

УДК 621.391.26

ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ В ГИДРОАКУСТИЧЕСКОМ КАНАЛЕ

А.И. МАКАРОВ, В.Д. ДВОРНИКОВ, В.К. КОНОПЕЛЬКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 19 ноября 2003

Приведены результаты экспериментальных исследований по поглощению акустических волн в море и особенностям их распространения в различных гидрологических условиях. Рассмотрены природа возникновения и спектральный состав шумов и помех, влияющих на качество передачи информации в гидроакустическом канале. Изложены особенности эффекта Доплера в гидроакустике. На основе приведенных данных сформулированы требования к аппаратуре гидроакустической связи для обеспечения надежной передачи информации в различных гидрологических условиях.

Ключевые слова: помехоустойчивая передача информации, гидроакустический канал.

Введение

Интенсивное освоение мирового океана, в том числе разведка и добыча полезных ископаемых со дна морей, хозяйственная деятельность по выращиванию водорослей и морских животных, различные военно-морские задачи нуждаются в надежной передаче цифровой информации между подводными и надводными объектами. Зачастую единственным каналом, по которому возможна передача информации в этих условиях, является гидроакустический канал, так как морская вода интенсивно поглощает электромагнитные волны практически во всех диапазонах частот, включая оптический.

Вопросы повышения помехоустойчивости передачи информации при помощи разнообразных кодовых конструкций и эффективные методы использования этих конструкций в различных системах связи исследованы довольно подробно [1]. Также довольно детально исследованы вопросы формирования и вторичной обработки сигналов на базе низкоскоростных кодовых конструкций, наиболее привлекательных для применения в системах связи, работающих в гидроакустическом канале [2]. Некоторые вопросы первичной обработки широкополосных сигналов, прошедших через гидроакустический канал, также изучались и получены результаты, позволяющие создавать эффективные устройства для работы в таких каналах связи [3].

Доскональный анализ особенностей распространения акустических волн под водой, их поглощения и рассеяния, в сочетании с исследованием свойств акустических шумов и помех в море позволит синтезировать новые, наиболее эффективные именно для гидроакустического канала кодовые конструкции. Их применение, в свою очередь, даст возможность повысить надежность и достоверность передачи цифровой информации в этом канале.

Поглощение звука в море

Интенсивность (мощность, звуковое давление) акустической волны, распространяющейся в водной среде, убывает при удалении от источника сигнала. Это убывание обусловлено расширением фронта волны и ее поглощением и рассеянием. Убывание интенсивности акустической волны из-за расхождения волнового фронта происходит по степенному закону и в однородной бесконечной среде пропорционально квадрату расстояния от источника излучения. Поглощение и рассеяние акустической волны обусловлено переходом части звуковой энергии в тепловую энергию при преодолении вязкости воды в процессе ее деформации и в энергию химических релаксационных процессов (распад и воссоединение ионов некоторых солей и кислот), происходящих в морской воде. Убывание интенсивности акустической волны из-за поглощения и рассеяния части ее энергии происходит по экспоненциальному закону.

Если интенсивность акустической волны на единичном расстоянии от источника в однородной среде без поглощения и рассеяния обозначить I_0 , то ее интенсивность на некотором расстоянии, с учетом поглощения и рассеяния равна

$$I(r) = \frac{I_0}{r^2} e^{-br}, \quad (1)$$

где r — расстояние между источником и приемником; b — коэффициент пространственного затухания. Потеря интенсивности акустической волны в зависимости от расстояния, выраженная в децибелах, составляет

$$\dot{I} = 10 \lg [I_0 / I(r)] = 20 \lg(r) + 10 \lg(e^{br}) = 20 \lg(r) + \alpha r / 10^{-3}. \quad (2)$$

Первое слагаемое в формуле (2) это классические потери при сферическом распространении волны, а второе слагаемое – пространственное затухание.

Как правило, коэффициент пространственного затухания выражают в децибелах на километр α (дБ/км) = $10 b \lg(e) / 10^{-3}$, где e — основание натурального логарифма. Он сложным образом зависит от частоты акустической волны; на его величину оказывает влияние много факторов, таких, как температура, кислотность и химический состав морской воды. В результате проведенных в начале 60-х годов теоретических и экспериментальных исследований было показано, что коэффициент пространственного затухания на частотах менее 100 кГц в морской воде выше, чем в пресной, в 2,5–3 раза вследствие химических релаксационных процессов, происходящих с солями сульфата магния $MgSO_4$ и ионами борной кислоты $B(OH)_3$. Полуэмпирическая формула для коэффициента пространственного затухания, предложенная в 1965 г. Торпом [4], довольно точно описывает эту зависимость для инженерных приложений:

$$\alpha = \frac{40f^2}{(4100 + f^2)} + \frac{0.1f^2}{(1 + f^2)}, \quad (3)$$

где f — частота акустического колебания в килогерцах. Первое слагаемое этой формулы соответствует релаксации $MgSO_4$, а второе — $B(OH)_3$.

В начале 80-х годов было показано [5], что в общее затухание также вносит заметный вклад релаксация карбоната магния $MgCO_3$, присутствующая в морской воде, и формула Торпа была уточнена:

$$\alpha = \frac{40f^2}{(4100 + f^2)} + \frac{0.1f^2}{(1 + f^2)} + \frac{0.03f^2}{(36 + f^2)}. \quad (4)$$

Константы в формулах (3) и (4) справедливы при температуре воды $T=4^\circ C$ и ее кислотности $pH=8.0$. Зависимость α от этих параметров воды незначительна. Для примера на рис. 1 и 2 приведены графики зависимости коэффициента пространственного затухания от

частоты для двух различных регионов, полученные расчетным путем с учетом влияния температуры и кислотности воды, и результаты экспериментальных измерений [5].

