

Б. И. Филиппов

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЁТ ГИДРОАКУСТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ

Энергетический расчёт гидроакустического канала связи распадается на ряд взаимосвязанных этапов: выбор рабочей частоты линии связи; выбор гидроакустических антенн; определение акустической мощности сигнала. При выборе рабочей частоты систем гидроакустической связи необходимо учитывать частотную зависимость параметров гидроакустического сигнала. Рабочую частоту следует выбирать из двух условий: получение минимальной излучаемой мощности и обеспечение максимальной пропускной способности при прочих равных условиях. Важным параметром, характеризующим эффективность антенны в режиме излучения, является удельная мощность, равная отношению активной акустической мощности, излучаемой преобразователем, к площади его колеблющейся поверхности. Характеристики направленности антенн в значительной степени будут определять энергетический потенциал линии связи и, следовательно, дальность связи при жестком ограничении в энергопотреблении от автономных источников питания на донной станции. В свою очередь, энергопотребление аппаратуры при ограниченной емкости источников питания будет определять продолжительность работы автономных донных станций без подъема для замены источников питания. Чем выше направленные свойства передающей и приемной антенн, тем выше энергетический потенциал линии связи. Но с улучшением направленных свойств антенн будет уменьшаться ширина характеристики направленности и, следовательно, угол пространственного обзора, что приведёт к уменьшению зоны связи на поверхности воды и соответствующему уменьшению дальности связи. Проведено сравнение серийно выпускаемых гидроакустических антенн 1D1 и СКОЛ-2000Р. Расчеты позволяют сделать вывод о целесообразности использования в составе гидроакустических систем связи антенн СКОЛ-2000Р, т. к. для обеспечения одинакового качества передачи цифровой информации мощность, подводимая к антенне 1D1, должна быть в 75 раз больше мощности, подводимой к антенне СКОЛ-2000Р.

Ключевые слова: гидроакустический канал, гидроакустическая антенна, рабочая частота канала, акустическая мощность излучения.

Введение

Состояние проблемы. Энергетический расчет гидроакустического канала включает в себя ряд взаимосвязанных этапов:

- выбор рабочей частоты линии связи. В современных системах различного назначения используются рабочие частоты от единиц до сотен кГц;
- выбор гидроакустических антенн;
- определение акустической мощности сигнала. В известных системах гидроакустической связи используются мощности от десятых долей до сотен Вт.

При выборе рабочей частоты систем гидроакустической связи различного назначения необходимо учитывать частотную зависимость параметров гидроакустического сигнала. Изменения параметров принимаемого гидроакустического сигнала от частоты рассмотрены во многих литературных источниках [1, 2].

Соображения по выбору рабочей частоты систем передачи информации по гидроакустическим линиям связи были приведены в [3], где отмечалось, что её следует выбирать из двух условий: получение минимальной излучаемой мощности, обеспечивающей заданную помехоустойчивость в точке приёма, или максимальную дальность при той же мощности и помехоустойчивости системы связи.

Методы и результаты исследования

Для анализа воспользуемся общим уравнением дальности связи, определяющим мощность сигнала на входе приемника $P_{с. вх}$ [4]:

$$P_{с. вх} = \frac{P_{изл} \cdot \gamma_E \cdot G \cdot S_3}{4\pi \cdot r^2},$$

где $P_{\text{изл}}$ – мощность сигнала, излучаемого передатчиком (обычно это средняя мощность); G – коэффициент направленного действия передающей антенны; S_3 – эффективная площадь приемной антенны; r – расстояние между передатчиком и приемником; γ_E – коэффициент, учитывающий потери энергии сигнала в среде распространения за счет поглощения.

Коэффициент потерь в инженерных методиках обычно выражают в следующем виде [4]:

$$\gamma_E \approx \exp(-0,23 \cdot \beta \cdot r),$$

где β – коэффициент затухания, дБ/км, определяющий потери из-за поглощения.

Коэффициент затухания акустических колебаний в морской среде зависит от ее физико-химических свойств и частоты и усредненно аппроксимируется следующим выражением [4]:

$$\beta \approx 0,036 \cdot f^{1,5},$$

где f – частота, выраженная в кГц.

На рис. 1 построена усреднённая кривая зависимости β от частоты (средняя). Из нее следует, что затухание акустических колебаний из-за поглощения энергии в морской среде на частоте 50 кГц почти в 32 раза больше, чем на частоте 5 кГц, следовательно, энергетически выгодными являются более низкие частоты.

Кроме кривой усредненного затухания, на рис. 1 показаны также кривые максимального (верхняя) и минимального (нижняя) затухания звука в океане [3].

