

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 621.39,621.391.6,621.396.2

ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ МЕТОД ПОДВОДНОЙ РАДИОНАВИГАЦИИ В УСЛОВИЯХ АРКТИКИ

© 2020 г. Г. Я. Шайдуров^а, *, Г. Н. Романова^а, Д. С. Кудинов^а

^аСибирский федеральный университет,
ул. Академгородок, 13А, Красноярск, 660036 Российская Федерация

*E-mail: GShy35@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.12.2018 г.

После доработки 27.03.2019 г.

Принята к публикации 12.04.2019 г.

Рассмотрен радионавигационный метод определения координат морских подводных аппаратов (ПА) без всплытия (в том числе под паковыми льдами в условиях Арктики) на основе взаимодействия электромагнитных (ЭМ) и акустических (АК) волн в скин-слое морской воды. Получены энергетические оценки для радиоканала в зависимости от проводимости воды и глубины положения ПА. Показаны результаты лабораторных испытаний, подтверждающих параметрический эффект и использование этого явления для приема электромагнитных сигналов под водой на разностной частоте ЭМ- и АК-колебаний.

DOI: 10.31857/S0033849420070116

ВВЕДЕНИЕ

Тяжелые погодные условия Арктики – штормы, ледовые поля, ветры – являются чрезвычайно сложным препятствием для вождения морских подводных аппаратов (ПА) с буксируемыми вблизи поверхности моря приемными антеннами. В случае передачи и приема сигналов через радиобуй требуется всплытие ПА, что не всегда возможно из-за толщины слоя льда. Бортовые инерционные средства навигации (гироскоп, лаг) не обеспечивают необходимой точности вождения ПА, особенно при проведении геодезических и геофизических работ по исследованию морского дна и поиску минеральных ресурсов, что требует периодической коррекции координат по данным спутниковых систем навигации.

В связи со значительным поглощением электромагнитных волн морской водой для передачи информации на ПА в погруженном состоянии используют сверхнизкие частоты в диапазоне 75...78 Гц [1] с мощными наземными радиостанциями и большими полотнами антенн – проекты “Seafarer” (“Мореплаватель”) (США) и “Зевс” (Россия).

Так, в системе “Seafarer”, при мощности передатчика 10 МВт и площади горизонтального полотна погруженных в грунт антенн в 100×100 км², на частоте 75 Гц была достигнута дальность 5000 км с глубиной приема в морской воде до 100 м [1].

Из-за сложности и высокой стоимости этих систем представляет интерес поиск альтернативных вариантов, в том числе для связи и навигации.

В [2] обращено внимание на возможность создания сейсморазведочных подводных систем для решения задач поиска углеводородов в условиях Арктики. В настоящее время для этой цели используются широкофюзеляжные корабли и буксируемые сейсмические косы длиной до 1000 м и более. Кроме того, в ледовой обстановке необходимо использовать ледокол. Такая техника морской сейсморазведки для условий Севера малоэффективна.

В работе [3] указано на возможность подводной радиосвязи на основе эффекта параметрической демодуляции сигналов наземных радиостанций, работающих на частотах $f_s \pm F$, путем “подсветки” с ПА поверхности воды акустическим излучением частоты f_a , близкой к частоте электромагнитной волны f_s . В этом случае в скин-слое возникают сигналы низкой частоты F , мало поглощаемые морской водой, которые принимаются приемником ПА.

Интерес представляет работа [4], посвященная исследованиям взаимодействия просветных АК- и ЭМ-волн при передаче информации вдоль трассы на большие расстояния в различных условиях: в морской среде и в гидроакустическом бассейне с пресной водой. В этой работе был обнаружен предсказанный в [3] параметрический эффект.