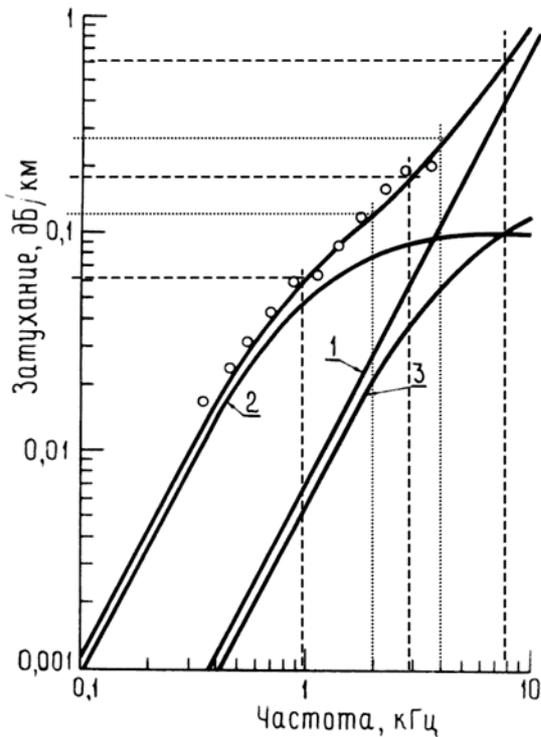


Рис. 1. Результаты экспериментов в Северной Атлантике при температуре воды $T=4\text{C}^0$ и кислотности $\text{pH}=8,0$

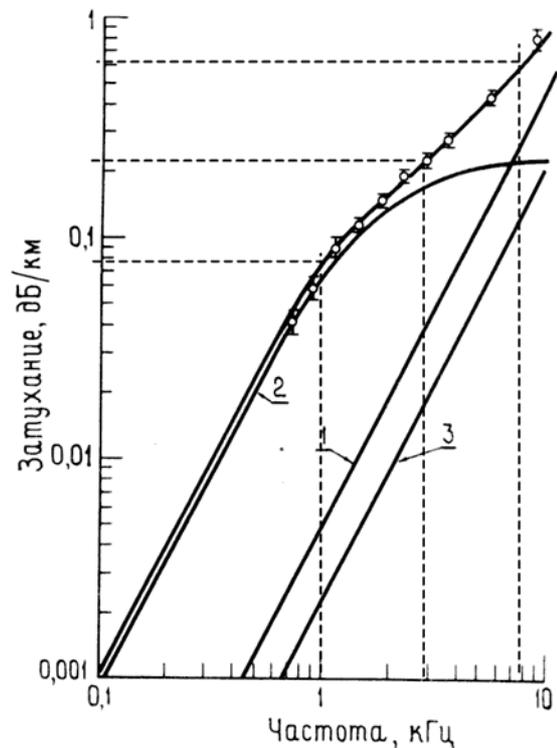


Рис. 2. Результаты экспериментов в Красном море при температуре воды $T=22\text{C}^0$ и кислотности $\text{pH}=8,2$

На этих рисунках цифрами обозначены графики коэффициента затухания, обусловленные релаксацией соответственно: 1 — MgSO_4 , 2 — V(OH)_3 и 3 — MgCO_3 . Кружочками обозначены результаты экспериментальных измерений при использовании тональных сигналов. Из графиков видно довольно хорошее совпадение экспериментальных результатов с теоретическими расчетами. Поведение графиков при частотах от 10 до 100 кГц определяется в основном релаксацией MgSO_4 , и линейно возрастает примерно от 1 до 15–18 дБ/км с ростом частоты. Более высокие частоты не используются в гидроакустических системах связи из-за большого коэффициента затухания.

Анализ графиков коэффициента затухания и формулы (2) позволяет сделать два важных для разработки аппаратуры гидроакустической связи выводы. Первый вывод заключается в том, что для увеличения дальности связи необходимо уменьшать среднюю частоту сигнала. Как видно из вышеприведенных рисунков, из-за поглощения и рассеяния сигнал с частотой 1 кГц через 100 км затухает примерно на 6–7 дБ, а сигналы с частотами 3 и 8 кГц на такой же дистанции затухают соответственно примерно на 20 и на 60 дБ. Итерационно решая (2), относительно дальности можно показать, что если сигнал с частотой 1 кГц на расстоянии от 10 м от источника звука до 100 км затухает на 86 дБ, то сигналы с частотами 3 и 8 кГц имеют такое же затухание на расстояниях 57 и 29 км соответственно. В реальных условиях, когда проявляются волноводные свойства гидроакустического канала и распространение акустической волны происходит не сферически, а в плоскости морской среды (иногда такое распространение волны называют цилиндрическим), потери распространения уменьшаются и стремятся к $10\lg(r)$ в первом слагаемом формулы (2). В этом случае итерационное решение (2) приводит к следующим ре-

зультатам: сигналы с частотами 1, 3 и 8 кГц имеют одинаковое затухание 86 дБ на расстояниях 350, 127 и 49 км соответственно.

Второй вывод заключается в том, что относительно широкополосный сигнал претерпевает значительные частотные искажения при прохождении через морскую среду. Как видно из рис. 1, у сигнала со средней частотой 3 кГц и шириной спектра примерно 2 кГц высокочастотные составляющие спектра имеют коэффициент пространственного затухания примерно на 0,16 дБ/км больше, чем низкочастотные составляющие. В результате этого высокочастотные составляющие в таком сигнале будут ослаблены на 16 дБ больше, чем низкочастотные составляющие, при прохождении им дистанции в 100 км.

Реальная морская среда имеет границы с атмосферой и с донной поверхностью. Отражение акустической волны от этих поверхностей также приводит к потерям ее интенсивности.

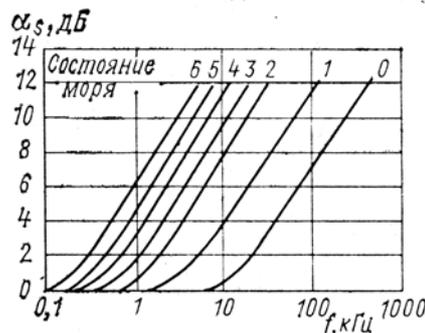


Рис. 3. Потери при отражении акустической волны от морской поверхности в зависимости от ее состояния по восьмибальной шкале

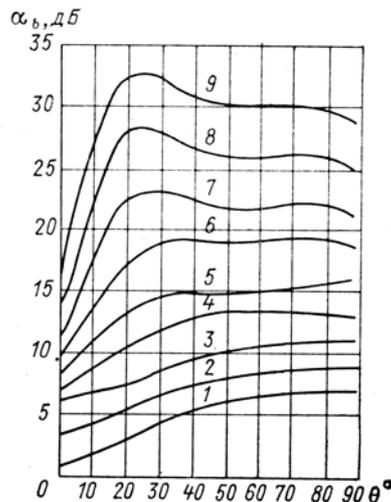


Рис. 4. Потери при отражении акустической волны от морского дна в зависимости от типа грунта на частоте 1кГц

