

УДК 534.321.9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ РЕГИСТРАЦИИ НА ОПТИЧЕСКОМ И УЛЬТРАЗВУКОВОМ ЗОНДИРУЮЩИХ ЛУЧАХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В ВОЗДУШНОЙ И ВОДНОЙ СРЕДАХ

В.Д. РУБЦОВ, С.А. ДУБЯНСКИЙ

Рассматриваются данные экспериментальных исследований чувствительности и направленных свойств параметрических регистрирующих устройств на оптическом и ультразвуковом зондирующих лучах в воздушной и водной средах.

Ключевые слова: экспериментальное исследование, волновое возмущение, регистрирующее устройство, зондирующий луч.

Принцип построения параметрических регистрирующих устройств на электромагнитном (в частности, оптическом) и ультразвуковом зондирующих лучах описан в [1]. Показано, что девиация фазы колебаний в луче с частотой ν , вызванная изменением скорости распространения волн в луче под воздействием возмущения среды в виде плоской синусоидальной акустической волны с частотой ω , равна

$$\delta\psi(\rho, \alpha) = \Delta\psi \left| \sin \left[\pi\rho(\cos\alpha - g) \right] / \pi\rho(\cos\alpha - g) \right|, \quad (1)$$

где $\rho = L/\lambda$; $g = a/c$; L и λ – длины луча и волны регистрируемых колебаний; a – скорость распространения регистрируемых акустических волн для воздушной и водной сред, соответственно равная 330 м/с и 1500 м/с; c – скорость распространения волн в зондирующем луче для оптического луча в воздушной и водной средах, примерно равная $c_0 \approx 3 \cdot 10^8$ м/с и $c_0/n \approx 2,26 \cdot 10^8$ м/с, где c_0 и $n = 1,33$ – скорость распространения света в вакууме и коэффициент преломления воды соответственно, а для ультразвукового луча в воздушной и водной средах, соответственно равная 330 м/с и 1500 м/с; α – угол между лучом и направлением распространения возмущения; максимум девиации фазы

$$\Delta\psi = (\nu L/c^2)(dc/dP) \delta P; \quad (2)$$

ν – частота колебаний в зондирующем луче; dc/dP – крутизна зависимости $c(P)$ скорости распространения волн в зондирующем луче от давления; δP – вызванное акустическим возмущением среды избыточное давление. При этом в эксперименте частота колебаний в зондирующем луче в Гц $f = \nu/2\pi$ принята равной: для оптического луча $4,8 \cdot 10^{14}$ Гц, соответствующей длине волны $\lambda_0 = 0,63$ мкм колебаний, генерируемых неон-гелиевым оптическим квантовым генератором (ОКГ), а для ультразвукового луча 20 кГц.

Зависимость (1) девиации фазы колебаний в луче от α может рассматриваться в качестве диаграммы направленности (ДН) регистрирующего устройства. При этом, поскольку для обеих рассматриваемых сред при использовании оптического и ультразвукового зондирующих лучей параметр g приближенно равен 0 и 1, максимум ДН имеет место соответственно при $\alpha = \pi/2$ и $\alpha = 0$, причем в предположении что $\rho \gg 1$, для случаев использования оптического и ультразвукового лучей ширина главного лепестка ДН по нулевому уровню определяется соответственно выражениями:

$$\delta\alpha = (2/\rho) \text{ рад}; \quad (3)$$

$$\delta\alpha = 2(2/\rho)^{1/2} \text{ рад}. \quad (4)$$

Необходимо, чтобы за время распространения волн в луче $\tau = L/c$ волновой процесс существенно не изменился. При этом полоса пропускания устройства равна

$$\delta f = 1/\tau = c/L. \quad (5)$$

Экспериментальные исследования регистрирующего устройства с оптическим зондирующим

лучом проводились в лабораторных условиях на экспериментальной установке, основу которой составляло работающее по принципу интерферометра устройство с фотоприемником на темном фоне, описанное в [2]. При этом использовался оптический квантовый генератор (ОКГ) со следующими характеристиками: длина волны оптических колебаний $\lambda_0 = 0,63$ мкм; излучаемая мощность $P_0 = 10$ мВт; угол расхождения луча $\Delta\alpha_0 = 5'$. Длина оптического луча в эксперименте составляла $L = 1$ м.