Первые работы по исследованию влияния ультразвука на проводимость электролитов были выполнены в 20-х годах прошлого века П. Дебаем [5, 6]. Вопросы взаимодействия ЭМ- и АК-волн в

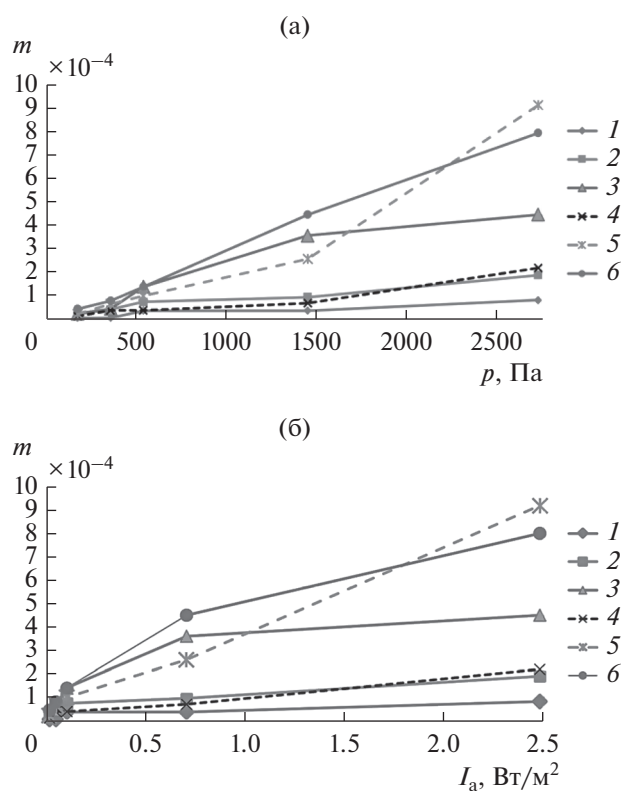


Рис. 1. Экспериментальные зависимости коэффициента параметрического преобразования m от давления p (а) и от плотности потока мощности I_a (б) при различной концентрации раствора соли S : 1 (1), 2.94 (2), 5.88 (3), 11.7 (4), 23.5 (5) и 35% (6).

электролитах и морской воде рассматривались в работах [7–13].

Физической основой параметрического эффекта является динамическое раскачивание ионов солевых примесей в морской воде ультразвуком. Наши теоретические оценки и экспериментальные результаты [14] позволили уточнить основные зависимости параметрического эффекта от солености воды и плотности потока мощности АК-излучения, которые необходимы для решения прикладных задач.

Подобный эффект происходит и в горных породах, проводимость которых носит ионный характер за счет наличия в порах горной породы минерализованной воды. При этом наблюдалось двукратное и более изменение проводимости горной породы под действием сейсмических ударов [15].

1. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С целью установления количественных соотношений между давлением ультразвука и коэффициентом параметрического преобразования ЭМ-поля ультразвуком в октябре 2018 г. авторами был проведен эксперимент в бассейне с соленой

водой (раствор NaCl). Размеры бассейна составляли $0.5 \times 0.5 \times 1.3 m^3$, общий объем воды 320 л. Между противоположными сторонами бассейна через титановые электроды пропускали ток от генератора, а прием возникающей при этом ЭДС вели с помощью помещенного на поверхность воды отрезка кабеля длиной 20 см (электрического диполя), концы которого были погружены в воду через неполяризующиеся электроды. Частоту генератора можно было изменять в районе основной частоты $f_0 = 16.5$ кГц. АК-волны генерировались вибратором с рабочей частотой $f_a = 15$ кГц. При этом у поверхности воды формировалась плотность потока мощности в диапазоне до $2.5 W/m^2$, что соответствовало давлению 2500 Па.

На рис. 1а, 1б представлены экспериментально наблюдаемые зависимости коэффициента параметрического преобразования (демодуляции) m от давления p и плотности потока мощности акустического излучения I_a при различной концентрации раствора соли.

Коэффициент параметрического преобразования определяли как отношение:

$$m = E_F / E_{f_0}, \quad (1)$$

где E_F – ЭДС с выхода приемного электрического диполя на разностной частоте $F = f_0 - f_a$; E_{f_0} – ЭДС на основной частоте $f_0 = 16.5$ кГц.

Как видно из рис. 1б, при плотности потока мощности АК-излучения $I_a \approx 1.2 W/m^2$ $m = 10^{-3}$, а при $I_a = 2.5 W/m^2$ коэффициент m достигал величины 2×10^{-3} , что указывает на его линейную зависимость от акустического давления в растворе.

