

УДК 534.321.9

## АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК УСТРОЙСТВ РЕГИСТРАЦИИ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СРЕДЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ОПТИЧЕСКИХ, СВЧ И УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ЛУЧЕЙ

В.Д. РУБЦОВ, С.А. ДУБЯНСКИЙ

Рассматриваются характеристики устройств регистрации акустических волн в воздухе и воде с использованием оптических, СВЧ и ультразвуковых лучей. Приводятся результаты исследования акустической чувствительности, направленных свойств и ширины полосы устройств при использовании этих лучей.

**Ключевые слова:** волновое возмущение, регистрация, оптические, СВЧ и ультразвуковые лучи.

Принцип построения параметрических регистрирующих устройств на зондирующих лучах описан в [1]. Показано, что девиация фазы колебаний в луче, вызванная изменением скорости распространения волн в луче под воздействием возмущения среды в виде плоской синусоидальной волны, равна  $\delta\psi(\rho, \alpha) = \Delta\psi \left| \sin \left[ \pi\rho(\cos\alpha - g) \right] / \pi\rho(\cos\alpha - g) \right|$ , где  $\rho = L/\lambda$ ,  $g = a/c$ ,  $L$  и  $\lambda$  - длины луча и волны регистрируемых колебаний,  $a$  и  $c$  - скорости распространения акустической волны и волны в зондирующем луче;  $\alpha$  - угол между лучом и направлением распространения возмущения;  $\Delta\psi = (vL/c^2) (dc/dP) \delta P$  - максимум девиации фазы;  $v$  - угловая частота волн в луче;  $dc/dP$  - крутизна зависимости  $c(P)$ ;  $\delta P$  - избыточное давление, вызванное возмущением среды. При оценке направленных свойств рассматриваемых устройств зависимость девиации фазы волн в луче от  $\alpha$  можно рассматривать как диаграмму направленности (ДН) регистрирующего устройства.

При использовании электромагнитного (оптического или СВЧ) луча ( $g \approx 0$ ) максимум  $\delta\psi(\rho, \alpha)$  имеет место при  $\alpha = \pm\pi/2$ , а при использовании ультразвукового луча ( $g \approx 1$ ) при  $\alpha = 0$ , т.к. предполагается, что  $\rho \gg 1$ , направленные свойства выше при электромагнитном луче.

Для накопления полезного эффекта в зондирующем луче необходимо, чтобы за время распространения в нем волн  $\tau = L/c$  волновой процесс существенно не изменился. При этом полоса пропускания устройства равна  $\delta f = 1/\tau = c/L$ .

При приеме акустических волн в воздухе на оптический луч  $dc/dP = 81$  м/с мбар [1]. Это справедливо и для волн СВЧ диапазона. При регистрации акустических волн на ультразвуковой луч крутизна зависимости  $c(P)$  определяется для воздуха выражением  $dc/dP = (\gamma + 1)/2mc$ , где  $m$  и  $\gamma$  - плотность и отношение теплоемкостей среды при постоянных давлении и объеме, а для воды выражением  $dc/dP = \cos\alpha/mc$  [2]. Учитывая, что при ультразвуковом луче максимум  $\delta\psi(\rho, \alpha)$  приходится на  $\alpha = 0$ , при оценке чувствительности приема последнее выражение можно представить в виде  $dc/dP = 1/mc$ . Так как для воздуха -  $\gamma = 1,41$ ,  $m = 1,3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 330$  м/с, а для воды -  $m = 10^3$  кг/м<sup>3</sup>,  $c = 1,5 \cdot 10^3$  м/с, из приведенных выше выражений имеем: для воздуха -  $2,8 \cdot 10^{-3}$  м/с мбар, а для воды -  $6,7 \cdot 10^{-7}$  м/с мбар.

