

Таким образом, совместно используя волновые свойства упругих, электромагнитных и «гравитационных» волн, можно повысить эффективность комплексных измерений для прогноза катастрофических явлений в океане и прибрежных районах.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Короченцев В.И., Мироненко М.В., Короченцев В.В.* Повышение эффективности работы параметрических антенн при взаимодействии упругих и электромагнитных волн в морской воде / 2-й Всероссийский симпозиум «Сейсмоакустика переходных зон». – Владивосток: Дальнаука, 2001. – С.100-106.
1. *Новиков Б.К., Руденко О.В., Тимошенко В.И.* Нелинейная гидроакустика. – Л.: Судостроение, 1981. – 263 с.
2. *Воронин В.А., Кузнецов В.П., Мордвинов Б.Г., Тарасов С.П., Тимошенко В.И.* Нелинейные и параметрические процессы в акустике океана. – Ростов-на-Дону: РосИздат, 2007. – 448 с.
3. Патент на изобретение № 2140093, 20 октября 1999 г. (19) RU (11) 2140093 (13)С1 (51) bG IV 11,00, 3,00 1/00.
4. Патент на изобретение № 2138123, 20 сентября 1999 г. (19) RU (11) 2138123 (13) С1 (51) 6H01H 5/00.
5. Патент России Приоритет № 98104556 19 февраля 1998 г.
6. Патент России 3 2147755 20 апреля 2000 г.
7. РФФИ, № проекта 08-01-99034, 2008.

#### **Короченцев Владимир Иванович**

Институт радиоэлектроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного технического университета  
E-mail: [vkoroach@mail.ru](mailto:vkoroach@mail.ru)  
690950, Россия, г. Владивосток, Аксаковский переулок, 3а, тел.: 8(4232) 450982  
Кафедра гидроакустики

#### **Vladimir Ivanovich Korochentsev**

Far Eastern National Technical University, Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering  
E-mail: [vkoroach@mail.ru](mailto:vkoroach@mail.ru)  
3a, Axakovsky pereulok, Vladivostok, 690950, Russia, Ph.: +7 (4232) 450982  
Department of Hydroacoustics

УДК 538.3

**В. П. Рублев**

#### **МОДЕЛЬ РАСЧЕТА КОМПОНЕНТ ПОЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДИПОЛЯ В ПРОВОДЯЩИХ СРЕДАХ**

*В докладе рассмотрены проблемы подводной связи в мелком море, предложена модель расчета и анализа параметров электромагнитного канала связи в безграничной морской среде. Приведен пример разработки и опытной эксплуатации переговорного устройства для аквалангистов на электромагнитном канале связи.*

*Модель расчета; подводная связь; мелкое море; электромагнитный канал связи.*

V.P. Rublev

### MODEL CALCULATION COMPONENTS OF POWER ELECTRIC DOUBLET IN ELECTRICAL CONDUCTION AREA

*The problems of underwater communication in the shallow sea, also the model of computation and parameters analysis of electromagnetic channel of links in border less marine environment are considered in the paper. An example of engineering and experimental testing of intercommunication speech appliance for divers is offered using electromagnetic channel of communication.*

*Model of computation; underwater communication; shallow sea; electromagnetic channel of communication.*

В разработках систем электромагнитной подводной связи представляют интерес три случая поля электрического диполя в морской среде: для бесконечной однородной среды; для полубесконечной среды (среды с границей); для слоистых сред. Распространение электромагнитных полей в бесконечной однородной среде имеет место в том случае, когда расстояние между приемником и передатчиком много меньше суммарной глубины погружения их и расстояния до дна и много меньше величины скин - слоя (рис.1), т. е.

$$r \ll (h_1 + h_2) \gg \delta, \quad (1)$$

$$r \ll [2z - (h_1 + h_2)] \gg \delta, \quad (2)$$

причем последнее условие менее жестко, так как дно тоже слабопроводящая среда.

