

УДК 534.29, 544.623

## **ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ И ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭФФЕКТА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ДЕМОДУЛЯЦИИ ДЛЯ ПОДВОДНОГО РАДИОПРИЁМА СИГНАЛОВ В МОРСКОЙ ВОДЕ**

**Г. Я. Шайдуров, Д. С. Кудинов**

**Сибирский федеральный университет, кафедра радиоэлектронных систем, Красноярск**

Получена 30 января 2012 г.

**Аннотация.** Даются уточнения по экспериментальным данным оценки глубинности и дальности подводного радиоприема радиосигналов в морской воде, излучаемых береговым передатчиком с горизонтальной антенной в диапазоне длинных волн в сравнении с американской сверхдлинноволновой системой «Sanguin».

**Ключевые слова:** подводный радиоприем, параметрический, демодуляция, сверхдлинный волны, морская вода, электропроводность.

**Abstract.** Improved values of the depth and range evaluation of radio reception in the sea water found by means of experimental data are shown. The use of parametric demodulation effect for submarine reception of radio signal emitted by long-wave coastal station in comparison with super-low frequencies wave system «Sanguin» is given.

**Key words:** submarine, radio reception, parametric, demodulation, super-low frequency waves, sea water, conductivity.

Рассмотрим задачу приема радиосигнала под морской поверхностью с использованием эффекта гетеродинирования сигнала в скин-слое электромагнитной волны путем «подсвечивания» поверхности воды ультразвуком с борта подводного аппарата (рис.1) .

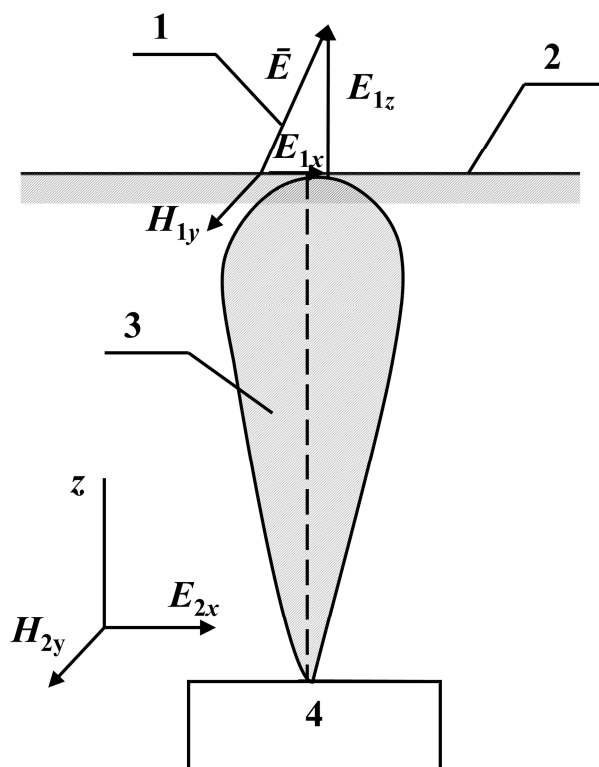


Рис.1. Схема приема радиосигнала параметрическим методом.

1 – составляющие вектора электромагнитной волны; 2 – морская поверхность; 3 – диаграмма направленности ультразвукового излучения; 4 – подводный аппарат.

На этой схеме электромагнитная волна 1 (ЭМ), излучаемая береговой или воздушной радиостанцией, несущая сигнал сообщения на границе раздела вода-воздух 2 обретает эллиптическую поляризацию с вертикальной компонентой электрического поля  $E_{1z}$ , и горизонтальной  $E_{1x}$  и магнитного поля  $H_{1y}$ . Поверхность воды облучается направленным акустическим излучением с диаграммами направленности 3, формируемым с помощью ультразвуковых излучателей, расположенных на корпусе подводного аппарата 4 (ПА). В результате параметрического взаимодействия горизонтальной компоненты электрического поля  $E_{1x}$  частоты  $f_3$  с потоком мощности акустического излучения  $I$  частоты  $f_a$  в скин-слое падающего на поверхность ЭМ излучения формируется сигнал разностной частоты  $F = f_3 - f_a$ . [1]. При соблюдении соотношения  $F \ll f_3$  ЭМ сигнал разностной частоты уходит на глубину  $h$  с