Подобные результаты были получены и при бесконтактном возбуждении ЭМ-поля в указанном бассейне с помощью индуктивной петли, расположенной горизонтально на расстоянии 1.5 м от его центра, а также в бассейнах с размерами $0.5 \times 0.5 \times 0.5 m^3$ и $1.5 \times 2.5 \times 3 m^3$. Перенос технических решений на открытый морской бассейн не изменяет физической основы параметрического эффекта, поскольку эксперименты, проведенные в бассейнах разных размеров, не влияли на величину коэффициента параметрической демодуляции.

2. РАСЧЕТНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА В МОРСКИХ УСЛОВИЯХ

На рис. 2 приведена схема приема радиосигнала под водой параметрическим методом. Плоская ЭМ-волна береговой радиостанции с частотой f_0 и напряженностью поля \vec{E}_0 имеет на границе раздела вода–воздух эллиптическую поляризацию. Величину горизонтальной составляющей напряженности поля на поверхности моря E_{x0} можно

оценить через коэффициент преломления, определяемый, согласно граничным условиям Леонтовича, мнимой частью относительной комплексной диэлектрической проницаемости морской воды

$$E_{x0} = \frac{E_{z0}}{\sqrt{\gamma\lambda\sigma_b}}, \quad (2)$$

где $\lambda = c/f_3$ – длина ЭМ-волны, в м; c – скорость света, σ_b – электропроводность морской воды, в См/м; $\gamma = 1/(2\pi c\epsilon_0) = 60$ 1/См, ϵ_0 – электрическая постоянная, E_{z0} – вертикальная компонента напряженности поля береговой радиостанции [16].

В сторону поверхности моря с ПА излучается АК-волна с частотой $f_a = f_3 \pm F$, близкой к частоте f_3 , где F – частота модуляции ЭМ-сигнала.

Дадим оценку требуемой мощности излучателя АК-волн для глубины погружения ПА $h = 50$ м, площади АК-пятна на поверхности моря $S_a = 1000$ м² и плотности потока мощности АК-излучения $I_a = 1$ Вт/м². С учетом эмпирического выражения для коэффициента потерь в воде β [дБ/км] = $0.036 f_a^{3/2}$ [кГц] [17] получаем

$$P_a = 2I_a S_a \exp(-\beta h) = 2 \text{ кВт}. \quad (3)$$

АК-излучение модулирует электропроводность воды в скин-слое по гармоническому закону:

$$\sigma(t) = \sigma_b [1 + m_\sigma \sin(\omega_a t)], \quad (4)$$

где σ_b – электропроводность воды в отсутствие АК-поля; m_σ – коэффициент, определяющий зависимость электропроводности от плотности потока мощности АК-волны, плотности воды, ее солености и температуры.

Толщина скин-слоя для ЭМ-волны с угловой частотой $\omega_3 = 2\pi f_3$ определяется как

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega_3}}, \quad (5)$$

где $\mu = \mu'\mu_0$ – магнитная проницаемость воды, $\mu' = 1$, μ_0 – магнитная постоянная.

Для случая нормального падения на поверхность моря плоской ЭМ-волны с напряженностью поля $E_x = E_{x0} \sin(\omega_3 t)$ в скин-слое наводится ток с плотностью

$$j_x = \sigma(t) E_x = \sigma_b [\sin(\omega_3 t) + m_\sigma \sin(\omega_3 t) \sin(\omega_a t)] E_{x0}. \quad (6)$$

В глубь моря распространяется низкочастотная составляющая ЭМ-волны на разностной частоте $\omega_3 - \omega_a = 2\pi F$, несущая информацию о координатах. Ей соответствует плотность тока

$$j_F = m\sigma_b E_{x0} \cos[(\omega_3 - \omega_a)t] = m\sigma_b E_{x0} \cos(2\pi Ft). \quad (7)$$