Недостаток регистрирующего устройства на СВЧ луче заключается в том, что оно применимо лишь для регистрации волновых возмущений в радиопрозрачных средах. Такое ограничение отсутствует в устройстве на ультразвуковом зондирующем луче. Его использование целесообразно, в частности, для регистрации волновых возмущений в водной среде, в которой радиоволны сильно затухают. В то же время коэффициент затухания ультразвуковых волн в водной среде мал. Так ультразвук с частотой  $f = 100$  кГц в воде распространяется на расстояние до 3 км, что позволяет использовать регистрирующее устройство на ультразвуковом луче, например, для охраны акваторий от несанкционированного доступа водных судов; прослушивания шумов моря, в том числе

инфразвуковых предвестников штормов и землетрясений, а также в качестве приемной антенны на подводных лодках.

На рис. 1 изображена структурная схема такого регистрирующего устройства. Устройство работает следующим образом. Зондирующие ультразвуковые волны формируются акустическим излучателем (Ак. Изл.). Принятые акустическим приемником (Ак. Прм.) эти колебания преобразуются в электрический сигнал, который излучается с помощью радиопередающего устройства УКВ диапазона (УКВ РПДУ), работающего в воздушной среде. Принятые радиоприемным устройством (УКВ РПУ) эти колебания пропускаются через полосовой фильтр (ПФ), настроенный на частоту сигнала, и поступают на акустический излучатель, в котором они преобразуются в ультразвук.

Таким образом, акустический канал, состоящий из Ак. Изл., Ак. Прм. и зондирующего ультразвукового луча, вместе с УКВ радиоканалом, включающим в себя УКВ РПДУ, УКВ РПУ, ПФ и канал РРВ, образуют радиоакустический пространственный генератор, в котором УКВ радиоканал играет роль цепи обратной связи, а частота колебаний в зондирующем луче задается частотой настройки ПФ. Под нее подстраивается опорный генератор (ОГ). Подстройка осуществляется с помощью системы ФАП, включающей в себя фазовый дискриминатор (ФД), ФНЧ, управляющий элемент (УЭ) и фазовращатель (Фв.)

Отклонения фазы колебаний от среднего значения, вызванные фазовой модуляцией, вызванной возмущениями колебаний в зондирующем акустическом луче, снимаются в качестве полезного сигнала с выхода ФД и после усиления в усилителе (Ус.) и фильтрации в ПФ поступают на выход.

Особенностью рассматриваемого устройства является задержка сигнала в акустическом канале  $\tau_a=L/c$ , условие баланса фаз, необходимое для возбуждения колебаний в пространственном генераторе, записывается в виде  $\nu \tau_a + \sum_{i=1}^n \varphi_i = n 2\pi$ ,  $n=0, 1, 2, \dots$ , где  $\varphi_i$  -

фазовые задержки в звеньях пространственного генератора (ПФ, Ак. Изл., Ак. Прм., УКВ РПДУ, УКВ РПУ). Поскольку ПФ является наиболее инерционным звеном, рассмотрим в качестве ПФ одиночный колебательный контур с постоянной времени  $\tau_k=2Q/\nu_0$ , где  $Q$  и  $\nu_0$  - добротность и резонансная частота контура соответственно, в первом приближении условие баланса фаз можно записать в виде  $\nu[(L/c)+\tau_{пф}]=n 2\pi$ ,  $n=0, 1, 2$ , где  $\tau_{пф}$  - групповое время запаздывания сигнала в ПФ, равное постоянной времени  $\tau_k$ . Итак, в пространственном генераторе при выбранных длине луча  $L$  и частоте настройки ПФ  $\nu_0$  осуществляется генерация на частоте  $\nu$ , удовлетворяющей названному условию при одном из значений  $n$ . Должно также выполняться условие баланса амплитуд  $\kappa_{\Sigma} \geq 1$ , где  $\kappa_{\Sigma}$  - общий коэффициент передачи в замкнутой цепи генератора, включающей в себя акустический канал и радиоканал, ПФ, Ак. Изл., Ак. Прм., УКВ РПДУ и УКВ РПУ.