существенно меньшим поглощением по сравнению с сигналом частоты  $f_3$  и принимается на ПА. Напряженность ЭМ поля разностной частоты  $F$  в виде векторов  $E_{2x}$  и  $H_{2y}$  создают на выходе приемных электрических или магнитных антенн сигналы информационного сообщения.

В работах [2, 3] дается краткая справка о существующих системах передачи данных на подводные лодки, работающих в СДВ диапазонах радиоволн в районе 1-100 Гц (американские проекты SANGUIN и SEAFARER).

Необходимость приема радиосигналов под водой без всплытия ПА существует во многих задачах как оборонного, так и гражданского характера, в частности для осуществления радионавигации и управления ПА в том числе при подледном плавании, например при сейсмическом зондировании земли в полярных районах, когда поверхность моря плотно закрыта паковыми льдами.

Классическая схема подводного радиоприема сегодня реализуется путем приема на буксируемую ПА электрическую антенну (плавающий кабель-трос), с глубиной погружения ПА порядка 100 м. Прямой радиоприем на антенну, расположенную на ПА, в зависимости от используемой частоты радионесущей  $f_3$ , возможен до глубин порядка 10 м в диапазонах частот 50-100 кГц и 100-150 м в диапазон сотен герц (проект SANGUIN).

Поскольку длинноволновые системы морской радионавигации работают в диапазонах частот 10 кГц («Омега», «Маршрут») и 100 кГц («Лоран», «Чайка»), то, в связи с высоким поглощением морской водой радиоволн этих частот, представляет интерес количественная оценка возможностей радиоприема сигналов при использовании параметрического метода и сопоставления его энергетических характеристик с классическим методом передачи информации.

Из-за нетривиальности постановки задачи дадим приближенную оценку параметров радиоприема уровня сигнала, отношения сигнал/шум при заданных значениях скорости передачи для случая плоской волны в районе приема и эквивалентной модели линейного (виртуального) ЭМ излучателя радиосигнала

разностной частоты  $F$ , формируемого в районе взаимодействия АК и ЭМ волн на поверхности воды.

В случае плоской волны напряженности поля разностной частоты  $F$  на глубине  $h$  можно определить как:

$$E_{2x} = E_{1z} n_E m_\sigma e^{-\delta_F h} \quad (1)$$

$$H_{2y} = H_{1y} m_\sigma e^{-\delta_F h}, \quad (2)$$

где  $n_E = \sqrt{\frac{\omega_E \varepsilon_0}{\sigma}}$  – коэффициент преломления ЭМ волны на границе раздела воздух-вода;  $m_\sigma = \frac{\Delta\sigma}{\sigma}$  – относительный коэффициент модуляции электропроводности воды  $\sigma$  АК излучения интенсивности  $I$ . В этих формулах  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9}$  – диэлектрическая проницаемость вакуума;  $\omega_E = 2\pi f_0$  – несущая частота радиосигнала.

Соотношение (2) определяется приближенными граничными условиями Леонтовича [4] и соответствует непрерывности горизонтальной компоненты магнитного поля на границе раздела вода-воздух.

В соответствие с [1, 5]:

$$m_\sigma = 1.75 * 10^{-6} \sqrt{I}, \quad (3)$$

где  $I$  – интенсивность АК излучения у поверхности воды в Вт/м<sup>2</sup>.