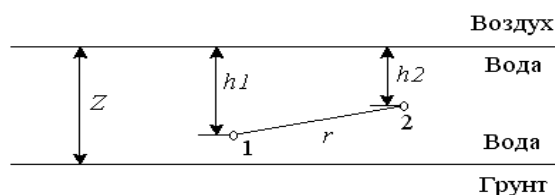


Рис. 1. Расположение излучателя (1) и приемника (2) относительно границ раздела сред

В научно-технической литературе для описания характера распространения электромагнитного сигнала введен термин «вверх – вдоль – вниз», то есть от источника к поверхности моря, далее вдоль поверхности (поверхностная волна), затем от поверхности к точке регистрации. При этом дальность связи по сравнению с безграничной морской средой значительно увеличивается, так как затухание сигнала при распространении в воздухе (диэлектрической среде) меньше, чем в морской воде (проводящей среде). В придонном варианте наблюдается та же картина, но с несколько большим затуханием сигнала в полупроводящей среде морского дна.

В диэлектрической среде критерием оценки параметров электромагнитного поля является длина волны. В проводящей среде критерием является  $\delta$  – толщина скин-слоя, то есть расстояние, на котором амплитуда напряженности поля падает в  $e = 2,71$  раз. Эффективность работы систем подводной связи определяется энергетическими характеристиками. Поэтому при разработке систем электромагнитной связи следует учитывать, что если аппаратура рассчитана на максимальную дальность связи в безграничной морской среде, то в придонных или приповерхностных

вариантах качество связи повышается, так как к прямым сигналам добавляются сигналы, прошедшие по воздуху или грунту с меньшими потерями.

Установившееся поле от короткого (по сравнению с длиной волны) электрического диполя длиной  $l$  и током в диполе  $I = I_0 \cdot e^{j\omega t}$  в безграничной однородной изотропной среде с удельной электропроводностью  $\sigma$ , диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , магнитной проницаемостью  $\mu$  на произвольной частоте и произвольном расстоянии от источника описывается известными формулами распространения:

$$E_r = \frac{I \cdot l}{2\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \cdot \frac{\cos\theta}{r^3} \cdot (1 + \gamma r) \cdot e^{-\gamma r}, \quad (3)$$

$$E_\theta = \frac{I \cdot l}{4\pi(\sigma + j\omega\epsilon)} \cdot \frac{\sin\theta}{r^3} \cdot (1 + \gamma r + \gamma^2 r^2) \cdot e^{-\gamma r}, \quad (4)$$

$$H_\phi = \frac{I \cdot l}{4\pi} \cdot \frac{\sin\theta}{r^2} \cdot (1 + \gamma r) \cdot e^{-\gamma r}, \quad (5)$$

$$E_\phi = 0, \quad (6)$$

$$H_r = 0, \quad (7)$$

$$H_\theta = 0, \quad (8)$$

где константа распространения  $\gamma$ , равна:

$$\gamma = \sqrt{-\epsilon\mu\omega^2 + j\omega\mu\sigma}, \quad (9)$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота;  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица.

Выражения (3) ÷ (9) справедливы для любых сред, включая проводящие ( $\omega\epsilon \ll \sigma$ ) и диэлектрические ( $\omega\epsilon \gg \sigma$ ). Однако в диэлектрических и проводящих средах мы имеем дело с разными частотно пространственными масштабами (длиной волны  $\lambda$  и толщиной скин-слоя  $\delta$  соответственно), физически определяемыми индуктивными, емкостными и резистивными свойствами среды, а математически – безразмерным расстоянием  $\gamma r$ .

Одним из самых важных различий сред является возможность волнового распространения в диэлектрической среде и невозможность – в проводящей. Различие между ними не терминологическое и не математическое, а физическое. И для диэлектрической и для проводящей среды при анализе частотных свойств электромагнитного поля можно выделить три случая:  $|\gamma r| \ll 1$ ,  $|\gamma r| \approx 1$  и  $|\gamma r| \gg 1$ . Для поля диполя в диэлектрической среде эти три случая соответствуют общепринятому выделению трех аппроксимационных зон: ближней, промежуточной и дальней зоны.