Акустические колебания частотой $F = \omega/2\pi = 6,6$ кГц, модулированные по амплитуде последовательностью прямоугольных импульсов с частотой повторения $F_{\text{п}} = 5$ Гц и отношением периода модуляции к длительности импульса (скважностью) $q = 2$, излучались в среду акустическим излучателем в виде пьезоэлектрического преобразователя.

Оценка чувствительности регистрирующего устройства при регистрации возмущений в воздушной среде производилась путем регулировки мощности излучения акустического излучателя $P_{\text{ак}}$ до величины, соответствующей интенсивности звука $I = 10^{-10}$ Вт/м².

На рис. 1 представлены полученные путем фотографирования экрана осциллографа осциллограммы зарегистрированного в воздушной среде сигнала от акустического излучателя, размещенного на расстоянии 1 м над центром оптического луча.

На рис. 2 приведены экспериментально снятые в описанных выше условиях нормированные ДН регистрирующего устройства на оптическом зондирующем луче при работе в воздушной (рис. 2а), водной (рис. 2б) средах. Здесь же пунктиром показаны расчетные ДН, построенные с использованием выражения (1). Как видим, совпадение экспериментальных и расчетных ДН достаточно хорошее.

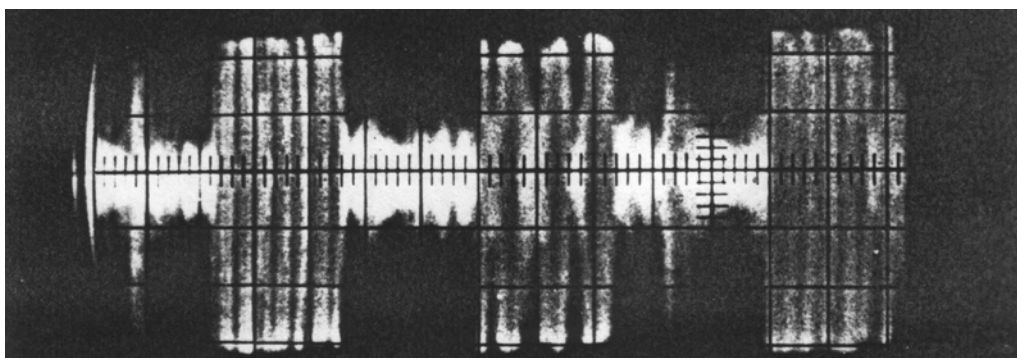


Рис. 1

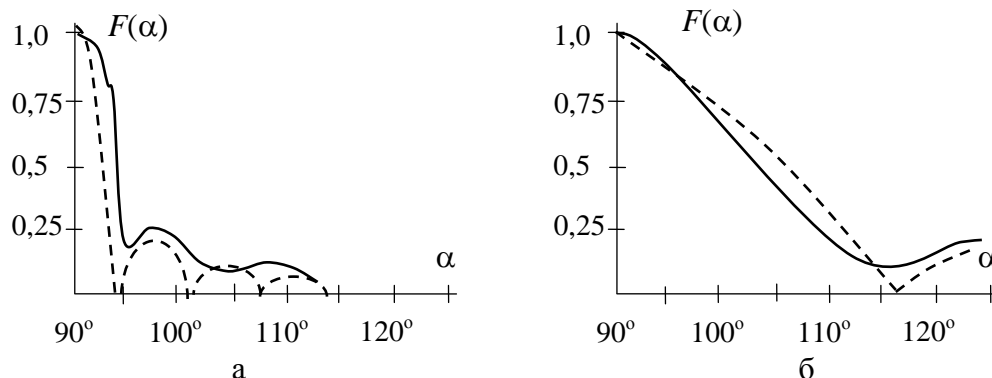


Рис. 2

Экспериментальные исследования регистрирующего устройства с ультразвуковым зондирующим лучом проводились с использованием варианта устройства, выполненного по схеме с фазочастотным преобразованием, которое осуществляется автоматически, поскольку мгновенная частота колебаний в зондирующем луче является производной полной фазы этих колеба-

ний. Переход от фазовых измерений к частотным позволяет обойтись без системы фазовой автоподстройки и организации канала передачи опорной фазы, что облегчает аппаратную реализацию регистрирующего устройства. Обратный переход к фазе осуществляется за счет фазочастотной характеристики (ФЧХ) узкополосного полосового фильтра (ПФ), включенного на выходе устройства, и измерения разности фаз колебаний на его входе и выходе. Принцип действия аналогичного устройства на СВЧ лучше описан в [3].