Принимаемый сигнал частоты  $\omega_m = 2\pi F$  при использовании приемной электрической антенны длиной  $L_A$ , расположенной на ПА, можно найти с помощью соотношения:

$$U_{2E} = E_{2x} L_A. \quad (4)$$

Для магнитного приема:

$$U_{2H} = H_{2y} \mu_0 \omega_m S_A, \quad (5)$$

где  $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$  Гн/м – магнитная проницаемость вакуума;  $S_A$  – эффективная площадь приемной магнитной антенны.

Соответственно мощность сигнала на выходе приемных антенн можно оценить как:

$$P_E = \frac{U_{2E}^2 * \eta_A}{R_{ВХ}}; P_H = \frac{U_{2H}^2 * \eta_A}{R_{ВХ}}; \quad (6)$$

где  $R_{вх}$  – входное сопротивление приемника,  $\eta_A$  – коэффициент передачи антенного фидера.

Суммарную мощность внешних помех и собственных шумов приемника запишем как:

$$P_{\Pi} = P_{внеш} + P_{ш}, \quad (7)$$

где  $P_{внеш} = \frac{U_{вн}^2}{R_{вх}}$ ;  $U_{вн}$  – амплитуда внешних ЭМ помех на глубине  $h$ ;  $P_{ш} = kT_k^0 \Delta F^0$  – мощность собственных тепловых шумов приемника;  $k=1.38 \cdot 10^{-23}$  Вт\*Гц/град – постоянная Больцмана;  $T_k^0$  – температура входных цепей приемника в Кельвинах;  $\Delta F$  – полоса пропускания приемника в Гц.

Внешние помехи на разностной частоте  $F$  затухают в морской воде точно так же как принимаемый ЭМ сигнал на этой частоте

$$E_{2\Pi} = E_{1\Pi} e^{-\delta_F h}, \quad (9)$$

$$H_{2\Pi} = H_{1\Pi} e^{-\delta_F h}.$$

Следовательно

$$U_{X\Pi}^E = E_{2\Pi}^X L_A; U_{Y\Pi}^H = H_{2\Pi} \mu_0 S_A \omega_m \quad (10)$$

$$P_{внеш}^E = \frac{(U_{X\Pi}^E)^2 * \eta_A}{R_{вх}}; P_{внеш}^H = \frac{(U_{Y\Pi}^H)^2 * \eta_A}{R_{вх}}$$

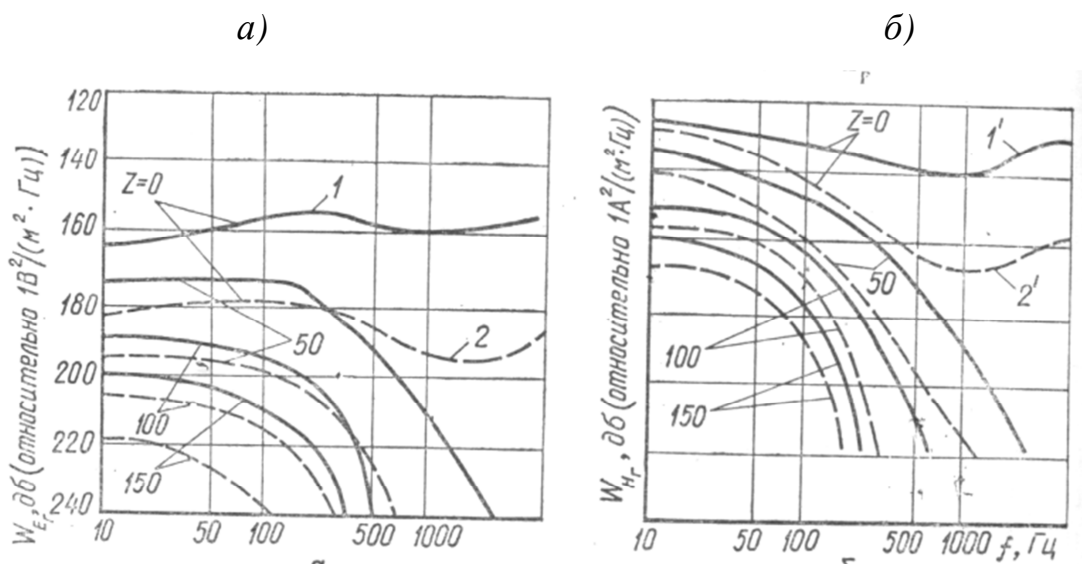


Рис.2. Горизонтальные электрическое (а) и магнитное (б) поля атмосферных шумов в океане на глубинах 0-150 м при следующих значениях

интенсивностей: 1. 1' - max. 2. 2' - min.