В сферической системе координат при расположении оси диполя вдоль полярной оси (рис.2) при условии  $\sigma \gg \omega\epsilon$  (токи смещения пренебрежительно малы по сравнению с токами проводимости, случай морской среды),  $h_1 + h_2 \gg \delta$ , константу распределения можно записать в виде:

$$\gamma = (1 + j)\beta, \quad (10)$$

где  $\beta = 2\pi \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f\sigma} = \frac{1}{\delta}$  [м<sup>-1</sup>],  $\delta$  – толщина скин-слоя, т. е. глубина в проводящей среде, на которой амплитуда нормально падающей плоской волны уменьшается в  $e$  раз или приблизительно на 63%;  $\sigma$  – проводимость среды.

Тогда выражения (3) ÷ (5) при замене  $\gamma$  на  $(1 + j)\beta$  и соответствующих преобразований, примут вид:

$$E_r = \frac{p \cos \theta}{2\pi\sigma r^3} \cdot |F_1(\beta r)|, \tag{11}$$

$$E_\theta = \frac{p \sin \theta}{4\pi\sigma r^3} \cdot |F_2(\beta r)|, \tag{12}$$

$$H_\varphi = \frac{p \sin \theta}{4\pi r^2} \cdot |F_1(\beta r)|, \tag{13}$$

где  $p = I \cdot l$  – дипольный момент электрического диполя;  $I$  – ток в диполе;  $l$  – длина электрического диполя; величина  $\beta r$  равна количеству скин-слоев между точками излучения и приема.

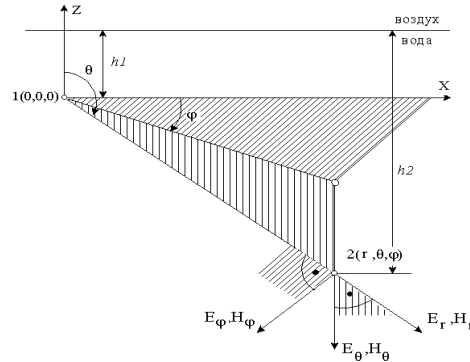


Рис.2. Расположение излучателя (1) и приемника (2) в бесконечной морской среде

При этом

$$|F_1(\beta r)| = \sqrt{(1 + \beta r)^2 + (\beta r)^2} \cdot e^{-\beta r}, \tag{14}$$

$$|F_2(\beta r)| = \sqrt{(1 + \beta r)^2 + (\beta r)^2 (1 + 2\beta r)^2} \cdot e^{-\beta r}. \tag{15}$$

Таким образом, формулы распространения электромагнитных полей в бесконечной однородной среде (самые неблагоприятные условия связи) интересны для анализа при разработке связи между аквалангистами, подводными аппаратами, систем телеметрии и телеуправления.

Для расчета электрических и магнитных компонент поля при излучении электрического диполя выражения (11) ÷ (13) можно записать в виде:

$$E_r = p \cdot A_1, \tag{16}$$

$$E_\theta = p \cdot A_2, \tag{17}$$

$$H_\varphi = p \cdot A_3, \tag{18}$$

где

$$A_1 = \frac{\cos \theta}{2\pi\sigma r^3} \cdot |F_1(\beta r)| \left[ \frac{Ом}{М^2} \right], \tag{19}$$

$$A_2 = \frac{\sin \theta}{4\pi\sigma r^3} \cdot |F_2(\beta r)| \left[ \frac{Ом}{М^2} \right], \tag{20}$$

$$A_3 = \frac{\sin \theta}{4\pi r^2} \cdot |F_1(\beta r)| \left[ \frac{1}{M^2} \right]. \quad (21)$$

Отсюда следует, что определяющим фактором дальности действия систем электромагнитной связи в проводящих средах является дипольный момент. Если известны компоненты напряженности поля шумов при определенных условиях работы системы связи, то, применяя соотношения сигнал/шум равный трем, можно из выражений (16) ÷ (18) определить величину дипольного момента, необходимого для обеспечения заданной дальности связи при определенной ориентации приемопередающих антенн:

$$p = \frac{3E_{\text{ш}r}}{A_1}, \quad (22)$$

$$p = \frac{3E_{\text{ш}\theta}}{A_2}, \quad (23)$$

$$p = \frac{3H_{\text{ш}\varphi}}{A_3}, \quad (24)$$

где  $E_{\text{ш}r}$ ,  $E_{\text{ш}\theta}$ ,  $H_{\text{ш}\varphi}$  – составляющие поля электромагнитных шумов.