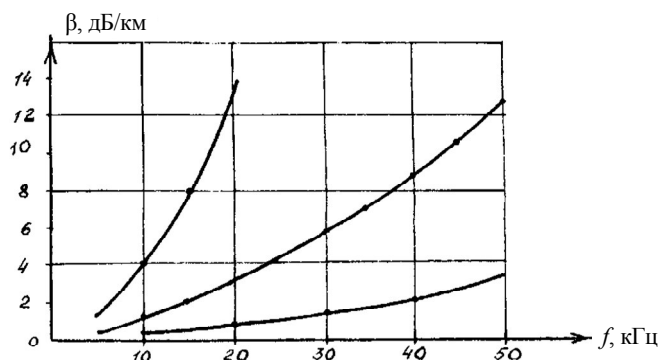


Рис. 1. Зависимость коэффициента затухания звука в океане от частоты

В задачах гидроакустической связи используется оценка оптимальной частоты при заданном уровне сигнала в точке приёма, как функция от дальности связи r в виде выражения [4, 5]:

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{62}{r^{2/3}}, \quad (1)$$

где $f_{\text{опт}}$ – частота сигнала, кГц; r – дальность, км.

В табл. 1 приведены значения оптимальной частоты гидроакустических сигналов, определенные согласно выражению (1) для линий связи разной протяженности.

Таблица 1

**Оптимальная частота гидроакустических сигналов
для линий связи разной протяженности**

Протяженность линии связи, км	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0
Оптимальная частота сигнала, кГц	98	62	47,3	39	29,8	24,6	21,2	18,8	16,9	15,5

При расчетах в инженерной практике коэффициент потерь удобно представлять в децибелах. Тогда

$$\gamma_E = \beta \cdot r.$$

Для наглядности на рис. 2 приведена номограмма зависимости $\gamma_E(r)$ для различных частот.

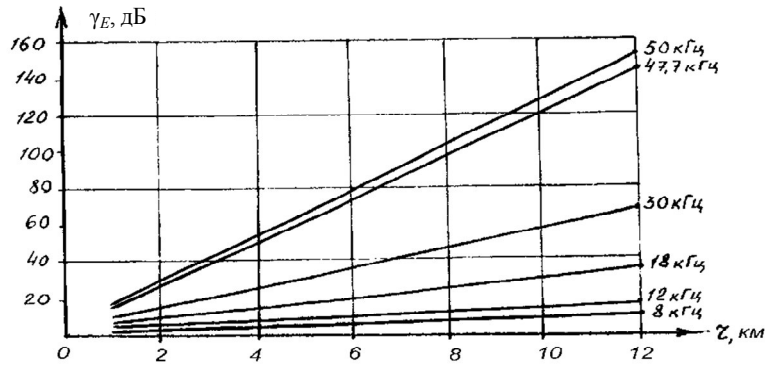


Рис. 2. Зависимость коэффициента потерь от расстояния

Другим важным критерием при выборе значения рабочей частоты гидроакустических систем передачи информации является обеспечение требуемой пропускной способности (скорости передачи информации). Последняя, как известно, пропорциональна полосе пропускания канала связи $\Delta f_{\text{пр}}$.

Для гидроакустического тракта величина $\Delta f_{\text{пр}}$ зависит от конструктивных особенностей используемых гидроакустических антенн и может быть связана со средней частотой f_0 антенны некоторым постоянным коэффициентом K , т. е. $\Delta f_{\text{пр}} = K \cdot f_0$. Для антенн резонансного типа полосу пропускания на уровне половинной мощности определяют с достаточной для практики точностью с помощью выражения

$$\Delta f_{\text{пр}} \approx \frac{f_0}{Q},$$

где Q – добротность антенны.

В принципе для заданной мощности излучения должно существовать некоторое оптимальное значение частоты, максимизирующее пропускную способность канала связи (C), – $f_{\text{опт}}(C)$. Вопросы оценки пропускной способности гидроакустического канала связи анализировались в [3]. Следует иметь в виду, что строгое определение $f_{\text{опт}}(C)$ возможно лишь при значительных ограничениях на характеристики гидроакустического канала связи.

Для любой системы передачи дискретных сообщений скорость передачи информации, бит/с, может быть определена следующим общим выражением:

$$R = V \cdot \log_2 m,$$

где $V \cdot \log_2 m$ характеризует предельное значение скорости передачи информации; V – скорость передачи символов длительностью τ_3 ; m – основание кода.