Отношение сигнал/помеха на входе приемника, в частности для приема на магнитную антенну при  $P_{ш} \ll P_{внеш.}$

$$q = \frac{P_H}{P_{\Pi}} = \frac{U_{2H}^2}{(U_{Y\Pi}^H)^2} = \frac{H_{2Y}^2}{H_{Y\Pi}^2} = \frac{(H_{1Y}m_{\sigma})^2 B}{(H_{1\Pi})^2}, \quad (11)$$

где  $B = \Delta FT$  – база сигнала сообщения;  $T$  – длительность сигнала.

Величина  $q$  определяется через вероятность ошибки  $P_{ош}$  в приеме сообщения как

$$P_{ош} = \frac{1}{2} e^{-mq}, \quad (12)$$

где в зависимости от вида модуляции

$m=0.25$  – амплитудная модуляция,  $m=0.5$  – частотная модуляция,  $m=1$  – фазовая модуляция.

Поскольку [4]

$$H_{1Y} = \frac{E_{1z}}{120\pi}, \quad (13)$$

то подстановка (13) в (1) позволяет определить необходимую напряженность электрической компоненты поля сигнала на поверхности воды как:

$$E_{1z} = \sqrt{\frac{q(H_{1\Pi})^2}{m_{\sigma}^2 B}} = \sqrt{\frac{q}{B}} * \frac{H_{1\Pi}}{m_{\sigma}} * 120\pi. \quad (14)$$

Здесь  $H_{1\Pi} = \frac{E_{1\Pi}}{120\pi}$ .

С учетом этого

$$E_{1z} \geq \sqrt{\frac{q}{B}} \frac{E_{1\Pi}}{m_{\sigma}}. \quad (15)$$

Из (15) видно, что управляемыми факторами надежности приема сообщений являются параметры  $q, B, m_E(f_s, \sigma, l)$ .

При этом уровень помехи  $E_m$  находится из графиков рис.2, для разностной частоты  $F = f_s - f_a$ .

На поверхности моря уровень горизонтальной составляющей электрического поля соответствует в диапазоне частот 100-1000 Гц от (-140) до (-160) дБ/В<sup>2</sup>/м<sup>2</sup> Гц.

Напряженность магнитного поля помехи на поверхности воды  $H_{1\Pi} = (-120) \div (-140) \frac{дБ}{В^2} / м^2 Гц$ .

При  $H_{1П} = 10^{-6} \text{ А/м}\sqrt{\text{Гц}}$ ;  $m_{\sigma} = 10^{-3}$ ;  $q = 10$ ;  $B = 1000$  получим из (14) численную оценку необходимой напряженности поля в точке приема:

$$E_{1z} = 20 * 10^{-4} \frac{B}{m} = 2 \text{ мВ/м}\sqrt{\text{Гц}}. \quad (16)$$

Оценка  $E_{1z}$  по (15), при  $E_{1П} = 160 \frac{\text{дБ}}{\text{В}^2} / \text{м}^2 \text{Гц}$  дает:

$$E_{1z} = \sqrt{\left(\frac{10}{1000}\right) \frac{10^{-8}}{10^{-3}}} = 10^{-4} \frac{B}{m\sqrt{\text{Гц}}} = 100 \frac{\text{мкВ}}{m\sqrt{\text{Гц}}} \quad (17)$$