Регистрирующие устройства на СВЧ и ультразвуковом лучах могут быть упрощены при переходе к частотным измерениям, что возможно с учетом того, что мгновенная частота  $\nu(t)$  является производной полной фазы  $\Phi(t)=\nu t - [\psi(t)+\psi_0]$  колебаний в луче, а  $\psi_0=\nu L/c$  постоянная и  $\psi(t)$  вызванная волновым возмущением переменная составляющие начальной фазы этих колебаний, остальные обозначения - прежние. При возмущении в виде синусоидальной волны имеем  $\psi(t)=\delta\psi(\rho, \alpha) \sin[\omega t - \theta(\rho, \alpha)]$ , где  $\delta\psi(\rho, \alpha)$  - девиация фазы колебаний в луче, определяемая выражением (1), а  $\theta(\rho, \alpha)=\pi [\rho(\cos\alpha - g)]$  - фаза этих колебаний. При этом имеем  $\nu(t)=d\Phi(t)/dt=\nu+\Delta\nu(t)$ , где  $\Delta\nu(t)=-\Delta\nu \frac{\sin[\pi\rho(\cos\alpha - g)]}{\pi\rho(\cos\alpha - g)} \cos\{\omega t - \pi[\rho(\cos\alpha - g)]\}$ , составляющая

частоты, вызванная возмущением, а  $\Delta\nu=\omega \Delta\psi$  - максимальное значение девиации частоты колебаний в луче, которое можно записать как  $\Delta\nu=(\omega \nu L/c^2) (dc/dP) \delta P$ .

Как видно, зависимость направленных свойств регистрирующего устройства от параметров зондирующего луча при переходе от фазовых измерений к частотным сохраняется. При этом, поскольку частотные измерения в отличие от фазовых не являются относительными, их можно проводить без организации канала передачи опорной фазы от источника колебаний в пункт приема колебаний. Недостатком частотного метода выделения полезной информации по сравнению с фазовым методом является его худшая инструментальная точность. Этому недостатку можно избежать, если осуществить обратное преобразование частотной модуляции в фазовую с помощью узкополосного ПФ, включенного на выходе РПУ и настроенного на частоту  $\nu_{пф}$ , равную частоте колебаний в зондирующем луче  $\nu$  при использовании ультразвукового луча и промежуточной частоте  $\nu_{пр}$  РПУ при использовании СВЧ луча.

Сдвиг фазы на выходе ПФ  $\Delta\psi_{пф}(t)$  примерно повторяет закон модуляции частоты и записывается  $\Delta\psi_{пф}(t) = S_{пф} \Delta\nu(t)$ , где  $S_{пф}$  - крутизна ФЧХ вблизи частоты настройки ПФ, которая при использовании в ПФ одиночного колебательного контура с добротностью  $Q$  равна  $S_{пф} = -2Q/\nu_{пф}$ . Информация о волновом возмущении заключена в разности фаз колебаний на входе и выходе ПФ  $\Delta\psi_{пф}(t) = \Delta\psi_{пф} \frac{\sin[\pi\rho(\cos\alpha - g)]}{\pi\rho(\cos\alpha - g)} \cos\{\omega t - \pi[\rho(\cos\alpha - g)]\}$ ,

где  $\Delta\psi_{пф} = (2Q/\nu_{пф}) (\omega \nu L/c^2) (dc/dP) \delta P$  - максимум девиации фазы, характеризующей чувствительность устройства.

На рис. 2 изображена структурная схема регистрирующего устройства с частотно-фазовым преобразованием на СВЧ зондирующем луче, где обозначено: СВЧ РПДУ и СВЧ РПУ - СВЧ радиопередающее и радиоприемное устройства; ИФ - измеритель фазы.

Поскольку максимум девиации фазы в зондирующем луче пропорционален частоте  $\nu$  колебаний в нем, следует ожидать, что чувствительность устройства регистрации волновых возмущений на оптическом зондирующем луче будет наиболее высокой.