Вследствие большой разницы в акустических импедансах морской воды и воздуха отражение акустической волны от их границы происходит без потерь при любых углах падения, если поверхность моря спокойная, без волнения. К сожалению, такая ситуация встречается нечасто. Неровная поверхность моря, ее непрерывное изменение во времени приводят к потере интенсивности отраженной волны. Использование сложных математических моделей отражения акустической волны от случайной неровной поверхности и статистических характеристик морской поверхности позволило получить оценки этих потерь. На рис. 3 приведены графики, отображающие оценку величины потерь при отражении от поверхности в зависимости от волнения моря и частоты звукового сигнала из [6]. Эти потери тем больше, чем выше высота волн

на морской поверхности и частота акустического сигнала. С ростом частоты потери возрастают примерно на 2,5 дБ на октаву в широком диапазоне частот и волнений поверхности моря.

Акустические импедансы у морской воды и донных осадков отличаются существенно меньше, чем у морской воды и воздуха. К тому же состав донных осадков в различных районах мирового океана чрезвычайно разнообразен и они, как правило, имеют слоистую структуру, поэтому процесс отражения акустической волны от дна значительно сложнее. Часть акустической волны, отразившись от внутренних слоев осадков, интерферирует между собой и с той частью волны, которая отразилась от внешнего слоя. Это приводит к изменению как амплитуды, так и фазы отраженного сигнала: коэффициент отражения носит комплексный характер и зависит как от угла падения акустической волны, так и от ее частоты. Вычислительный центр метеорологической службы ВМС США классифицирует девять типов морского дна. Для общего представления о характере поведения и величине потерь при отражении акустической волны от морского дна на рис. 4 приведены графики зависимости величины потерь для этих типов морского дна для частоты 1 кГц в зависимости от угла падения акустической волны из [6]. Минимальные потери имеет песчаное дно, ему присвоен номер один по этой классификации. С ростом частоты потери возрастают примерно на 2,5 дБ на октаву в широком диапазоне частот для всех типов грунта так же, как и при отражении от поверхности моря. При этом зависимость потерь от угла падения акустической волны практически сохраняется.

Таким образом, широкополосный акустический сигнал при отражении от границ моря существенно теряет свою интенсивность и подвергается частотным искажениям.

Многолучевой характер распространения сигналов

Изменения температуры, солености и давления морской воды зависят от региона, времени суток, поры года, глубины и приводят к изменению скорости звука в ней и, как следствие, к искривлению траекторий акустических лучей, к их рефракции. Эти изменения скорости звука носят регулярный характер и поддаются более или менее точному прогнозированию. Наличие в морской среде газовых пузырьков, планктона, различных спонтанных подводных течений также приводит к изменению скорости звука в ней и к дополнительным потерям энергии акустической волны. Эти факторы практически не прогнозируются и носят нерегулярный характер. В целом, скорость звука в морской воде изменяется от 1440 до 1520 м/с. Максимальный перепад скорости составляет примерно 5 %.

Соленость воды в океанах и прилегающих морях отличается незначительно и не зависит от глубины, поэтому практически не влияет на рефракцию акустических волн, однако в устьях рек и в районах таяния льдов это влияние может быть значительным.

С увеличением глубины повышается давление и повышается скорость звука в морской воде. Зависимость скорости звука от давления невелика, однако эта зависимость играет большую роль в рефракции акустических волн.

Скорость звука в море наиболее чувствительна к изменениям температуры и увеличивается с повышением температуры. Температура морской поверхности изменяется примерно от 30⁰С в тропических широтах до температуры, близкой к нулю в высоких широтах Арктики и Антарктики. С увеличением глубины температура воды понижается до значений, близких к нулю, и далее не изменяется. В тропических широтах, это происходит на глубинах около 1000 м, а на более высоких широтах – на меньших глубинах. В тропических широтах, на глубинах от 300 до 1000 м температура воды всегда понижается вне зависимости от времени года или погодных условий. Это так называемый главный или основной термоклин. В более высоких широтах на глубине около 300 м температура воды уже близка к нулю, поэтому основной термоклин отсутствует, но на глубинах от 100 до 300 м в летнее время, когда солнце дает больше тепла, наблюдается сезонный термоклин. В тропических широтах этот термоклин наряду с основным присутствует всегда, так как летняя и зимняя температуры отличаются мало. На малых глубинах, до 100 м, на температуру воды влияют не только сезонные, но и суточные изменения температуры, а также погода. В спокойную погоду температура верхнего слоя толщиной до 10 метров изменяется в течение суток. В штормовую погоду вода в верхнем слое перемешивается,

температура выравнивается и образуется изотермический слой, который может сохраняться длительное время из-за большой теплоемкости воды.

Регулярные неоднородности температуры и давления в морской воде, приводящие изменению скорости звука по глубине, являются наиболее важными при анализе характеристик аппаратуры гидроакустической связи. На рис. 5 приведены типичные профили скорости звука по глубине.

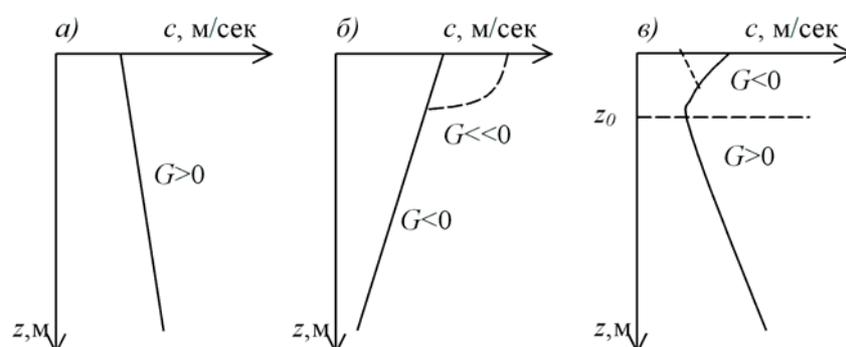


Рис. 5. Типичные распределения скорости звука по глубине в различных гидрологических условиях

На рис. 5,а приведен профиль скорости звука, характерный для высоких широт в зимнее время года, когда температура воды близка к нулю и не зависит от глубины. Скорость звука зависит только от давления и повышается с увеличением глубины. Градиент скорости звука $G = dc/dz$ в этих условиях положительный и равен примерно $0,0017 \text{ с}^{-1}$ от поверхности до дна. Такой же профиль скорости звука характерен и для приповерхностных слоев во время или после шторма, когда вода в приповерхностном слое перемешивается, и он становится изотермическим.