В пересчете через волновое сопротивление воздуха  $W=377 \text{ Ом}$  напряженность магнитного поля помехи, соответствующей уровню  $E_{1z}$  по (17) будет равна:

$$H_{1П} = \frac{E_{1z}}{W} = \frac{10^{-4}}{377} = 0.27 * 10^{-6} \frac{\text{А}}{m\sqrt{\text{Гц}}}. \quad (18)$$

По другим данным [2] уровень атмосферных помех на частоте 100 Гц соответствует по  $E_{1z} \approx 200 \text{ мкВ/м}\sqrt{\text{Гц}}$ . В этом случае необходимо обеспечить на поверхности моря:

$$E_{1z} = 0.1 \frac{200}{10^{-3}} = 20 \frac{\text{мкВ}}{m\sqrt{\text{Гц}}}. \quad (19)$$

Таким образом, по разным оценкам необходимая напряженность электрического поля на поверхности моря колеблется в широких пределах от приемлемой величины (17), (18), до недостижимой на дальних расстояниях (19).

Заметим, что в этих оценках не учитывается глубина расположения ПА и требуемая энергетика передающей радиостанции определяется лишь уровнем некоррелированных помех на поверхности моря.

Резервом обеспечения надежности связи являются задаваемые параметры  $q, B, m_{\sigma}, \eta_A, P_{П}$ , где  $\eta_A$  – КПД передающей антенны;  $P_{П}$  – мощность передатчика.

Согласно данным зависимости горизонтальной составляющей напряженности электрического поля в морской воде от расстояния до передающего центра и глубины погружения ПА для частоты  $f_0=75 \text{ Гц}$ , приведённой в [3], уверенный приём сигнала в море может быть обеспечен на глубине 150 м.

При этом напряженность поля  $E_{2x} = 3 * 10^{-4} \frac{мкВ}{м}$  для  $r=8000$  км. С учетом коэффициента преломления волны на поверхности и поглощения в воде величина  $E_{1z}$  должна составлять:

$$E_{1z} = \frac{E_{2x}}{n_E} e^{+\delta h}; \delta = 2\pi\sqrt{\sigma f_3 * 10^{-7}} = 0.034, \quad (20)$$

где при  $\sigma = 4См/м$ ;  $f_3 = 75$  Гц;  $n_E = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\sigma}} = 0.25 * 10^{-4}$  Гц;  $\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9} \frac{Ф}{м}$ ;  $q=3дБ$  -  $E_{1z} = 2 \frac{мВ}{м}$ , что совпадает с оценкой (16).

Далее рассмотрим «конкурентные» возможности параметрической системы. В соответствии с [3] величина  $E_{1z}$  может быть рассчитана по полуэмпирической формуле:

$$E_{1z} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\pi\mu_0}{c}} f_3 I L \frac{\sqrt{Q}}{H_i \sqrt{\sigma}} \sqrt{\frac{\cos\theta}{a \sin^2 \frac{r}{a} c}} e^{-\delta_a r} \left| \frac{мкВ}{м} \right|, \quad (21)$$

где  $\mu_0$  – магнитная проницаемость вакуума, Гн/м;  $c$  – скорость света м/с;  $H_i$  – высота ионосферы, м;  $\sigma$  – эффективная проводимость воды, См/м;  $f$  – частота колебаний, Гц;  $I$  – ток в антенне, А;  $L$  – эффективная длина антенны, м;  $\delta_a$  – коэффициент атмосферного затухания, дБ/км;  $r$  – расстояние между передатчиком и приемником, м;  $a$  – радиус Земли, м;  $\theta$  – угол поворота диаграммы направленности антенны передатчика относительно приемной антенны.