Таким образом, вычислив коэффициенты ( $A_1 \div A_3$ ) для фиксированных частот (величина скин-слоя зависит от частоты), при заданном дипольном моменте излучающего диполя можно оценить компоненты поля на определенном расстоянии от излучателя.

На основании приведенных выражений разработана модель расчета параметров электромагнитного канала связи в морской среде [3], на базе которой специалистами ДВ филиала НПО промысловства и ДВГТУ при консультативном участии специалистов ИПЭЭ РАН разработано подводное переговорное устройство для легководолазов, изготовлена опытная партия изделий.

Преимущества речевой связи на токах проводимости перед акустической связью – лучшая разборчивость речи, отсутствие реверберации; сохранение связи при наличии между партнерами водорослей, подводных скал, аэрированных слоев воды; малая зависимость от ориентации отмечались во всех экспериментах и испытаниях.

Система подводной радиотелефонной связи, предназначенная для симплексной связи между аквалангистами и обеспечивающим судном, в которой применен принцип модуляции электрического токового поля, состоит из двух полуккомплектов. Подводная станция включает в себя электронный блок с питанием в боксе, микрофон, смонтированный в маске, и головные телефоны костной проводимости (ушная раковина открыта, свободна для продувания), а также электроды дипольной антенны, размещенные на голени и запястье аквалангиста. Надводная станция имеет длинную антенну – 30 м, или более в зависимости от желаемой дальности связи. Модуляция осуществляется в полосе звуковых частот 300-5000 Гц. Дальность связи (в режиме «аквалангист – аквалангист» 70 – 80 м; на мелководье (глубины до 20 м) – более 100 м. Связь между берегом (обеспечивающим судном) и аквалангистами – более 150 м.

На акватории острова Рейнеке с помощью линейной излучающей антенны (токоведущие провода с металлическими пластинами на концах) длиной около 300 м, эффективность которой была повышена за счет использования особенности местности, была обеспечена односторонняя речевая связь в радиусе 2 км (при базе

приемного диполя 2 м). Мощность излучения берегового передатчика не превышала при этом 5 Вт [2].

На акватории бухты Потрокл (бухта 1) и бухты Соболев (бухта 2) были проведены испытания системы звукоподводной связи на токах проводимости в морской среде. Схема проведения эксперимента приведена рис.3. Были использованы две надводные станции. В бухте Потрокл была установлена двухсторонняя речевая связь «берег – бетонный причальный пирс» на расстоянии более 300 м. При этом диполь антенны станции №2 был расположен с тыльной стороны пирса (для гидроакустической связи подобные условия непреодолимы, так как бетонный пирс

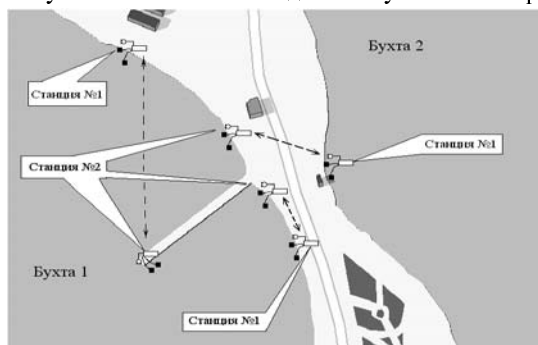


Рис.3. Схема проведения эксперимента

является преградой для акустических волн). Выходная мощность передающих антенн не превышала 5 Вт.

Кроме того, установлена устойчивая двухсторонняя связь между бухтой Соболев и бухтой Потрокл через грунтовый перешийек на расстоянии между корреспондирующими точками около 100 м. В этом случае регистрировался суммарный сигнал по каналам "вода-грунт-вода" и "вода-воздух-вода".