При передаче двоичным кодом ($m = 2$), бит/с,

$$R_{\text{max}} = V = 1/\tau_3.$$

Необходимая при этом полоса пропускания тракта передачи будет определяться видом модуляции, величиной допустимых искажений принимаемых элементов сигнала. Предельным случаем будем считать соотношение

$$\min(\Delta f_{\text{пр}}) \approx V.$$

При определении величины практической полосы пропускания сквозного гидроакустического тракта в целом и гидроакустических антенн в частности, необходимо предусмотреть запас с учетом возможного доплеровского смещения частоты, неизбежного разброса конструктивно-технологических параметров гидроакустических антенн и других дестабилизирующих факторов.

В [6] показано, что из-за действия эффекта Доплера смещение рабочей частоты f_0 достигало 10^{-3} от величины рабочей частоты, поэтому возможное смещение спектра частот принимаемого сигнала равно $2 \cdot f_d$, причем $2 \cdot f_d \approx 35$ Гц при $f_0 = 17,4$ кГц. Технологический разброс частотных характеристик гидроакустических антенн $\Delta f_{\text{АХЧ}}$ может составлять до 500–600 Гц [7].

Таким образом, при выборе конкретного типа антенны необходимо исходить из того, что полоса пропускания антенны $\Delta f_{\text{пр}}$ должна выбираться из условия

$$\Delta f_{\text{пр}} \geq 1/\tau_3 + 2f_d + \Delta f_{\text{АХЧ}}.$$

Можно считать целесообразным применение в разрабатываемой аппаратуре двоичных сигналов, передаваемых методом относительной фазовой модуляции со скоростью 200 Бод, что эквивалентно $\tau_3 = 5$ мс. Тогда

$$\Delta f_{\text{пр}} \geq \frac{1}{5 \cdot 10^{-3}} + 35 + 600 = 835 \text{ Гц}.$$

Следовательно, при выборе гидроакустических антенн следует исходить из того, что их полоса пропускания должна быть не менее 835 Гц.

Гидроакустические антенны в общем случае состоят из электроакустических преобразователей (элементов антенны), акустических экранов, несущей конструкции и линий электрокоммуникаций. Теория и методы расчета гидроакустических антенн описаны во многих работах, например в [7].

Непременным элементом любой гидроакустической антенны является гидроакустический преобразователь, предназначенный для излучения и приема акустических сигналов в водной среде. Преобразователи классифицируют по таким признакам, как *назначение* (излучатели, приемники и обратимые преобразователи); *принцип преобразования энергии* (пьезоэлектрические, магнитострикционные, электродинамические, электромагнитные, электростатические преобразователи); *структура колебательной системы* (стержневые, пластинчатые, цилиндрические, сферические); *конструктивное исполнение* (силовые и компенсированные).

Преобразователи-излучатели оцениваются рядом качественных показателей работы [8].

Одним из таких показателей является акустическая мощность P_a – количество звуковой энергии, излучаемой преобразователем в единицу времени.

Важным параметром, характеризующим эффективность антенны в режиме излучения, является удельная мощность $P_{a,y}$, равная отношению активной акустической мощности, излучаемой преобразователем, к площади его колеблющейся поверхности. Она называется также интенсивностью I с размерностью Вт/м. Эта величина имеет ограничение сверху, обусловленное либо прочностью (механической или электрической), либо кавитацией.

Чувствительность излучателя $v_{\text{и}}$, Па/В, оценивается по звуковому давлению P , создаваемому им в данной точке поля при единичном напряжении U :

$$v_{\text{и}} = \frac{P}{U}.$$

Точку измерения давления берут обычно в направлении максимума излучения, т. е. на акустической оси излучения, на расстоянии 1 м.

Электроакустический КПД $\eta_{\text{эа}}$ – отношение излучаемой акустической мощности к активной электрической мощности $P_{\text{э}}$, потребляемой преобразователем от генератора возбуждения.

Входное электрическое сопротивление z определяется отношением приложенного напряжения U к току I в цепи излучателя.

Сопротивление излучения в общем случае имеет активную и реактивную составляющие, которые называются соответственно активным R_a и реактивным X_a сопротивлениями излучения.

Характеристика направленности оценивает пространственное распределение поля и представляет собой зависимость создаваемого излучателем звукового давления в дальнем поле от угловых координат точки наблюдения, отнесенного к максимальному значению. Математическим выражением характеристики направленности излучения по двум плоскостям является отношение давлений:

$$R(\theta, \psi) = \frac{P(r, \theta, \psi)}{P_{\max}}$$

Графическим изображением $R(\theta, \psi)$ является диаграмма направленности.

Угловую избирательность преобразователя (антенны) принято оценивать углом $2 \cdot \theta_{0,7}$ раствора главного лепестка диаграммы направленности на уровне 0,707 от максимального излучения (по давлению) или на уровне 0,5 по мощности (–3 дБ).