Горизонтальная компонента электрического поля на поверхности воды:

$$E_{1x} = E_{1z} n_E. \quad (22)$$

Отношение горизонтальных компонент поля для параметрического и классического методов на расстоянии  $r$  от передающего центра:

$$\frac{E_{xП}}{E_{xК}} = \frac{f_{П} I_{П} L_{П} \sqrt{\eta_{П} n_{ЕП}}}{f_{К} I_{К} L_{К} \sqrt{\eta_{К} n_{ЕК}}} m_{\sigma} e^{-(\delta_{aП} - \delta_{aК})r}, \quad (23)$$

где  $n_{ЕП} = \sqrt{\frac{\omega_{П} \epsilon_0}{\sigma}}$ ;  $n_{ЕК} = \sqrt{\frac{\omega_{К} \epsilon_0}{\sigma}}$ ;  $\delta_{aП} = \frac{0.0014}{c^{0.6}} f_{П}^{0.6}$ ;  $\delta_{aК} = \frac{0.0014}{c^{0.6}} f_{К}^{0.6}$ ;  $\eta_{П} \approx \left(\frac{L_{П}}{\lambda_{П}}\right)^2$ ;  $\eta_{К} \approx \left(\frac{L_{К}}{\lambda_{К}}\right)^2$ .

$\lambda_{П}, \lambda_{К}$  – соответственно длины волн, используемых при параметрическом и классическом методах передачи.



С учетом того, что  $\lambda_{\Pi} = \frac{c}{f_{\Pi}}$ ;  $\lambda_K = \frac{c}{f_K}$ , с допущением равенства  $E_{x\Pi} = E_{xK}$ , из (23) получим соотношение по электрическому моменту передающих антенн параметрического и классического методов:

$$K_{\Pi K} = \left(\frac{f_{\Pi}}{f_K}\right)^{\frac{5}{2}} m_E e^{-\delta_{a\Pi} * r}, \quad (24)$$

где  $m_E$  – коэффициент параметрической демодуляции.

Согласно [1], связь коэффициента демодуляции  $m_E$  с относительным изменением электропроводности воды  $m_{\sigma} = \frac{\Delta\sigma}{\sigma}$  описывается как:

$$m_E = iAtg\delta_0 \frac{\Delta\sigma}{\sigma} e^{-i\varphi_{\sigma}}, \quad (25)$$

где  $A = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon' - itg\delta_0(1 - \varepsilon' + itg\delta_0)}}$ ;  $tg\delta_0 = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0}$ ;  $\varepsilon_0 = \frac{1}{36\pi} * 10^{-9} \frac{\Phi}{\text{м}}$  – диэлектрическая проницаемость (ДП) воздуха;  $\varepsilon'$  – относительная ДП;  $\omega = 2\pi f_3$  – рабочая частота.

Подстановка значений  $f_3 = 15$  кГц;  $\varepsilon' = 80$ ;  $\sigma = 4$  См/м даёт значение:

$$A \approx 10^{-10}; tg\delta_0 = 5 * 10^6.$$

Откуда следует, что при  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 0.1$

$$m_E = 4 * 10^{-5}, \quad (26)$$

где величина относительного приращение электропроводности воды  $\frac{\Delta\sigma}{\sigma} = 0.1$  в пересчете на 1 Па гидростатического давления рассчитывалась по данным [6].

Эксперимент проводился в лабораторном баке размером 0.5×0.5×1.2м с подсоленной водопроводной водой. Акустическое излучение создавалось на частоте 15 кГц, интенсивностью до 1 Вт/м<sup>2</sup>, титанат-бариевым излучателем.

С противоположных концов длинной стороны бака с помощью титановых электродов создавалось электрическое поле на частоте  $f_3 = 16.5$  кГц.

Прием сигналов разностной частоты  $f_3 - f_a = 1.5$  кГц осуществлялся на электрический диполь длиной 0.05 м, заводненный по концам на поверхности воды с помощью неполяризующихся электродов.

На рис.3 приведены графики зависимости коэффициента демодуляции  $m_{\sigma}$  зависимости коэффициента демодуляции  $m_{\sigma}$  в функции от величины тока,

потребляемого излучателем и солености воды. При этом значение тока  $I=35$  мА соответствовало плотности потока мощности акустического излучения  $1 \text{ Вт/м}^2$ . Как видно из этих графиков коэффициент ПМД для интенсивности ультразвука  $1 \text{ Вт/м}^2$  соответствует величине  $m_E = 10^{-3}$ .