В опытной эксплуатации переговорное устройство использовалось при проведении исследовательских и судоремонтных работ в открытом море, подводных киносъёмках в археологической экспедиции, обслуживании выростных хозяйств мариккультуры и т. д.

Следует отметить, что при чрезвычайных ситуациях на море, строительстве и обслуживании терминалов нефтяных трубопроводов, а также освоении полезных ископаемых шельфовой зоны потребуется подводная связь, надежно работающая в бухтах и мелком море, которую с успехом можно осуществить с использованием электромагнитных полей.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Рублев В.П. Оптимизация речевой многоабонентной связи в мелком море // Сборник трудов XVIII сессии Российского акустического общества, в 3-х т. – М.: ГЕОС. 2006. Т. 2. – С. 310–313.
2. Ольшанский В.М., Бионическое моделирование электросистем слабозлектрических рыб – М.: Наука. 1990. – 112 с.
3. Рублев В.П., Короченцев В.И. Приближенная модель расчета параметров электромагнитного канала телеметрии в морской среде. // Матер. докл. Междунар. научно-техн. конф. «Технические проблемы освоения Мирового океана». Владивосток: Дальнаука, 2005. – С.207–210.

#### **Рублев Виктор Павлович**

Институт электроники, информатики и электротехники Дальневосточного государственного университета, г. Владивосток

E-mail: [LAVR46@mail.ru](mailto:LAVR46@mail.ru)

690109, Россия, г. Владивосток, ул. Нейбутова, 41, кв.85, тел.: 8(4232) 290-591

**Rublev Viktor Pavlovich**

Institute of Radio electronics, Information Science and Electrical Engineering, Vladivostok

E-mail: [LAVR46@mail.ru](mailto:LAVR46@mail.ru)

Fl. 85, 41, Neibuta St., Vladivostok, 690109, Russia, Ph.: +7(4232)290-591

УДК 532.5.032

**В. А. Рыжов, С. В. Тарасов**

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТОГО ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО ДВИЖИТЕЛЯ ТИПА МАШУЩЕЕ КРЫЛО**

*Работа посвящена численному моделированию обтекания пропульсивной системы с упругим машущим крыльевым элементом, применяемой для малых необитаемых подводных аппаратов. Анализируется влияние жесткости и других проектных параметров на тягу и пропульсивную эффективность движителя.*

*Машущее крыло; движитель; адаптивность; уравнения Навье-Стокса.*

**V.A. Ryzhov, S.V. Tarasov**

### **MATHEMATICAL MODELIN OF ECOLOGICAL ENERGY-CONSERVING FLAPPING WING PROPULSOR**

*In this paper computational modeling of flapping-wing propulsors for autonomous underwater vehicles is considered. Effect of flexibility and other design parameters on average thrust and efficiency of the propulsor is analyzed.*

*Waves wing; moves; adaptability; equation Navje-Stoks.*

Практические вопросы экологии, создания энергетически более экономичных и более эффективных подводных технических средств, интерес, проявляемый к автономным необитаемым микрообъектам, к системам преобразования энергии моря, ставят адаптивные движители бионического типа – упругие машущие крыльевые устройства – в один ряд с другими пропульсивными системами, которые могут быть использованы в этих целях.

Принципы, лежащие в основе подобных устройств, являются практическим продолжением идей, заложенных природой в живых объектах, прошедших огромный путь эволюционного развития. Тезис о том, что живой организм в результате эволюции наилучшим образом приспосабливается к своей среде обитания, подтвержден многочисленными биологическими исследованиями.

Можно констатировать, что с точки зрения учета особенностей гидродинамики биологических объектов для практической реализации важны следующие факторы:

- специфическая кинематика движения крыла (плавника),
- способность управления вихревыми структурами, сходящими с крыла (и тела) для обеспечения высоких пропульсивно-несущих показателей,
- способность использования энергии (вихревых структур) потока для повышения эффективности движения (например, перемещение в волновых, стратифицированных, возмущенных потоках; вблизи границ раздела сред; групповые перемещения),
- изменяемая геометрия и упругость крыла, подстраивающиеся под конкретный режим движения,
- существенные амплитуды колебаний и/или деформации крыла,