Коэффициент концентрации K_0 определяется отношением интенсивности звука, создаваемого излучателем по направлению главного максимума в точке дальнего поля, к интенсивности звука ненаправленного излучателя с такой же излучаемой мощностью на том же расстоянии.

Преобразователи-приемники характеризуются следующими показателями работы.

1. Чувствительность γ определяет величину напряжения холостого хода на выходе преобразователя при воздействии на него в неискаженном свободном поле плоской волны звукового давления, равную 1 Па, имеет размерность В/(Па·м²). Чувствительность приемника является одним из его основных показателей.

2. Электрическое сопротивление z устанавливает соотношение между напряжением, развиваемым на выходе приемника, и током в его цепи.

3. Характеристика направленности приемника – нормированное по отношению к максимуму угловое распределение его чувствительности. Направленность определяется размерами и формой колеблющейся поверхности преобразователя, поэтому обратимый преобразователь имеет одинаковую направленность в режиме излучения и приема. Обычно рассматривают характеристику направленности для режима излучения.

4. Коэффициент концентрации K_0 – отношение квадрата чувствительности в максимальном направлении к среднему квадрату чувствительности во всех направлениях.

Для обратимых преобразователей коэффициенты концентрации в режиме излучения и приема численно равны.

По характеристикам направленности антенны могут быть ненаправленными (в одной плоскости или обеих) и направленными или пространственно избирательными. В известных гидроакустических средствах, выпускаемых промышленностью [9], опытных и экспериментальных, используются гидроакустические антенны, различающиеся по характеристикам направленности, конструктивным особенностям, сложности, габаритам и т. д. Для предлагаемой системы гидроакустической связи между автономной донной станцией и судном обеспечения характеристики направленности антенн в значительной степени будут определять энергетический потенциал линии связи, а следовательно, и дальность связи при жестком ограничении в энергопотреблении от автономных источников питания на донной станции. В свою очередь, энергопотребление аппаратуры при ограниченной емкости источника питания будет определять продолжительность автономной работы донных станций без подъема для замены источника питания (аккумуляторов, батарей).

Таким образом, в энергетическом отношении ненаправленные антенны являются невыгодными. Чем лучше направленные свойства передающей и приемной антенн, тем выше энергетический потенциал линии связи.

С другой стороны, с улучшением направленных свойств антенны будет уменьшаться ширина характеристики направленности и, следовательно, угол пространственного обзора. Уменьшение угла обзора будет сопровождаться уменьшением зоны связи на поверхности воды по отношению к точке постановки донной станции и соответствующим уменьшением дальности связи.

Из рассмотренного выше следует, что некоторые требования к гидроакустической антенне противоречивы, поэтому их нужно выбирать на основе компромисса, учитывая целевое назначение разрабатываемой аппаратуры.

Конкретный тип используемой антенны можно выбрать на основе энергетического расчета линии связи. Его задача – обеспечить надежную устойчивую работу системы связи с учетом влияния всех факторов и исключить излишние энергетические запасы, приводящие к необоснованному увеличению сложности передающей и приемной аппаратуры донной станции и судовой части. Энергетическими параметрами линии связи являются: мощность передатчика, коэффициенты усиления передающей и приемной антенн, а также чувствительность приемного тракта.

В качестве основных исходных данных при проектировании линий связи используют в общем случае нормы (требования) на качественные показатели каналов связи. Однако применительно к гидроакустическим линиям связи такая регламентация отсутствует. Для оценки качества линий связи используют различные критерии, зависящие от вида сообщений, метода их передачи. При цифровых методах передачи за критерий качества принимается частота ошибок, которая, в свою очередь, определяется отношением энергии элемента сигнала к спектральной плотности мощности шума (помехи) E/N на входе демодулятора приемника. При этом требуемое значение E/N зависит в первую очередь от вида модуляции и метода обработки цифрового сигнала. При энергетическом расчете линии связи оказывается удобным использовать отношение средней мощности модулированного сигнала на входе демодулятора к средней мощности шума. Необходимо иметь в виду, что в реальных условиях отношение сигнал/шум будет изменяться из-за влияния различных факторов, поэтому необходимо предусматривать некоторый запас по энергетике.

В результате энергетического расчета нужно получить выражение, позволяющее определять необходимую величину мощности передатчика по требуемому значению мощности сигнала на входе приемника, точнее, отношению сигнал/шум.

Система двухсторонней гидроакустической связи состоит из двух участков линии связи: донная станция – судно обеспечения (для передачи информации) и судно – донная станция (для передачи команд управления). В энергетическом смысле необходимо учитывать ограничения на мощность излучения гидроакустических донных автономных станций (ГДАС) из-за неизбежных ограничений на энергопотребление от автономных источников питания; на вес и габариты, а также на чувствительность приемного устройства сигналов управления.