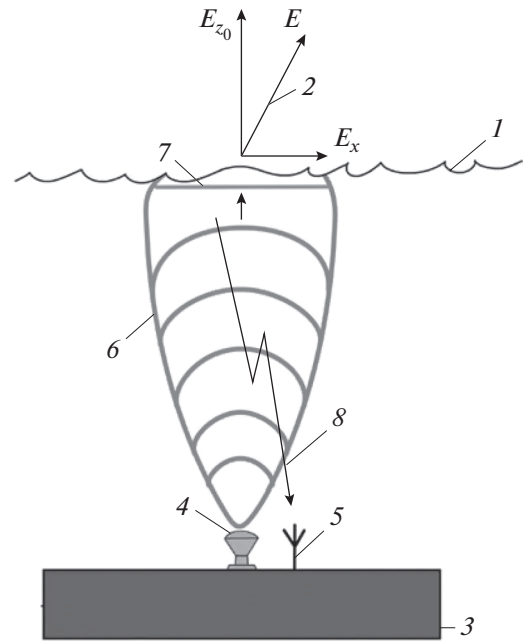


Рис. 2. Схема приема радиосигнала под водой с использованием параметрического метода: 1 – поверхность моря, 2 – ЭМ-волна береговой радиостанции, 3 – ПА, 4 – АК-излучатель, 5 – приемная антенна ЭМ-волн, 6 – акустическое излучение, 7 – АК-пятно на поверхности моря, 8 – ЭМ-волна на разностной частоте $F = f_3 - f_a$.

Здесь коэффициент $m = m_\sigma/2$ имеет смысл коэффициента параметрического преобразования.

Для оценки возможностей приема навигационных или связных сигналов параметрическим методом под водой воспользуемся графиком зависимости вертикальной напряженности ЭМ-поля радионавигационной станции (РНС) E_{z0} от расстояния над поверхностью моря (рис. 3), который рассчитан для излучаемой мощности в 1 кВт и рабочей частоты 100 кГц в полосе частот 1 Гц [16]. Как видно из рисунка, на дистанции 500 км $E_{z0} = 300$ мкВ/м, а на дистанции 1000 км – $E_{z0} = 100$ мкВ/м.

Принимая, для примера, величину базы кодированного шумоподобного сигнала (ШПС) $B = 10^4$ с длительностью одного канального бита в 10 мс, можно оценить ширину спектра сигнала как $\Delta F = 100$ Гц.

При $\lambda = 3000$ м и $\sigma_b = 4$ См/м коэффициент преломления ЭМ-волны на границе воздух–вода составит $(\gamma\lambda\sigma_b)^{1/2} = 848$. Тогда из формулы (2) получаем оценку для горизонтальной составляющей напряженности электрического поля на поверхности моря на расстоянии 500 км: $E_{x0} = 3.5 \times 10^{-7}$ В/м.

Чтобы поднять уровень сигнала, целесообразно проинтегрировать электрическое поле E_{x0} по поверхности моря путем “подсветки” его скин-слоя несколькими АК-лучами, излучаемыми с

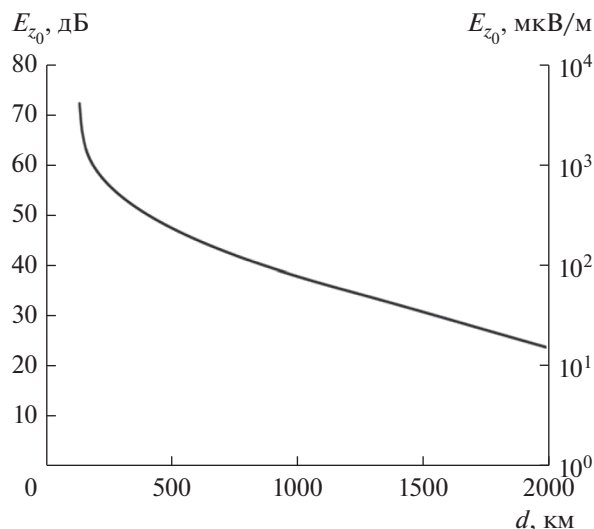


Рис. 3. Зависимость напряженности вертикальной составляющей электрического поля базовой станции над морем от расстояния на частоте 100 кГц для излучаемой мощности 1 кВт.

ПА, расположив их в линейный ряд. В этом случае в скин-слое на частоте ЭМ-волны образуется эквивалентная ЭМ-антенна, длина которой L и поперечное сечение $S_3 = \delta d$ [м^2] (d – диаметр АК-пятна на поверхности воды).