На рис. 5,б приведен профиль скорости звука, характерный для мелких морей в летнее время года, когда основной или сезонный термоклин простирается до дна. Градиент скорости звука в этих условиях отрицательный и может достигать больших отрицательных значений, до $G = -0,2 \text{ с}^{-1}$ и более. В некоторых прибрежных морях в узком приповерхностном слое воды в летнее время появляются водоросли, планктон, пузырьки воздуха и т.д. Это приводит к очень резкому увеличению градиента скорости звука, к его скачку, достигающему величины $G = -10-15 \text{ с}^{-1}$, как показано пунктиром на рис. 5,б.

На рис. 5,в приведен профиль скорости звука, характерный для условий, когда на малых глубинах превалирует влияние основного или сезонного термоклина, а на больших глубинах — давление. В этом случае на некоторой глубине z_0 наблюдается минимум скорости звука. В тропических широтах этот минимум в глубоких морях наблюдается всегда, расположен на глубинах 700–1200 м и не зависит от времени года. В умеренных и высоких широтах этот минимум с увеличением широты поднимается до глубин 50–80 м и наблюдается только в весенне-летний период, когда есть сезонный термоклин. В приповерхностном слое во время и после шторма возможно образование изотермического слоя, который приводит к появлению участка с положительным градиентом, как показано пунктиром на рис. 5,в.

Акустическая волна, проходя через толщу воды с положительным градиентом скорости звука, отклоняется вверх. На рис. 6 показано, как при наличии изотермического слоя акустическая волна, многократно отражаясь, распространяется в приповерхностном слое. Если поверхность моря спокойная и частота колебания не очень высокая, то отражения от поверхности происходят практически без потерь и сигнал распространяется не по сферическому закону, как в однородном изотропном пространстве, а по цилиндрическому закону на довольно большие расстояния. Такой акустический канал называется приповерхностным подводным звуковым каналом (ППЗК). Траектория движения волны в нем представляет собой дуги окружности радиуса R , опирающиеся на поверхность моря, причем существует некоторый предельный, максимальный угол θ_m между направлением излучения волны и горизонталью, в пределах которо-

го она еще не преломляется ко дну. При углах излучения, больших, чем предельный, волна уходит ко дну и там поглощается и, возможно, отражается. При этом, как видно из рис. 6, существует зона тени, куда прямая волна вообще не может попасть. В эту зону могут попасть только отраженные от дна, сильно ослабленные лучи. Как показано в [7], радиус окружности, по дуге которой распространяется сигнал, равен

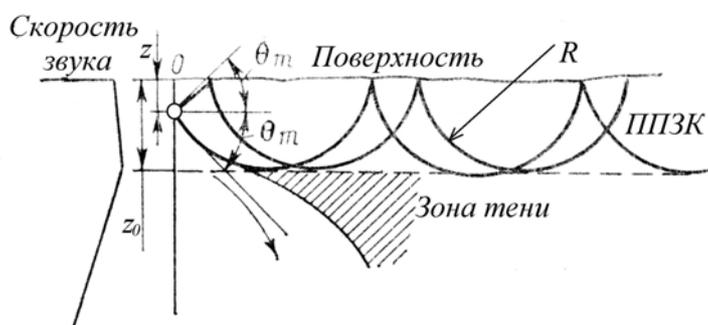


Рис. 6. Распространение акустической волны в изотермическом слое

$$R = c_0 / G, \quad (5)$$

где c_0 — скорость звука на глубине z_0 , а предельный угол, выраженный в радианах,

$$\theta_m \approx \sqrt{2z/R}, \quad (6)$$

где z — глубина погружения передающей антенны.

Расчеты по формулам (5) и (6) для типичного градиента скорости звука в изотермическом слое $G=0,017\text{с}^{-1}$, скорости звука $c_0=1500\text{ м/с}$ и $z=100\text{ м}$, показывают, что $R \approx 88\text{ км}$, $\theta_m \approx 2^\circ$, а расстояние между соседними отражениями от поверхности примерно равно 9 км. При меньшей глубине изотермического слоя, естественно, уменьшается это расстояние и предельный угол, т.е. увеличивается количество отражений от поверхности, приходящееся на единицу расстояния между передатчиком и приемником.

Очевидно, что в точку приема акустическая волна может прийти по нескольким траекториям или лучам, причем каждый луч будет отражаться от своих участков поверхности моря. Под действием ветра эти поверхности довольно быстро изменяют свои отражающие свойства, они могут двигаться, придавая доплеровское смещение частоте отраженного колебания. Таким образом, акустическая волна в ППЗК распространяется по цилиндрическому закону на десятки километров по нескольким лучам, причем интенсивность и начальная фаза волны в этих лучах довольно быстро изменяются (интервал корреляции этих процессов измеряется десятками миллисекунд), а частота может иметь доплеровское смещение, даже при неподвижном приемнике и передатчике. Временная задержка в приходе волны по различным лучам также не постоянна, но незначительна (не более нескольких миллисекунд), поэтому они интерферируют между собой, что приводит к нестационарным во времени, селективным частотным искажениям широкополосных сигналов.

Акустическая волна, проходя через толщу воды с отрицательным градиентом скорости звука, отклоняется вниз, как показано на рис. 7. Если дно плотное и вносит малые потери в отраженный сигнал, то возможно многократное отражение от дна и образование звукового канала в придонной области. Траектория движения волны в нем также представляет собой дуги окружности радиуса R , но уже опирающиеся на дно моря, причем существует некоторый предельный, максимальный угол θ_m между направлением излучения волны и горизонталью, в пределах которого она еще не касается поверхности моря. Расчет этих величин также производится по формулам (5) и (6), только градиент берется со знаком минус [7]. При углах излучения, больших, чем предельный, волна отражается от поверхности под острым углом и уходит

ко дну. Количество отражений, приходящихся на единицу расстояния, резко возрастает, а это приводит к росту потерь. Как видно из рис. 7, существует зона тени, куда прямая волна вообще не может попасть. В эту зону могут попасть только отраженные от дна, сильно ослабленные лучи.

