучи

ства 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 $\Delta T = (R/V_{возд.}) - (R/V_{вода}) = R[(V_{вода} - V_{возд.})/V_{возд.} \cdot V_{вода}] = R_{[км]}/4800$ ч. Отсюда получаем:

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Б.Б. Физические основы распространения звука в океане. м.: Гидрометеиздат, 1975.
2. Зисман Г.А., Тодес О.М. Курс общей физики. Т. 1.- м.: Наука, 1967.
3. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // радиотехника и электроника, 1997, т. 42, № 6.
4. 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.
5. 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.
6. Бернштейн И.Л. Опыт Саньяка на радиоволнах // Доклады АН СССР, 1950, т. 36, № 4.

EARLY WARNING OF WEATHER SERVICES OF AIRPORTS ABOUT STORMS WITH USE PARAMETRIC ARRANGEMENT OF RECEPTION OF INFRA-AUDIBLE ON ULTRASONIC AND MICROWAVE BORING BEAMS

Dubyanskiy S.A.

The method of early warning of weather services of airports about storms with use parametric arrangement of reception of infra-audible on ultrasonic and microwave boring beams are considered.

Keywords: storm, weather service, airport, infra-audible, parametric arrangement, boring beam.

REFERENCES

1. Andreeva B.B. Fizicheskie osnovy rasprostraneniya zvuka v okeane. m.: Gidrometeoizdat, 1975.
2. Zisman G.A., Todes O.M. Kurs obshchey fiziki. T. 1.- m.: Nauka, 1967.
3. Rubtsov V.D. Priem volnovykh vozmushcheniy pri pomoshchi uzkonapravlennykh kolebaniy // radio-tekhnika i elektronika, 1997, t. 42, № 6.
4. Rubtsov V.D., Dubyanskiy S.A. Analiz harakteristik ustroystv registratsii volnovykh vozmushcheniy v srede s ispol'zovaniem opticheskikh, SVCH i ul'trazvukovykh luchey // Vestnik MGTU GA, 2014, № 209.
5. Rubtsov V.D., Dubyanskiy S.A. Opredelenie akusto-emissionnykh harakteristik vozdushnykh sudov s ispol'zovaniem parametricheskikh registrirovuyushchikh ustroystv na SVCH i opticheskikh luchah // Vestnik MGTU GA, 2014, № 209.
6. Bernshteyn I.L. Opyt San'yaka na radiovolnah // Doklady AN SSSR, 1950, t. 36, № 4.

Сведения об авторе:

Дубянский Сергей Александрович, 1986 г.р., окончил МГУ им. М.В. Ломоносова (2009), соискатель МГТУ ГА, автор 8 научных работ, область научных интересов: радиопизика, радиотехника, эксплуатация воздушного транспорта.