Амплитуду плотности тока в морской воде эквивалентного дипольного источника с напряженностью поля E_{x0} можно найти из формулы (7):

$$j_{x0} = 0.5m\sigma_b E_{x0} = 3.5 \times 10^{-10} \text{ А/м}^2. \quad (8)$$

Расчет в формуле (8) проведен при следующих параметрах: плотность потока мощности $I_a = 1 \text{ Вт/м}^2$, коэффициент параметрического преобразования $m = 5 \times 10^{-4}$, соленость воды $S = 35\%$, ее электропроводность $\sigma_b = 4 \text{ См/м}$ (см. рис. 1б). В этом случае суммарный ток через эквивалентный параллелепипед с площадью сечения S_3 на частоте $F = 50 \text{ Гц}$ составит

$$J_{x0} = j_{x0}S_3 = j_{x0}\delta d = 8.4 \times 10^{-9} \text{ А},$$

где $d = 30 \text{ м}$, $\delta = 0.8 \text{ м}$ – средняя глубина скин-слоя на частоте $f_3 = 100 \text{ кГц}$.

Плотность тока на глубине нахождения ПА $h = 50 \text{ м}$ от проводника с током J_{x0} длиной L можно определить согласно [18]:

$$j_{xh} = \frac{J_{x0}L \exp(-\alpha h)}{2\pi(L^2/4 + h^2)^{3/2}} = J_{x0}\Phi(L, h) = 8.4 \times 10^{-14} \text{ А/м}^2, \quad (9)$$

где $\alpha = 28 \times 10^{-3} \text{ 1/м}$ – коэффициент затухания ЭМ-поля разностной частоты F в морской воде при $F = 50 \text{ Гц}$; $L = 30 \text{ м}$ – длина эквивалентной

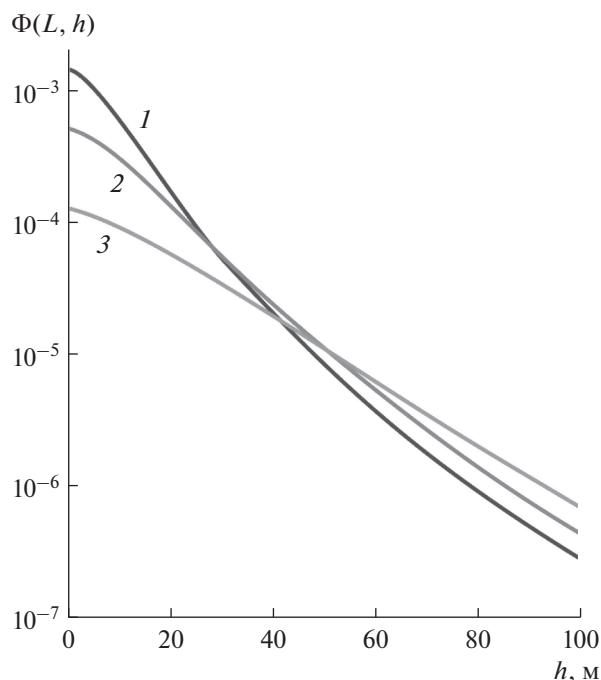


Рис. 4. Зависимость геометрического коэффициента $\Phi(L, h)$ от глубины приема h при различных длинах акустического пятна L : 30 (1), 50 (2), 100 м (3).

поверхностной антенны (диполя), соответствующая диаметру акустического пятна на поверхности воды d . График функции $\Phi(L, h)$ при различных значениях L приведен на рис. 4.

Напряженность электрического поля ЭМ-волны на глубине 50 м составит

$$E_{xh} = \frac{j_{x0}}{\sigma_b} = 2.1 \times 10^{-14} \text{ В/м}. \quad (10)$$

Соответственно, напряженность магнитного поля –

$$H_h = \frac{E_{xh}}{W} = 2.1 \times 10^{-12} \text{ А/м}, \quad (11)$$

где $W = \sqrt{\mu} \left(\left[\epsilon - i \frac{\sigma_b}{2\pi F} \right] \right)^{-1/2} = 10^{-2} \text{ Ом}$ – волновое сопротивление морской воды; $\epsilon = \epsilon' \epsilon_0$ – диэлектрическая проницаемость воды; $\epsilon' = 80$.

Далее оценим уровень сигнала на входе бортового приемника ПА на разностной частоте $F = 50 \text{ Гц}$.