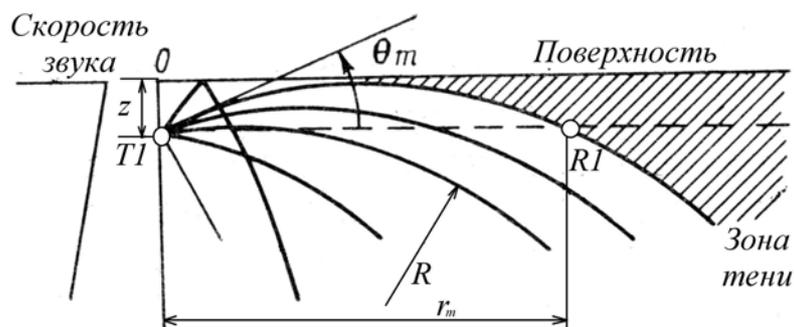


Рис. 7. Распространение акустической волны в слое воды с отрицательным градиентом

Расчеты по формулам (5) и (6) для градиента скорости звука $G = -0,2 \text{ с}^{-1}$ в термоклин, скорости звука $c_0 = 1500 \text{ м/с}$ и $z = 100 \text{ м}$ показывают, что радиус дуги окружности $R = 7,5 \text{ км}$, т.е. более чем в десять раз меньше, чем в ППЗК, $\theta_m \approx 10^\circ$, а максимальное расстояние между соседними отражениями от поверхности примерно равно $r_m = 2,5 \text{ км}$ при расположении передатчика у дна на глубине z , как показано на рис. 7. Наличие скачка градиента скорости у поверхности, как показано на рис. 5, приводит к еще большему отклонению акустической волны ко дну и сокращает дальность работы гидроакустической аппаратуры в 2–3 раза.

Как правило, потери при отражении от дна велики и интенсивность сигнала в отраженном луче значительно меньше, чем в прямом. Поэтому акустическая волна в условиях отрицательного градиента скорости звука распространяется на очень малые расстояния, не более нескольких километров, как правило, по одному лучу, причем ее интенсивность и начальная фаза стабильны.

В глубоком море при наличии минимума в профиле скорости звука и при расположении передатчика $T1$ у поверхности моря, как показано на рис. 8, акустическая волна распространяется по сложной траектории, напоминающей синусоиду, причем экстремумы этой траектории находятся на глубинах с одинаковой скоростью звука. Если приемник $R1$ также располагается у поверхности моря, то он сможет принять луч, не претерпевший отражений от дна и поверхности только в тех зонах, где этот луч поднимается к поверхности моря. Эти зоны называются зонами конвергенции. На остальных участках приемник будет принимать только ослабленные при отражении от дна и от поверхности лучи. В средних и высоких широтах расстояние между зонами конвергенции колеблется от 60 до 100 км, а протяженность этих зон составляет 5–10 % от дистанции до передатчика. Как правило, наблюдается не более трех зон конвергенции, причем интенсивность сигнала в них на 10–15 дБ выше, чем в промежутках между ними. В экваториальных широтах зоны конвергенции не наблюдаются, потому что из-за влияния мощного термоклина скорость звука у дна всегда значительно ниже, чем в верхних слоях даже глубокого моря.

При увеличении глубины погружения антенны передатчика вертикальная амплитуда траектории движения лучей уменьшается и при достижении антенной глубины с минимальной скоростью звука эта амплитуда также становится минимальной. Если передатчик $T2$ и приемник $R2$ расположить на глубине с минимальной скоростью звука z_0 , то длина траектории движения лучей будет минимальной, а характер распространения волны – цилиндрический. Поэтому будет также минимальным затухание волны, вызванное поглощением и рассеянием. Таким образом, на глубине с минимальной скоростью звука образуется подводный звуковой канал (ПЗК), обладающий свойствами акустического волновода. Иногда его называют глубоководным подводным звуковым каналом в отличие от приповерхностного звукового канала (ППЗК).

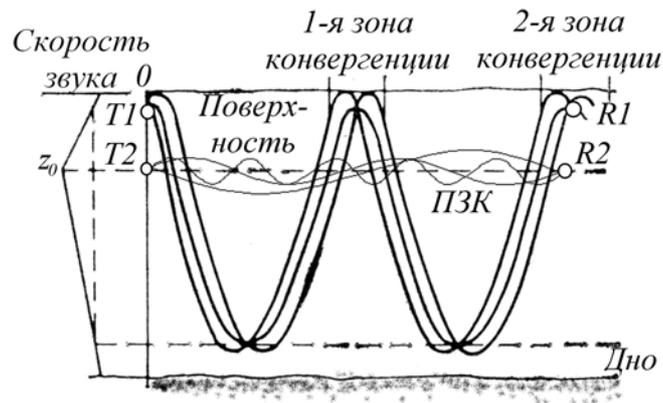


Рис. 8. Распространение акустической волны при наличии минимума в профиле скорости звука

Как при работе в зонах конвергенции, так и при работе в ПЗК сигнал в точку приема может прийти по различным траекториям, причем, в отличие от ППЗК, характеристики этих траекторий довольно стабильны, и медленно изменяются в течение суток и сезонов года вследствие изменений температуры различных слоев воды. Следует также отметить, что в верхних слоях моря наблюдается незначительное, в доли градуса, но довольно быстрое, хаотическое изменение температуры отдельных, небольших объемов воды. Это изменение температурной микроструктуры верхних слоев приводит к изменению условий рефракции акустической волны в них [8]. В результате интенсивность отдельных лучей непрерывно изменяется. Как показывают измерения в реальных условиях, эти флуктуации незначительны и не превышают 3 дБ для зон конвергенции. В ПЗК эти флуктуации, естественно меньше.

Таким образом, акустическая волна в зоны конвергенции и в ПЗК распространяется по цилиндрическому закону на сотни километров по нескольким лучам, причем интенсивность и начальная фаза волны в этих лучах довольно стабильны (интервал корреляции этих процессов превышает несколько секунд). Временная задержка в приходе волны по различным лучам также изменяется довольно медленно, но может достигать сотен миллисекунд. Интерференция лучей между собой приводит к стабильным селективным частотным искажениям широкополосных сигналов.