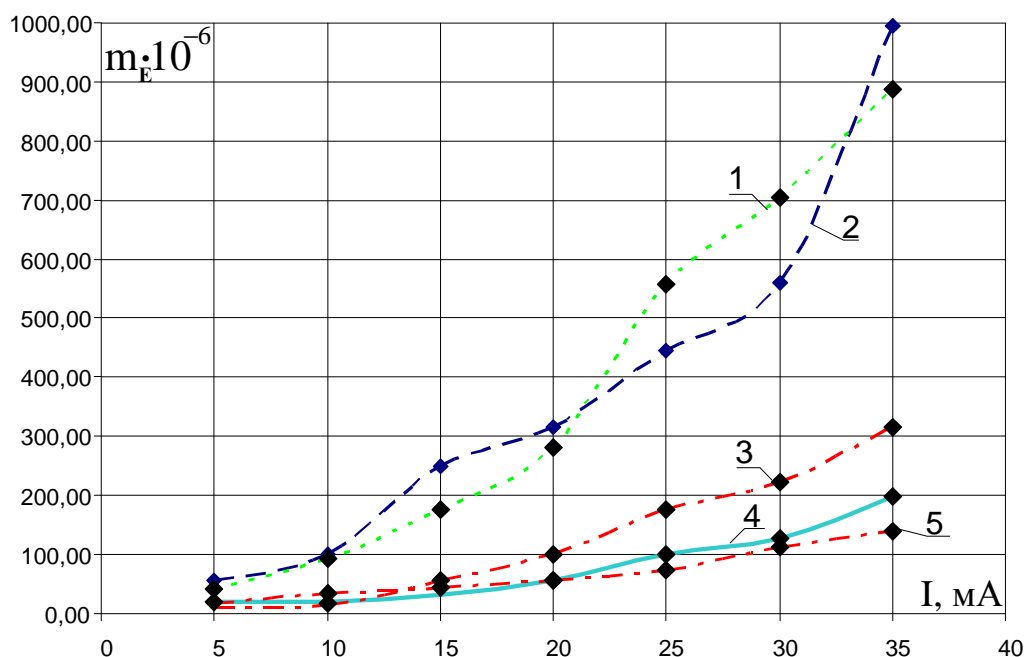


Рис.3. Экспериментальные результаты зависимости коэффициента демодуляции  $m_E$  от величины тока питания акустического излучателя при солености воды 2,5 ‰ и 5‰. 1 – продольное возбуждение (пр.в.) 5‰; 2 – поперечное возбуждение (п.в.) 2,5‰; 3 – п.в. 5‰; 4 – п.в. 2,5‰; 5 – п.в. 5‰.

Между тем экспериментальные данные, полученные нами в лабораторных условиях для электропроводности воды  $\sigma = 4 \text{ См/м}$ , показали величину:

$$m_E = 10^{-3} \sqrt{I_a}. \quad (27)$$

Расхождения с (26) в 25 раз можно объяснить как существенно более высокое влияние колебательного давления ультразвука на электропроводность воды по сравнению с гидростатическим давлением.

Это явление объясняет и экспериментально наблюдаемый факт быстрого роста коэффициента параметрической демодуляции с увеличением электропроводности воды:

$$m_E(\sigma) = \frac{E_{f_a-f_a}}{E_{f_a}} = \alpha\sigma^2, \quad (29)$$

где  $E_{f_a-f_a}$  – напряженность поля сигнала разностной частоты между частотами действующих в воде электрического поля и ультразвука;  $E_{f_a}$  – напряженность электрического поля исходной частоты  $f_a$ ;  $\alpha$  – коэффициент пропорциональности.