При приеме на электрическую антенну с длиной $L_A = 100 \text{ м}$ получаем

$$U_E = E_{xh}L_A = 2.1 \times 10^{-12} \text{ В}. \quad (12)$$

Если использовать магнитную бортовую антенну с эффективной площадью $S_M = 10^6 \text{ м}^2$, то уровень сигнала на входе приемника на глубине h составит

$$U_h = H_h 2\pi F \mu S_M = 8.4 \times 10^{-10} \text{ В}. \quad (13)$$

На выходе приемника, после свертки ШПС с базой $B = 10^4$ уровень сигнала при приеме на электрическую антенну увеличится до следующего значения:

$$U_{EB} = U_E B^{1/2} = 2.1 \times 10^{-10} \text{ В.}$$

При этом уровень сигнала с использованием магнитных антенн составит

$$U_{hB} = U_h B^{1/2} = 2.8 \times 10^{-8} \text{ В.}$$

Эти оценки показывают, что прием сигнала более эффективен на магнитную антенну, чем на электрическую.

Сопоставим далее полученные уровни сигнала с действующими на входе приемника помехами и шумами.

Величину отношения $C_U / (U_{\text{п}} + U_{\text{ш}})$ – сигнал/(помеха плюс шум) с оценкой полезного сигнала C_U по формулам (12) или (13) можно дополнительно поднять за счет интегрирования сигнала по мере снижения скорости движения ПА.

Тепловой шум на входе приемника в полосе частот составляет

$$U_{\text{ш}} = (kT\Delta FR_{\text{вх}})^{1/2} \approx 2 \times 10^{-9} \text{ В,}$$

где $k = 1.38 \times 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана, $T \approx 300$ К – температура входных цепей, $\Delta F = 100$ Гц – полоса пропускания приемника, $R_{\text{вх}} = 10^3$ Ом – входное сопротивление приемника.

Напряжение электрического поля помех при приеме на буксируемую антенну длиной 300 м и движение ПА со скоростью 3.1 м/с составляло $U_{\text{п}} = -175$ дБ/В [19], что на глубине $h = 50$ м соответствует напряженностям полей помех: электрического $E_{\text{п}} = 5 \times 10^{-12}$ В/м и магнитного $H_{\text{п}} = 5 \times 10^{-10}$ А/м. При этом отношение сигнал/помеха на выходе приемника после свертки ШПС в нашем случае составляет 12 дБ.

В длинноволновых радионавигационных системах типа “Лоран” (США), ошибка в оценке координат в зависимости от дальности находится в пределах 100...1000 м, что определяет требуемое отношение сигнал/помеха, которое регулируется изменением скорости движения корабля и подбором величины базы сигнала B .

При подледном плавании энергетика канала существенно улучшается, поскольку слой льда преломляет передаваемый ЭМ-сигнал сильнее, чем поверхностный слой морской воды. В этом случае согласно формуле (2) на поверхности льда горизонтальная составляющая электрического поля волны будет больше, чем на поверхности воды в $(\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{л}})^{1/2}$ раз:

$$E_x = E_{z0} (\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{л}})^{1/2}, \quad (14)$$

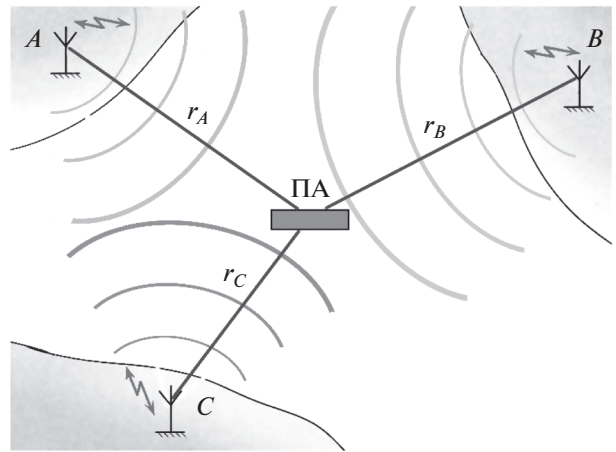


Рис. 5. Эпюры: $E(t)$ – поле излучения базовых РНС, расположенных в точках A, B, C ; $S_A(t), S_B(t), S_C(t)$ – сигналы акустической подсветки, $R(\tau)$ – корреляционные свертки ШПС в приемнике; T_A, T_B, T_C – длительность сигналов базовых станций; τ_{AB}, τ_{AC} – времени задержек корреляционных свертки ШПС.