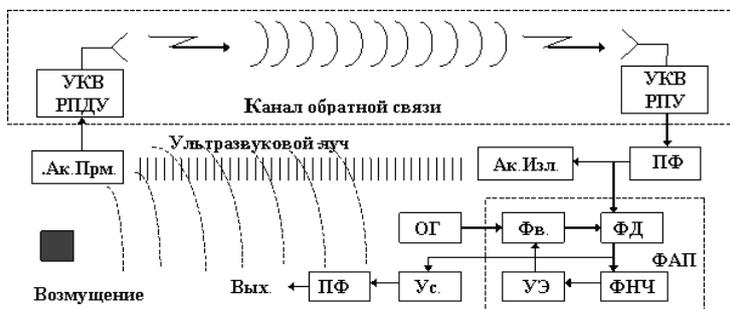


Рис. 1

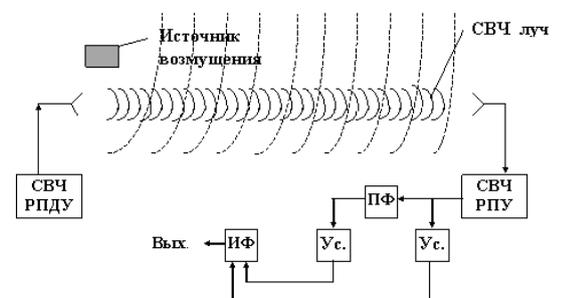


Рис. 2

Для сравнительной оценки чувствительности устройств регистрации волновых возмущений на зондирующих лучах различной физической природы необходимо произвести анализ максимума девиации фазы  $\Delta\psi$ . Примем следующие значения параметров зондирующих лучей:  $f = \nu/2\pi$  - для ультразвукового луча  $10^5$  Гц; для СВЧ луча  $9,4 \cdot 10^9$  Гц, что соответствует типовой для 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 ультразвукового луча 1 м и 100 м, для оптического луча 1 м, для СВЧ луча 100 м;  $c$  - для ультразвукового луча в воздухе 330 м/с и 1500 м/с в воде, для оптического и СВЧ лучей в воздухе  $3 \cdot 10^8$  м/с;  $dc/dP$  - для оптического и СВЧ лучей в воздухе 81 м/с мбар, для ультразвукового луча в воздухе  $2,8 \cdot 10^{-3}$  м/с мбар и  $6,7 \cdot 10^{-7}$  м/с мбар в воде;  $\delta P$  - для всех видов лучей 1 мбар.

Из проведенных расчетов следует, что максимум девиации фазы  $\Delta\psi$  равен: для

оптического луча длиной 1 м в воздухе  $2,7 \text{ рад}$ , для СВЧ луча длиной 100 м в воздухе  $5,3 \cdot 10^{-3} \text{ рад}$ , для ультразвукового луча длиной 1 м в воздухе  $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ рад}$  и  $1,9 \cdot 10^{-7} \text{ рад}$  в воде, для ультразвукового луча длиной 100 м в воде  $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$ . Как видим, наибольшей чувствительностью обладает регистрирующее устройство на оптическом зондирующем луче. При этом при малых значениях девиации фазы колебаний в зондирующих лучах для выделения информации целесообразно использовать методы микрофазометрии [2], позволяющие регистрировать фазовые сдвиги порядка  $10^{-8} \text{ рад}$ .

Для оценки чувствительности регистрирующего устройства с частотно-фазовым преобразованием воспользуемся выражением для максимума девиации фазы  $\Delta\psi_{\text{ПФ}}$  на его выходе. При этом для СВЧ луча длиной 100 м в воздухе и ультразвукового луча той же длины в воде, полагая добротность колебательного контура ПФ  $Q=100$ , циклические частоты регистрируемых акустических колебаний и настройки ПФ  $F=\omega/2\pi=3 \text{ кГц}$  и  $f_{\text{ПФ}}=v_{\text{ПФ}}/2\pi=100 \text{ кГц}$ , а остальные параметры лучей, возмущения и среды прежними, для СВЧ луча получаем  $\Delta\psi_{\text{ПФ}}=3,2 \cdot 10^{-5} \text{ рад}$ , а для ультразвукового луча  $\Delta\psi_{\text{ПФ}}=1,1 \cdot 10^{-4} \text{ рад}$ . Как видим, использование частотно-фазового преобразования повышает чувствительность устройства на ультразвуковом луче и снижает ее в устройстве на СВЧ луче.