Основными причинами потерь энергии гидроакустического сигнала с расстоянием являются расширение фронта волны, рассеяние и поглощение. Такие потери чаще всего оценивают с помощью удельного коэффициента пространственного затухания β , который является функцией частоты. На частотах более 5 кГц основной вклад в затухание вносит поглощение. На рис. 1 была приведена зависимость β от частоты акустического сигнала. Инженерная методика энергетического расчета линий связи приведена в работах [9, 10], в том числе и цифровой гидроакустической линии связи [9]. В общем случае эквивалентная акустическая мощность, Вт, может быть определена из выражения

$$P_{\text{изл}} = P_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{пер}},$$

где $P_{\text{пер}}$ – эффективная электрическая мощность сигнала на выходе передатчика, Вт; $G_{\text{пер}}$ – коэффициент усиления (излучения) передающей антенны (относительно изотропного излучателя); $\eta_{\text{пер}}$ – коэффициент передачи по мощности тракта согласования усилитель-антенна.

Мощность акустического сигнала на входе приемника, Вт:

$$P_{\text{пр}} = \frac{P_{\text{изл}}}{L_0} G_{\text{пр}},$$

где L_0 – полное затухание энергии сигнала в водной среде, определяемое уменьшением плотности потока его мощности при удалении от источника; $G_{\text{пр}}$ – коэффициент усиления приемной антенны.

Для расчета отношения сигнал/шум на входе приемника необходимо знать полную мощность шумов (помех) на входе приемных устройств судна и ГДАС, создаваемых различными источниками. Анализ и оценка различных составляющих помех в гидроакустических линиях связи показаны в [6].

В соответствии с уравнением дальности связи средняя мощность акустического сигнала на входе приемника, приходящаяся на единицу эффективной площади приемной антенны (средняя интенсивность сигнала) [9], Вт/м²,

$$I_{\text{с. вх}} = \frac{P_{\text{с. вх}}}{S_3} = P_{\text{изл}} \cdot \frac{G_{\text{пер}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \exp(-0,23 \cdot \beta \cdot r), \quad (2)$$

где S_3 – эффективная площадь приемной антенны.

Строгое определение полной мощности помех на входе приемника требует знания их статистических свойств, в частности их спектральной плотности. Для аддитивных помех, наиболее характерных для рассматриваемой системы гидроакустической связи, можно определить результирующую спектральную плотность помех на входе $N_{\Sigma}(f)$. Тогда полная мощность всех помех на входе приемника в полосе частот $\Delta f_{\text{пр}}$, занимаемой спектром сигнала (полосе пропускания канала связи), будет определяться выражением

$$P_{\text{ш. вх}} = \int_{\Delta f_{\text{пр}}} N_{\Sigma}(f) df .$$

Считаем среднюю спектральную плотность мощности помехи в полосе пропускания аппаратуры постоянной, тогда

$$P_{\text{ш. вх}} = N \cdot \Delta f_{\text{пр}} ,$$

а фактическое отношение мощности сигнала к мощности шума на входе приемника гидроакустической линии связи

$$h^2 = \left(\frac{P_c}{P_{\text{ш}} } \right)_{\text{вх}} = \left(\frac{I_c}{I_{\text{ш}} } \right)_{\text{вх}} = \frac{P_{\text{изл}} \frac{G_{\text{пер}} \cdot G_{\text{пр}}}{4 \cdot \pi \cdot r^2} \exp(-0,23 \cdot \beta \cdot r)}{N_{\Sigma} \cdot \Delta f_{\text{пр}}} , \quad (3)$$

где $G_{\text{пр}}$ учитывает направленные свойства приемной антенны по отношению к изотропным шумам моря и обусловленное этим ослабление шумов, приведенных к входу приемника, в $G_{\text{пр}}$ раз. Частично попытка энергетического расчёта была предпринята в [11], но там была допущена ошибка ([11], формула (7), β должна входить под знак экспоненты).

Ослабление уровня акустического сигнала из-за потерь при распространении наглядно можно представить, используя обозначения, принятые в уравнении гидролокации (см., например, [6]). Параметры представляют выраженными в децибелах уровнями, отнесенными к эталонной интенсивности плоской волны с давлением 1 мкПа: УИ – уровень излучения, определяющий акустическое поле в дБ на расстоянии 1 м в направлении акустической оси; ПН – показатель направленности в режиме приема; ПР – потери при распространении; УП – уровень приема, характеризующий уровень акустического поля (сигнала) от источника излучения в месте приема; УШ – уровень окружающих шумов.