Поскольку величина электропроводности воды в основном определяется концентрацией ионов примесных солей, то колебательное давление ультразвука, приводящее к интенсивному смещению ионов примесей по направлению действия потока мощности ультразвука приводит к интенсивному росту токов проводимости, что и объясняет указанное выше влияние ультразвука на электропроводность.

Так как количественная теория этого эффекта в известной авторам литературе не описана, а экспериментально наблюдаемый факт не вызывает сомнения, то ниже для выяснения потенциальных возможностей параметрического метода приема радиосигналов под водой будем использовать в (24) в качестве  $m_E$  экспериментальную величину  $m_E = 10^{-3}$ .

С помощью формулы (24) в табл. 1 даны расчетные оценки для соотношения электрических моментов передающих антенн параметрического и классического методов в допущении равенства горизонтальных компонент электрического поля под поверхностью воды на расстоянии  $r = 5000 \text{ км}$  от передающего центра.

Зависимость коэффициента выигрыша параметрического метода по электрическому моменту.

Как видно из этой таблицы на частоте 75 Гц, соответствующей системе SANGUIN, наибольший выигрыш параметрического метода по электрическому моменту передающей антенны составляет величину  $K_{ПК} = 313$ .

Табл. 1

$f_k, \text{Гц}$ \diagdown $f_{\Pi}, \text{Гц}$	$10^4$	$2 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^4$	$10^5$	$f_{\Pi} =  G_{\Pi} $
1	$28 \cdot 10^3$	$65 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$	
10	285	671	1980	1800	
75	56	187	313	115	
100	2.8	6.5	19.6	19	

С учетом того, что длина антенны системы SANGUIN составляет величину  $LK=100$  км, а мощность передатчика 10 МВт [4] то подобный выигрыш параметрического метода означает, что тот же результат параметрический метод может обеспечить при длине антенны в 10 км с мощностью передатчика 10 кВт.

На частоте модуляции  $F = f_k = 1$  Гц прием сигналов возможен на глубине 100 Ом, что недостижимо с использованием никакого другого метода передачи.

#### **Выводы:**

1. Путем прямых экспериментов в лабораторных условиях уточнен коэффициент параметрической демодуляции электромагнитных волн ультразвуком в соленой воде, по абсолютной величине в 25 раз превышающий его расчетную оценку через гидростатическое давление.

2. Расчетная оценка энергетического потенциала канала передачи сообщений с береговой радиостанции, с учетом экспериментально полученного коэффициента демодуляции позволило определить оптимальную частоту электромагнитного канала (50 кГц) и выигрыш по электрическому моменту передающей системы в 313 раз, по сравнению с системой SANGUIN, при этой же глубине приема порядка 150 м на дистанции 5000 км относительно береговой радиостанции.

Работа выполнена при финансовой поддержке аналитической ведомственной целевой программы «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010гг.)» по проекту № 2.1.2/775.

## Литература

1. *Романова Г.Н., Шайдуrow Г.Я.*// О параметрической демодуляции электромагнитных волн ультразвуком на границе раздела вода-воздух. Радиотехника и электроника, 1991. Т.36, №2. – С. 410.
2. *Шайдуrow Г.Я.* Потенциальные возможности параметрического канала передачи информации через границу раздела вода-воздух. Успехи современной радиоэлектроники. №7. 2009. С.41-48.
3. *Соловьев В.И., Новик Л.И., Морозов И.Д.* Связь на море. Л.: Судостроение, 1978.
4. Система связи «Sangvin». // Радиоэлектроника за рубежом. Тех. Информация. Вып.45 (691). М.: НИИ Эк.инф. по Р., 1972. – С. 23.
5. *Шайдуrow Г.Я., Лукьянчиков В.Н., Романова Г.Н.*// О параметрической модуляции электромагнитной волны ультразвуком на границе раздела вода-воздух. Радиотехника и электроника, 1985. Т.30. № 11. – С. 21–36.
6. *Попов Н.И., Федоров К.Н., Орлов В.М.* Морская вода. М.: Наука. 1979. 310 с.