Акустические шумы и помехи в море

Дальность действия аппаратуры гидроакустической связи определяется не только уровнем сигнала на входе приемника, но и уровнем акустических шумов и помех. В правильно спроектированной аппаратуре собственными электрическими шумами можно пренебречь.

Сейсмические возмущения морского дна, ветровые возмущения поверхности моря и тепловое движение молекул воды являются главным источником естественного шума в море. В прибрежных водах и в гаванях в общий уровень шума большой вклад вносят биологические источники, такие, как щелкающие креветки, дельфины и другие виды морских млекопитающих и рыб. На рис. 9 приведен типичный спектр окружающего естественного акустического шума в глубоком море в зависимости от состояния морской поверхности, приведенный в [6]. По вертикальной оси на этом рисунке отложена интенсивность акустического шума в децибелах относительно интенсивности звука в один микропаскаль на один герц полосы частот.

Для удобства анализа весь частотный спектр можно разбить на три диапазона. В первом, низкочастотном диапазоне, простирающемся до нескольких сотен герц, спектральная плотность шумов наибольшая и определяется в основном так называемым отдаленным судоходством. Корабли создают шумы в широком диапазоне частот. В связи с тем что низкочастотные колебания этого диапазона имеют малые потери как при распространении, так и при отражении от границ водной среды, они распространяются под водой на большие расстояния, на сотни миль. По этой же причине, интенсивность низкочастотных шумов в горизонтальном направлении гораздо выше (на 12 и более децибел), чем в вертикальном направлении. Шумы отдаленного судоходства имеют широкий спектральный максимум в области 30Гц и после 100Гц

быстро спадают. Уровень этого максимума может изменяться на 10 и более децибел и зависит от географического положения, времени года, торговой активности в регионе и т. п. В последние годы эта составляющая шума постоянно растет [9].

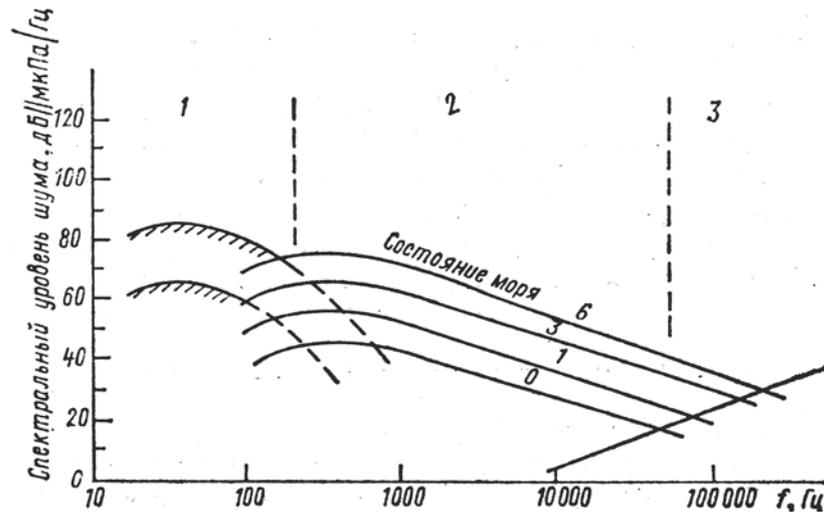


Рис. 9. Типичный спектр естественных шумов глубокого моря в зависимости от его состояния в баллах

Во втором, среднечастотном диапазоне, простирающемся от нескольких сотен герц до десятков килогерц, спектральная плотность шумов определяется в основном силой ветра. Морская поверхность под воздействием ветра волнуется и создает шум, распространяющийся в толщу воды. Вследствие этого интенсивность шума в вертикальном направлении несколько выше, чем в горизонтальном. Этот шум имеет широкий спектральный максимум в области 500 Гц и уменьшается на более высоких частотах примерно на 5 дБ на октаву. Зависимость уровня шума, создаваемого ветром от его скорости, впервые была исследована в конце 40-х годов В.О. Кнудсеном [10]. Семейство характеристик, изображенных на рис. 9 в среднечастотном диапазоне, часто называют "кривыми Кнудсена".

В высокочастотном диапазоне, простирающемся выше 50 кГц, преобладают шумы, вызванные тепловым движением молекул воды. Спектральная плотность этих шумов с ростом частоты возрастает примерно на 6 дБ на октаву и изотропна в пространстве.

Анализ спектра естественных шумов в море показывает, что для повышения надежности передачи информации на малых дистанциях, когда потери поглощения и рассеяния еще невелики, необходимо повышать среднюю частоту сигналов. Уровень шумов в диапазоне 3 кГц примерно на 15 дБ выше, чем в диапазоне 25 кГц, широко используемом для голосовой связи между аквалангистами.

Основной искусственной составляющей акустического шума являются шумы и помехи техногенного характера, генерируемые кораблями, подводными лодками, бурильными и нефтедобывающими платформами и другими аппаратами, находящимися и работающими в море. Всего различают более двух десятков источников искусственного акустического шума [11]. Они отличаются как уровнями, так и спектральным распределением интенсивности. Кавитация на поверхности быстро вращающегося винта создает в основном широкополосный шум, который охватывает по частоте несколько октав или даже декад. Вращающиеся детали машин создают помеху в виде набора тональных составляющих, которые могут быть модулированы как по амплитуде, так и по частоте. Удары волн о различные препятствия и детали машин с возвратно-поступательным движением и создают преимущественно импульсную помеху. Если это движение имеет постоянную частоту повторения, то в его спектре наблюдаются гармоники этой частоты. Наличие 100 и более гармоник в таком спектре не является необычным.

Например, типичное торговое судно при движении в океане излучает примерно 30 Вт акустической мощности. Подводная лодка, идущая на большой скорости под водой, излучает не более нескольких ватт. Подводная лодка, идущая на малом ходу в режиме пониженной шумности, создает акустический шум мощностью менее 10 мВт.

На рис. 10 в качестве примера приведена осциллограмма импульсной акустической помехи, возникающей в результате ударов морской волны о борт дрейфующего корабля. Здесь длительность временной развертки составляет примерно полторы минуты. Приемная антенна погружена на глубину около 25 м, все механизмы корабля остановлены, волнение моря составляет примерно 5 баллов по восьмибальной шкале.