Тогда

$$\text{УП} = \text{УИ} - \text{ПР} . \quad (4)$$

Благодаря направленности приемной антенны уровень шума на ее выходе будет равен:

$$\text{УШ} = \text{УИ} - \text{ПН} . \quad (5)$$

С учетом выражений (2) и (3) отношение сигнал/шум на выходе преобразователя

$$\text{СШ} = \text{УИ} - \text{ПР} - (\text{УШ} - \text{ПН}) . \quad (6)$$

Приведенные выше параметры определяются следующим образом [9]:

$$\text{УИ} = 10 \lg \frac{I_{\text{ист}}}{I_{\text{эт}}} , \quad (7)$$

где $I_{\text{ист}}$ – интенсивность источника на акустической оси на расстоянии 1 м от него; $I_{\text{эт}}$ – эталонная интенсивность, 1 мкПа.

$$\text{ПР} = 10 \cdot \lg \frac{I_c}{I_{c, \text{пр}}} ,$$

где I_c – интенсивность сигнала в 1 м от источника; $I_{c. пр}$ – интенсивность сигнала у приёмника.

Представление энергетических параметров гидроакустической системы связи в виде выражения (4) считаем полезным и удобным для проектирования гидроакустических линий с различными параметрами, т. к. они позволяют оценивать распределение уровней акустического сигнала вдоль линии связи.

С учетом приведенных выше соотношений получим

$$ПР = 10 \lg \left[\frac{1}{4\pi \cdot r^2} \exp(-0,23 \cdot \beta \cdot r) \right]. \quad (8)$$

Кривые зависимости $ПР = f(r)$ для нескольких значений частоты, рассчитанные по формуле (5), приведены на рис. 1.

Акустическая мощность излучения ненаправленного излучателя, как известно, Вт,

$$P_a = I_0 \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2.$$

Учитывая, что интенсивность источника определяется на расстоянии 1 м от него (т. е. $r = 1$ м), получим, Вт/м²:

$$I_0 = \frac{P_0}{4 \cdot \pi} = 0,0796 P_0.$$

Для направленной антенны интенсивность источника с учетом коэффициента осевой концентрации передающей антенны

$$I_a = I_0 \cdot K_0 = 0,0769 \cdot K_0 \cdot P_0.$$

Выразим интенсивность излучения источника через эффективную электрическую мощность, подводимую к антенне с выхода передатчика, с учетом КПД электроакустического преобразования:

$$P_a = P_{пер} \cdot \eta_{за}.$$

Для пьезокерамических преобразователей КПД принимают равным 0,6. Тогда интенсивность излучаемого сигнала в направлении акустической оси передающей антенны

$$I_a = 0,0769 \cdot K_0 \cdot P_{пер} = 0,0478 \cdot K_0 \cdot P_{пер}.$$

Требуемое звуковое давление P_c в плоскости приемной антенны определяется из условия обеспечения необходимого отношения сигнал/шум при заданном уровне акустических помех в соответствии с выражением

$$P_- = \frac{h \cdot K_{f_0} \cdot \Delta f_{пр}}{(f / f_0)^2 K_0}, \quad (9)$$

где $K_{f_0} = 0,1$ Па/Гц – удельное акустическое давление шума, приведенное к частоте $f_0 = 1$ кГц.

Требуемое отношение сигнал/шум h на входе приемного устройства должно выбираться из условия обеспечения заданного качества передачи сигналов. При использовании сигналов относительной фазовой модуляции необходимое качество передачи (вероятность ошибки не более 10^{-5} на символ) достигается при $h > 3$.

Напряжение сигнала на выходе приемной гидроакустической антенны (на входе приемника) будет равно произведению чувствительности антенны γ и акустического давления в ее плоскости P_c .

$$U_{вх} = \gamma \cdot P_c.$$

Требуемое акустическое давление при излучении на расстоянии 1 м от передающей антенны

$$P_{\text{изл}} = \frac{P_c \cdot r}{\sqrt{10^{-0,1\beta r}}}.$$

Электрическая мощность, которая должна быть подведена к передающей антенне,

$$P_э = \frac{P_{\text{изл}}}{\beta_a^2 \cdot R_a}.$$

На основании изложенного проведем выбор гидроакустических антенн для проектируемой аппаратуры группы автоматики корабельных систем (ГАКС).