Для совмещения пунктов излучения ультразвукового сигнала зондирующего луча и обработки зарегистрированного с его помощью акустического сигнала был использован ультракоротковолновый (УКВ) радиоканал с частотой $f_p = 30$ МГц. При этом осуществлялась амплитудная модуляция принятым акустическим приемником ультразвуковым сигналом с частотой $f = \nu/2\pi = 20$ кГц, преобразованным в электрический сигнал.

С помощью регистрирующего устройства с ультразвуковым зондирующим лучом производилась регистрация ветровых возмущений в открытом воздушном пространстве. При этом ультразвуковой луч длиной $L = 70$ м был размещен на высоте 1 м. На рис. 3 приведена зарегистрированная самописцем реакция регистрирующего устройства на ветровые возмущения. Заметим, что хотя с учетом (6) ширина полосы регистрируемых зондирующим лучом возмущений составляет $\delta f = c / L = 330/70 = 4,7$ Гц, через ПФ на выход устройства попадают колебания, вызванные возмущениями в пределах полосы $\Delta f/2 = 1$ Гц.

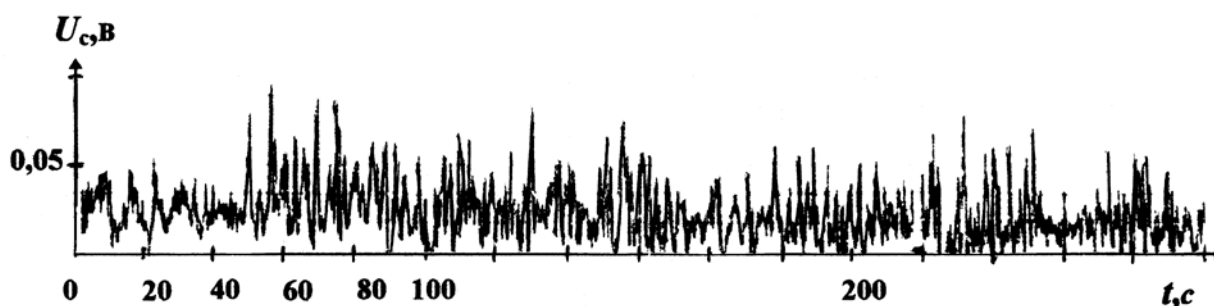


Рис. 3

Степень достоверности результатов эксперимента одновременно с регистрацией ветровых возмущений с помощью исследуемого регистрирующего устройства производилась при регистрации порывов ветра в пределах 3 – 8 м/с с помощью анемометра, размещенного на высоте 1 м и на удалении 1 м от середины луча. Возрастанию скорости ветра в указанных пределах приписывался знак «+», уменьшению – знак «-». Результаты сравнения показаний анемометра с данными, полученными с помощью регистрирующего устройства в моменты снятия показаний с анемометра, которым также приписывались соответствующие знаки, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Анемометр	+	+	-	+	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+	+	-	-	+	-
Рег. устройство	+	+	-	-	-	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-	+	-	-	+	+
Анемометр	-	+	+	-	+	-	+	-	+	+	-	-	+	-	+	-	+	-	-	+
Рег. устройство	-	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	-	+	-	-	+

Как видим, при числе замеров $n_{\text{зам.}} = 40$ число совпадений $n_{\text{совп.}} = 32$, что соответствует вероятности совпадений $P = n_{\text{совп.}} / n_{\text{зам.}} = 0,8$, откуда следует, что регистрация ветровых возмущений с помощью регистрирующего устройства с ультразвуковым зондирующим лучом обеспечивает достаточно высокую надежность их обнаружения. Это позволяет, в частности, сделать заключение о возможности использования данного устройства в качестве наземного средства обнаружения «сдвига ветра» и турбулентных пульсаций атмосферы в зоне ВПП.