Проведя оценку направленных свойств (по ширине диаграммы направленности) регистрирующих устройств на электромагнитном и ультразвуковом лучах, получаем: для устройства на электромагнитном луче при его длинах 1 м и 100 м в воздухе  $\delta\alpha=0,22 \text{ рад}=12,6^\circ$  и  $\delta\alpha=2,2 \cdot 10^{-3} \text{ рад}=0,13^\circ$ , то же в воде  $\delta\alpha=1 \text{ рад}=57,3^\circ$  и  $\delta\alpha=10^{-2} \text{ рад}=0,57^\circ$ . Аналогичным образом для устройства на ультразвуковом луче длиной 1 м в воздухе  $\delta\alpha=0,94 \text{ рад}=53,9^\circ$ , а при длинах луча 1 м и 100 м в воде  $\delta\alpha=2 \text{ рад}=114,6^\circ$  и  $\delta\alpha=0,5 \text{ рад}=28,7^\circ$ . Как видно, направленные свойства существенно выше у устройства на электромагнитном луче и в воздухе выше, чем в воде.

Определим полосы пропускания регистрирующих устройств на электромагнитном и ультразвуковом зондирующих лучах. Поскольку скорость распространения электромагнитных волн в среде равна  $c=c_0/n$ ,  $n$  - коэффициент преломления. Для устройства на электромагнитном луче при его длинах 1 м и 100 м получаем: в воздухе  $\delta f=300 \text{ МГц}$  и  $\delta f=3 \text{ МГц}$ , а в воде  $\delta f=226 \text{ МГц}$  и  $\delta f=2,26 \text{ МГц}$ .

Аналогичным образом, для устройства на ультразвуковом луче получаем: при длине луча 1 м в воздухе  $\delta f=330 \text{ Гц}$ , а при длинах луча 1 м и 100 м в воде  $\delta f=1,5 \text{ кГц}$  и  $\delta f=15 \text{ Гц}$ . Как видно, регистрирующее устройство на электромагнитном луче существенно широкополосней устройства на ультразвуковом луче и может использоваться для регистрации акустических волн в широком диапазоне - от инфразвука до ультразвука. Устройство же на ультразвуковом луче пригодно лишь для регистрации акустических волн в звуковом и инфразвуковом диапазонах. При этом, поскольку у рассматриваемых устройств практически нет ограничения по частоте на прием волновых возмущений низких частот, они оба могут использоваться для регистрации турбулентности среды и возмущений типа «сдвига ветра».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Рубцов В.Д. Прием волновых возмущений при помощи узконаправленных колебаний // Радиотехника и электроника. - 1997. - Т. 42. - № 6.
2. Бернштейн И.Л. Опыт Саньяка на радиоволнах // Доклады АН СССР. - 1950. - Т. 36. - № 4.

**ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF REGISTER ARRANGEMENTS OF WAVE  
INDIGNANTIONS IN ENVIRONMENT WITH USE OF OPTICS,  
MICROWAVE AND ULTRASONIC BEAMS**

**Roubtsov V.D., Dubyanskiy S.A.**

Characteristics of register arrangements of acoustic waves in air and water with use optic, microwave and ultrasonic beams are considered. Results of research of acoustic response, direction properties and bandwidth of arrangements by use that beams are produced.

**Keywords:** wave indignation, register arrangement, optics, microwave and ultrasonic 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 - радиоп физика, радиотехника, нанотехнология, эксплуатация воздушного транспорта.