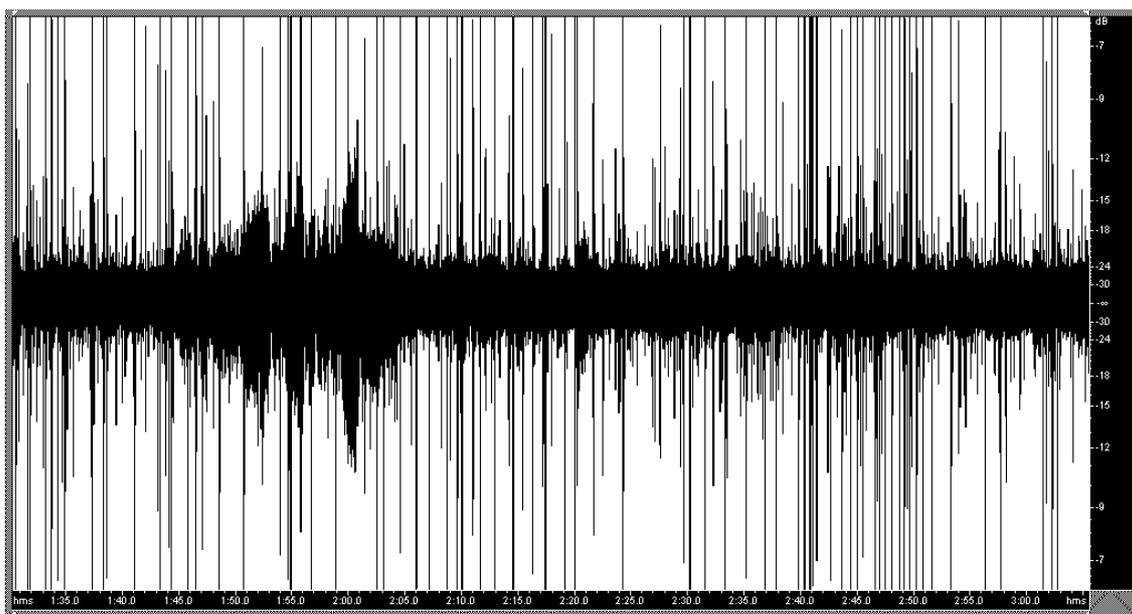


Рис. 10. Импульсная помеха, возникающая при ударах волны о борт корабля

На рис. 11 в качестве другого примера приведен спектр помех, создаваемых работающими механизмами корабля, проходящего недалеко от приемной акустической антенны. В спектре четко наблюдается полезный сигнал в диапазоне 5–8 кГц на фоне большого числа спектральных составляющих, обусловленных работой возвратно-поступательных механизмов корабля, имеющих частоту повторения примерно 120 Гц. На этом рисунке также видно, что сигнал в диапазоне до 2 кГц ослаблен входным фильтром верхних частот.

Очевидно, что при разработке аппаратуры гидроакустической связи необходимо предусматривать меры для борьбы с мощными как импульсными, так и тональными помехами.

Кроме естественных аддитивных шумов и помех техногенного характера, при приеме акустических сигналов можно наблюдать также и мультипликативные помехи как естественного, так и искусственного происхождения. Явление многолучевого распространения и случайные изменения интенсивности, начальной фазы и частоты акустического колебания, вызванные особенностями распространения звука в морской среде, можно рассматривать как мультипликативные помехи естественного характера.

Эти же явления, вызванные движением или просто нестабильным положением приемной и передающей антенн в пространстве, носят искусственный, техногенный характер. Гидроакустические антенны, применяемые в аппаратуре связи, имеют, как правило, несферическую диаграмму направленности. Поэтому изменение их пространственной ориентации приводит к изменению интенсивности принимаемого сигнала. Длина волны сигналов, используемых в аппаратуре гидроакустической связи, невелика. Например, длина волны акустического сигнала с частотой 4,2 кГц равна 36 см, поэтому даже незначительные изменения положения приемной и передающей антенн друг относительно друга приводят к существенным изменениям началь-

ной фазы принимаемых колебаний. Интервал корреляции флуктуаций фазы зависит от водоизмещения кораблей, скорости их хода и от погодных условий.