Максимальная глубина постановки ГДАС может достигать 6000 м ($H_{\text{max}} = 6000$ м), при этом радиус зоны связи на поверхности относительно точки постановки ГДАС должен составлять не менее половины глубины постановки. Следовательно, максимальная протяженность линии связи

$$l_{\text{max}} = \sqrt{H_{\text{max}}^2 + \left(\frac{H_{\text{max}}}{2}\right)^2} \approx 6,7 \text{ км}.$$

В соответствии с формулой (1) оптимальное значение частоты для линии связи протяженностью 6,7 км

$$f_{\text{опт}} \approx \frac{62}{r^{2/3}} \approx 17,4 \text{ кГц}.$$

Ближайшими по рабочей частоте из серийно выпускаемых гидроакустических антенн являются:

- антенны 1D1, выпускаемые согласно техническим условиям ЛУ3.848.017;
- антенны акустические аппаратуры СКОЛ-2000Р, выпускаемые на основе технических условий СУЦ3.837.018.

Антенна 1D1 имеет рабочую частоту 11,6 кГц, что в 1,5 раза ниже требуемой, антенна СКОЛ-2000Р – 29,6 кГц, что в 1,7 раза выше требуемой.

Обе эти антенны не соответствуют необходимой оптимальной частоте: антенна 1D1 фактически является ненаправленной, антенна СКОЛ-2000Р аттестована для работ на глубинах до 3000 м, а глубина погружения донных станций может достигать 6000 м.

Вывод о возможности использования этих антенн в аппаратуре ГАКС может быть сделан на основе анализа энергетических показателей линии связи. Соответствующие показатели, рассчитанные по формулам (6)–(9), приведены в табл. 2.

Таблица 2

Энергетические показатели гидроакустической линии связи протяженностью $r = 6,7$ км, оборудованной антеннами 1D1 и СКОЛ-2000Р

Параметр	Значение	
	для 1D1	для СКОЛ-2000Р
P_c , Па	0,8	$9,9 \cdot 10^{-3}$
$U_{\text{вх}}$, мкВ	240	7,9
$P_{\text{изл}}$, Па	16055	5806
$P_{\text{изл}}$, Вт	1768	23,6

Как видно из табл. 2 (последняя строка), для обеспечения одинакового качества передачи цифровой информации мощность, подводимая к антенне 1D1, должна быть в 75 раз больше мощности, подводимой к антенне СКОЛ-2000Р.

Это позволяет сделать вывод о целесообразности использования в составе аппаратуры гидроакустических антенн СКОЛ-2000Р. Дополнительным доводом в пользу применения этих антенн являются результаты натурных испытаний макетов аппаратуры ГАКС. В процессе проведения испытаний осуществлялась передача цифровой информации через антенны СКОЛ-2000Р с глубины более 5300 м [3].

Заключение

По результатам исследований был проведен выбор гидроакустических антенн для проектируемой аппаратуры ГАКС. Согласно расчетам, одинаковое качество передачи цифровой информации обеспечивается при мощности, подводимой к антенне 1D1, в 75 раз большей мощности, подводимой к антенне СКОЛ-2000Р. Целесообразность использования гидроакустических антенн СКОЛ-2000Р подтверждена и результатами натурных испытаний макетов аппаратуры ГАКС, в ходе которых передача цифровой информации через антенны СКОЛ-2000Р осуществлялась с глубины более 5300 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тарасюк Ю. Ф. Гидроакустическое телеуправление. Л.: Судостроение, 1985. 200 с.
2. Матвиенко В. Н., Тарасюк Ю. Ф. Дальность действия гидроакустических средств. Л.: Судостроение, 1981. 205 с.
3. Разработка принципов и устройств передачи геофизической информации по гидроакустическому каналу связи: отчет / Новосибирск. электротехн. ин-т связи им. Н. Д. Псурцева: науч. рук.: Макаров А. А., Чиненков Л. А. Новосибирск, 1982. 76 с. N ГР 81019632. Инв. № 02830014986.
4. Урик Р. Д. Основы гидроакустики. Л.: Судостроение, 1978. 448 с.
5. Евтюнов А. П., Митько В. Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1981. 256 с.
6. Филиппов Б. И., Чернецкий Г. А. Анализ статистических характеристик сигналов и помех в гидроакустических каналах связи // Вестн. Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер.: Управление, вычислительная техника и информатика. 2015. № 3. С. 78–84.
7. Свердлин Г. М. Гидроакустические преобразователи и антенны. Л.: Судостроение, 1980. 232 с.
8. Евтюнов А. П., Колесников А. Е. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1982. 344 с.
9. Тикунов А. И. Рыбопоисковые и электронавигационные приборы. М.: Агропромиздат, 1985. 432 с.
10. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации: учеб. пособие для вузов. М.: Сов. радио, 1976. 368 с.
11. Криволапов Г. И., Криволапов Т. Г. О некоторых энергетических характеристиках гидрорелейной линии связи // Всерос. науч.-техн. конф. «Научное и техническое обеспечение исследований и освоение шельфа Северного Ледовитого океана». Новосибирск, 2010. С. 164–170.