С помощью регистрирующего устройства с ультразвуковым зондирующим лучом производилась также регистрация акустических возмущений в водной среде. Эксперименты производились в озере глубиной $h = 12$ м. В качестве источников гидроакустических возмущений были выбраны движение моторной лодки по водоему с максимальным удалением ее от середины зондирующего луча ~ 100 м, включение водяного насоса в прибрежной части водоема на удалении ~ 120 м, падение в воду камней размером ~ 5 см на удалении ~ 10 м и гидродинамические возмущения от прибойной волны.

При этом все эксперименты, кроме последнего, проводились с помощью регистрирующего устройства с длиной луча $L = 70$ м, формируемого с помощью акустических преобразователей (гидрофонов), погруженных на глубину $H = 2$ м, регистрация же гидродинамических возмущений от прибойной волны проводилась на мелководье глубиной $h = 0,2 - 0,4$ м вблизи берега при глубине погружения гидрофонов $H = 0,1$ м и их удалении от берега на $4 - 5$ м, причем длина зондирующего луча L была равной 50 м.

На рис. 4, 5 приведены зарегистрированные самописцем записи сигналов с выхода регистрирующего устройства при падении в водоем камней, включении водяного насоса и движении по водоему моторной лодки. Здесь обозначено: К – сигнал, соответствующий моменту падения камня; Н – момент включения водяного насоса; О и П – моменты отхода и прихода лодки. На рис. 6 приведена зарегистрированная самописцем запись сигнала с выхода регистрирующего устройства при регистрации гидродинамических возмущений от прибойной волны. В табл. 2 приведены данные сравнения числа прибойных волн $n_{\text{волн.}}$, зарегистрированных методом прямых наблюдений, с числом всплесков сигнала, зарегистрированных регистрирующим устройством $n_{\text{рег. ус.}}$ за одни и те же интервалы времени Δt .