где $\sigma_{\text{в}} = 4$ См/м – электропроводность воды; $\sigma_{\text{л}}$ – электропроводность льда.

Согласно [20] $\sigma_{\text{л}} = 10^{-3}$ См/м при температуре -20°C на частоте 100 кГц. При этом уровень полезного сигнала должен возрасти в $\sqrt{\sigma_{\text{в}}/\sigma_{\text{л}}} = 63$ раза.

Безусловно, этот эффект требует экспериментального подтверждения, хотя с точки зрения теории подобный вывод вполне корректен.

На рис. 5 показана схема расположения базовых РНС в трех точках: A, B, C . Координаты ПА определяются на пересечении линий положения в рабочей зоне РНС. Для разностно-дальномерных РНС – это гиперболы с фокусами в точках A, B, C , на которых разность расстояний между парой базовых станций соответствует линиям положения. Координаты ПА подчиняются условиям $r_A - r_B = \text{const}, r_A - r_C = \text{const}$.

Широкополосные кодированные сигналы передатчиков базовых РНС могут излучаться последовательно во времени, как показано на рис. 6, либо параллельно с ортогональным кодированием.

После демодуляции ЭМ-волны в скин-слое на бортовую антенну ПА сигналы поступают в виде низкочастотной последовательности видеоимпульсов длительностью 10 мс. В этом случае, при базе $B = 10^4$, длительность каждой из пачек T_A, T_B, T_C составит 100 с и дискретность отсчетов координат по расстоянию при скорости движения ПА 1 м/с составит 100 м.

Путем преобразования в цифровой поток в микроконтроллере приемника формируются сиг-

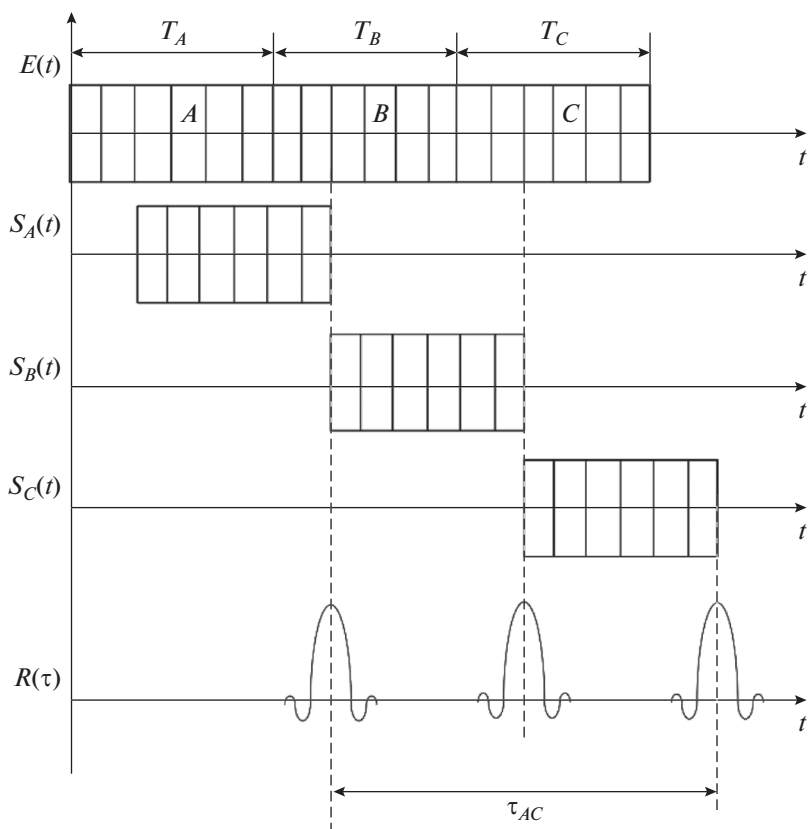


Рис. 6. Схема расположения базовых РНС: A, B, C – точки расположения базовых радионавигационных станций; r_A, r_B, r_C – расстояние между базовыми станциями и подводным аппаратом; ПА – подводный аппарат.