Статья поступила в редакцию 18.09.2015,
в окончательном варианте – 9.12.2015

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Филиппов Борис Иванович – Россия, 630073, Новосибирск; Новосибирский государственный технический университет; канд. техн. наук, доцент; доцент кафедры защиты информации; filippov-boris@rambler.ru.



B. I. Filippov

ENERGY CALCULATION OF HYDROACOUSTIC COMMUNICATION LINES

Abstract. Energy calculation of hydroacoustic communication channel is divided into a number of interrelated steps: selection of the operating frequency of the link; choice of hydroacoustic antennas; determination of acoustic signal strength. When choosing the operating frequency of hydroacoustic communication systems, the frequency dependence of parameters of hydroacoustic signal should be taken into account. The operating frequency should be chosen from the two following conditions: obtaining the minimum emitted power and ensuring maximum throughput ceteris paribus. An important parameter, that characterizes the efficiency of the antenna in the emission mode, is a specific power, which is equal to the ratio of active acoustic power,

which is emitted by the transmitter to the area of its fluctuating surface. Features of antenna's directivities will largely determine the energy potential of the communication link and, therefore, the communication range with tight restrictions on energy consumption from independent power supply on the bottom station. In its turn, the power consumption of the equipment with limited power consumption of the power source will determine working duration of the autonomous bottom stations without lifting for a replacement of power sources (batteries, batteries). The higher the aimed properties of the transmitting and receiving antennas, the better energy potential of link. But with improved of antenna's directed properties, the width of the directional characteristics will decrease, and therefore, the angle of spatial viewing will also decrease, that will lead to decrease in communication zone on the water surface and corresponding decrease in the communication range. In this work the mass-produced hydroacoustic antennas 1D1 and SKOL-2000P were compared. The calculations showed that for the same quality of the transmission power of the digital information supplied to the antenna 1D1 should be in 75 times more than the power supplied to the antenna SKOL-2000P. This suggests the feasibility of using the antennas SKOL-2000P in the hydroacoustic communication systems.

Key words: hydroacoustic channel, hydroacoustic antenna, operating channel frequency, acoustic radiation power.

REFERENCES

1. Tarasiuk Iu. F. *Gidroakusticheskoe teleupravlenie* [Hydroacoustic distance control]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 200 p.
2. Matvienko V. N., Tarasiuk Iu. F. *Dal'nost' deistviia gidroakusticheskikh sredstv* [Range of hydroacoustic devices]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 204 p.
3. Razrabotka printsipov i ustroystv peredachi geofizicheskoi informatsii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi [Development of the principles and devices for geophysical data transmission on hydroacoustic communication channel]. Otchet. Novosibirskii elektrotekhnicheskii institut svyazi imeni N. D. Psurtseva: Nauchnye rukovoditeli: Makarov A. A., Chinenkov L. A. Novosibirsk, 1982. 76 p. N GR 81019632. Inv. № 02830014986.
4. Urik R. D. *Osnovy gidroakustiki* [Bases of hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1978. 448 p.
5. Evtiunov A. P., Mit'ko V. B. Primery inzhenernykh raschetov v gidroakustike [Examples of engineering calculations in hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 256 p.
6. Filippov B. I., Chernetskii G. I. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [Analysis of statistical characteristics of signals and distortions in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2015, no. 3, pp. 78–84.
7. Sverdlin G. M. *Gidroakusticheskie preobrazovateli i anteny* [Hydroacoustic transmitters and antennas]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1980. 232 p.
8. Evtiunov A. P., Kolesnikov A. E. i dr. *Spravochnik po gidroakustike* [Reference on hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 344 p.
9. Tikunov A. I. *Ryboposkovye i elektronavigatsionnye pribory* [Fish-searching and power navigation equipment]. Moscow, Agroromizdat, 1985. 432 p.
10. Penin P. I. *Sistemy peredachi tsifrovoi informatsii* [Systems of digital information transmission]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 368 p.
11. Krivolapov G. I., Krivolapov T. G. O nekotorykh energeticheskikh kharakteristikakh gidroreleinoi linii svyazi [On some power characteristics of flow switching communication channel]. *Vserossiiskaia nauchno-tekhnicheskaiia konferentsiia «Nauchnoe i tekhnicheskoe obespechenie issledovaniia i osvoenie shel'fa Severnogo Ledovitogo okeana»*. Novosibirsk, 2010. P. 164–170.

The article submitted to the editors 18.09.2015,
in the final version – 9.12.2015

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Filippov Boris Ivanovich – Russia, 630073, Novosibirsk; Novosibirsk State Technical University; Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor; Assistant Professor of the Department of Information Protection; filippov-boris@rambler.ru.