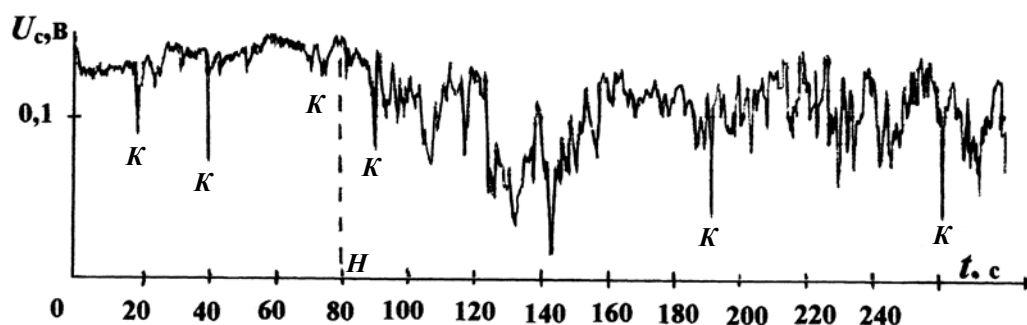


Рис. 4

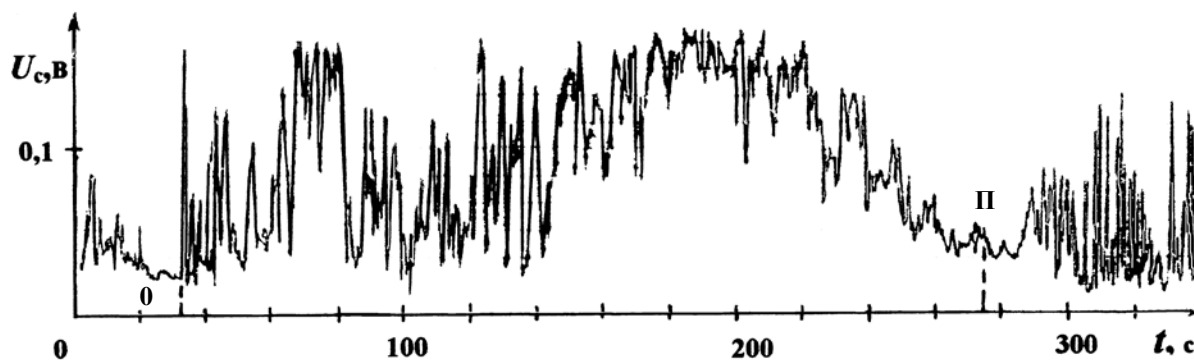


Рис. 5

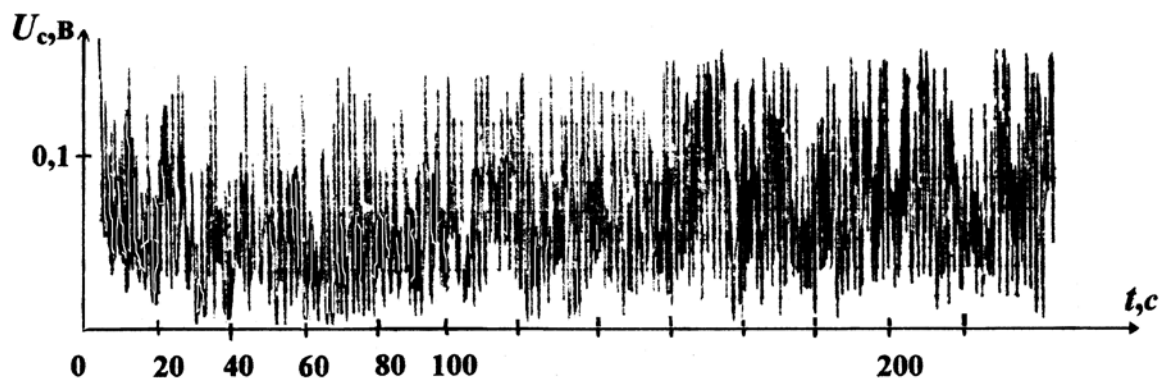


Рис. 6

Таблица 2

1 серия измерений			2 серия измерений			3 серия измерений		
$\Delta t, с$	$n_{волн.}$	$n_{рег.ус.}$	$\Delta t, с$	$n_{волн.}$	$n_{рег.ус.}$	$\Delta t, с$	$n_{волн.}$	$n_{рег.ус.}$
33	25	24	28	20	21	33	25	23

Рассмотренное регистрирующее устройство может быть использовано для раннего предупреждения метеослужб приморских аэропортов о приближении к зоне аэропорта шторма, возникшего в море, путем регистрации сопровождающего шторм инфразвукового излучения, скорость распространения которого как в водной, так и в воздушной среде существенно выше скорости перемещения зоны шторма.

Кроме того, это устройство может использоваться для защиты акваторий от несанкционированного проникновения морских судов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов В.Д., Дубянский С.А. Определение акусто-эмиссионных характеристик воздушных судов с использованием параметрических регистрирующих устройств на СВЧ и оптических лучах // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 209.
2. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // *Радиотехника и электроника*. 1997. № 6. Т. 42.
3. Рубцов В.Д., Дубянский С.А. Анализ характеристик устройств регистрации волновых возмущений в среде с использованием оптических, СВЧ и ультразвуковых лучей // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2014. № 209.

EXPERIMENT RESEARCHES OF PARAMETRIC REGISTER ARRANGEMENTS ON OPTICS AND ULTRASONIC BORING BEAMS OF WAVE INDIGNATIONS IN AIR AND WATER ENVIRONMENTS

Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A.

Data experimental researches of sensitivity and direction properties of parametric register arrangements on optics and ultrasonic boring beams in air and water environments are considered.

Keywords: experimental research, wave indignation, register arrangement, boring beam.

REFERENCES

1. Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A. Opredelenie akusto-jemissionnyh harakteristik vozdushnyh sudov s ispol'zovaniem parametricheskikh registrirujushhih ustrojstv na SVCh i opticheskikh luchah. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2014. № 209. (In Russian).

2. **Roubtsov V.D.** Priem volnovykh vozmushhenij pri pomoshhi uzkonapravlennykh kolebanij. *Radiotekhnika i elektronika*. 1997. № 6. Т. 42. (In Russian).

3. **Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A.** Analiz harakteristik ustrojstv registracii volnovykh vozmushhenij v srede s ispol'zovaniem opticheskikh, SVCh i ul'trazvukovykh luchej. *Nauchnyj Vestnik MGTU GA*. 2014. № 209. (In Russian).

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 12 научных работ, область научных интересов – радиофизика, радиотехника, эксплуатация воздушного транспорта.