налы корреляционных сверток $R(\tau)$ (см. рис. 5) и измеряется разность времени прихода сигналов базовых станций $t_{AB} = (r_A - r_B)/c$ и $t_{AC} = (r_A - r_C)/c$, соответствующая линиям положения РНС, нанесенным на географическую карту местности с обозначением точек положения базовых РНС A, B, C (см. рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Рассмотрена возможность реализации подводного приема радионавигационных или связных сигналов в длинноволновых диапазонах на основе параметрического взаимодействия электромагнитных и акустических волн в скин-слое. При мощности излучения базовых радионавигационных станций в 1 кВт, на дистанции 500...1000 км и рабочей частоте 100 кГц минимальная глубина подводного приема на магнитную антенну оценивается как 50 м.

2. В случае приема подо льдами, за счет увеличения коэффициента преломления волны электрического поля, можно ожидать существенного повышения отношения сигнал/помеха, что позволит соответственно снизить мощность акустического излучателя и увеличить глубину приема.

3. Получены экспериментальные материалы с количественной оценкой параметрического эффекта в широком диапазоне плотностей потока акустического излучения и концентрации соли.

4. По результатам лабораторных исследований, проведенных в 2018 г., было найдено, что при плотности потока мощности акустического излучения 1 Вт/м² коэффициент параметрического преобразования электромагнитного поля в сигналы низкой частоты составил 5×10^{-4} , что потенциально позволяет реализовать прием радиосигналов на глубине 50 м без всплытия подводного аппарата.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты №№ 17-07-00885, 20-37-70009).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соловьев В.И., Новик Л.И., Морозов И.Д. Связь на море. Л.: Судостроение, 1978.

2. *Левицкий Н.В., Детков В.А., Мегеря В.М., Шайду-ров Г.Я.* // Технологии сейсморазведки. 2010. № 3. С. 75.
3. *Шайдуков Г.Я., Кудинов Д.С., Сухотин В.В.* // Успехи совр. радиоэлектроники. 2012. № 12. С. 89.
4. *Mironenko M.V., Alekseev A.V., Korochentsev V.I. et al.* // Proc. 2000 Int. Symp. on Underwater Technology. Tokyo 23–26 May. N.Y.: IEEE, 2000. P. 105.
5. *Бергман Л.* Ультразвук и его применение в науке и технике. М.: Изд-во иностр. лит., 1957.
6. *Oka S.* // Proc. Phys.-Math. Soc. Japan. 1933. V. 15. № 11. P. 413.
7. *Yeager E., Novorka F.* // J. Acoust. Soc. Amer. 1953. V. 25. № 3. P. 443.
8. *Cheeke J.D.N.* Fundamentals and applications of ultrasonic waves. Boca Raton: CRC Press, 2002.
9. *Dukhin A.S., Goetz P.J.* Characterization of Liquids, Nano- and Microparticulates, and Porous Bodies Using Ultrasound. Amsterdam: Elsevier, 2010.
10. *Ляхов Г.А., Суязов Н.В.* // ЖТФ. 1998. Т. 68. № 1. С. 80.
11. *Осовец С.М., Гинзбург Д.А., Гурфинкель В.С.* // Успехи физ. наук. 1983. Т. 141. № 1. С. 103.
12. *Сёмкин С.В., Смагин В.П.* // Альманах совр. науки и образования. Тамбов: Грамота, 2008. № 7. С. 181.
13. *Shumann W.O.* // Zeitschrift Angew. Physik. 1957. V. 9. № 8. P. 373.
14. *Шайдуков Г.Я., Кудинов Д.С., Романова Г.Н.* // Ученые записки физ. фак. МГУ. 2014. № 6. С. 6.
15. *Поляков О.А., Лизун С.А., Кондрат В.Ф. и др.* Основы сейсмоэлектроразведки. М.: Недра, 1995.
16. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. М.: Связь, 1972.
17. *Голямина И.П.* Ультразвук. Маленькая энциклопедия. М.: Сов. энциклопедия, 1979.
18. *Zhdanov M.S.* Foundations of Geophysical Electromagnetic Theory and Methods. Amsterdam: Elsevier, 2018.
19. *Калашников Н.И., Дудкин Ф.Л., Николаенко Ю.В.* Основы морской электроразведки. Киев: Наукова думка, 1980.
20. *Финкельштейн М.И., Мендельсон В.Л., Кутев В.А.* Радиолокация слоистых земных покровов. М.: Недра, 1986.