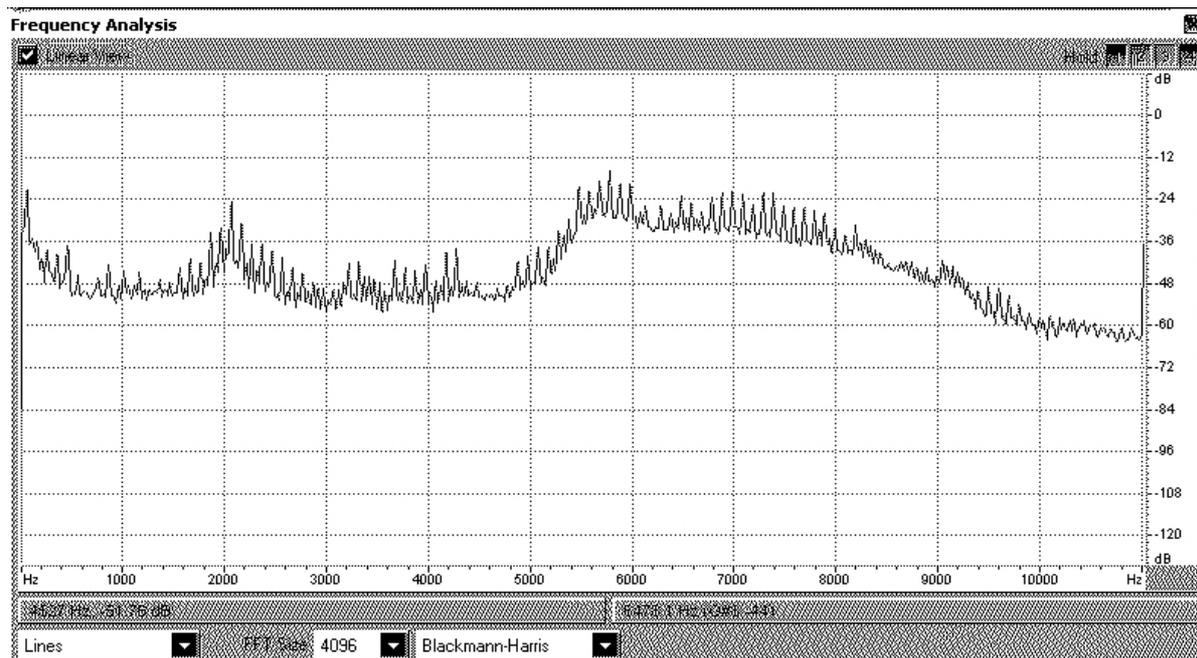


Рис. 11. Спектр тональных помех, генерируемых механизмами корабля

Мультипликативные техногенные помехи особенно сильно проявляются при работе аппаратуры гидроакустической связи на надводных кораблях при беспокойном море и в движении, когда практически невозможно стабилизировать пространственное положение антенн. На подводных лодках, находящихся в погруженном состоянии, влияние этих помех значительно меньше, так как уже на глубинах в несколько десятков метров даже шторм практически не влияет на пространственное положение лодки. На рис. 12 приведены графики поведения фазы принятого тонального сигнала частотой 4,2 кГц при передаче его с корабля на корабль (тонкая линия) и с подводной лодки на лодку (жирная линия) относительно фазы опорного тонального сигнала той же частоты при дрейфе. В обоих случаях волнение моря 3–4 балла, расстояние между приемной и передающей антеннами примерно 2 км, глубина погружения антенн с кораблей и глубина погружения подводных лодок примерно 25 м.

Для представления о влиянии флуктуаций фазы на работу приемника аппаратуры гидроакустической связи рассмотрим результаты оценки энергии, получающиеся при когерентном накоплении при помощи коррелятора или согласованного фильтра, для тонального сигнала, флуктуации фазы которого изображены на рис. 12. При когерентном накоплении принятого кораблем сигнала на интервале от первой до третьей секунды следует ожидать результата, близкого к истинному, так как его фаза на этом интервале изменяется незначительно, не более чем на 30 градусов. Однако при таком же накоплении сигнала на интервале от четвертой до шестой секунды, оценка энергии будет близка к нулю, так как на этом интервале фаза сигнала практически линейно изменяется от -180 до $+180$ градусов. Очевидно, что когерентное накопление сигнала, передаваемого между подводными лодками, на интервале в две и более секунд позволит получить практически точные оценки энергии.

Таким образом, при разработке систем гидроакустической связи необходимо учитывать, что мультипликативные помехи естественного и техногенного происхождения ограничивают интервал когерентности сигналов, принимаемых аппаратурой.

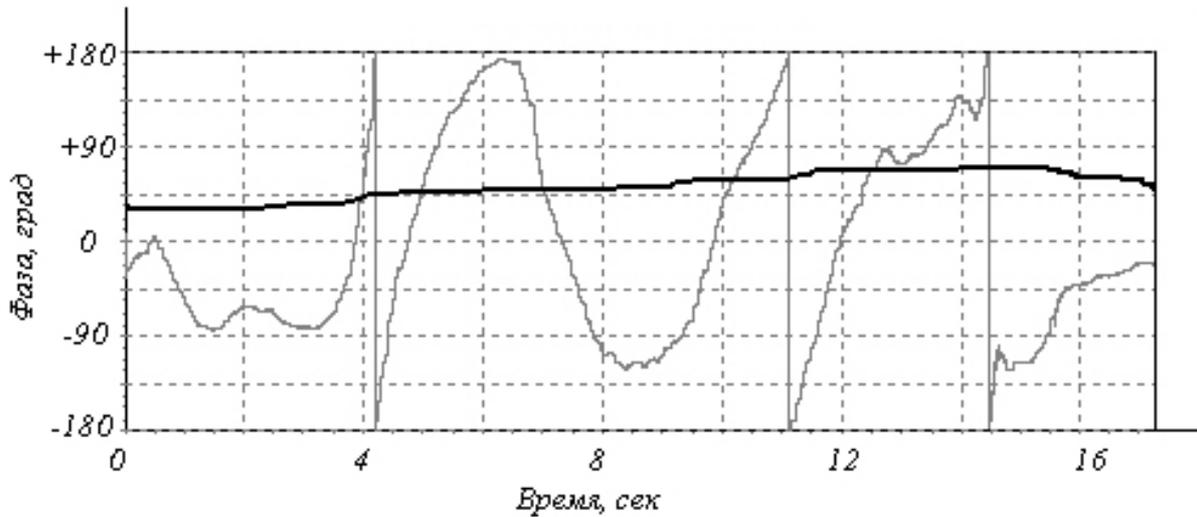


Рис. 12. Флуктуации фазы тонального сигнала, вызванные нестабильным положением приемной и передающей антенн на бортах надводных кораблей (тонкая линия) и подводных лодок (жирная линия)

Эффект Доплера в гидроакустике

При движении как источника акустических волн, так и их приемника происходит изменение частоты колебаний, регистрируемых приемником. Легко показать [12], что частота акустического колебания, регистрируемая приемником,

$$f = f_0 \frac{1 + \frac{v_r \cos \vartheta_r}{c}}{1 + \frac{v_t \cos \vartheta_t}{c}}, \quad (7)$$

где f_0 — частота акустического колебания, излучаемая передатчиком; c — скорость звука в воде; v_r и v_t — модули вектора скорости соответственно приемника и передатчика; ϑ_r и ϑ_t — углы между вектором, соединяющим приемник и передатчик в процессе движения, и векторами движения соответственно приемника и передатчика, как показано на рис. 13.

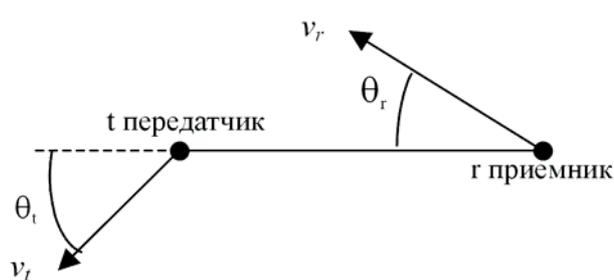


Рис. 13. Векторы движения приемника и передатчика для определения доплеровского смещения частоты

В этом случае доплеровское смещение частоты составит

$$\Delta f = f - f_0 = f_0 \left(\frac{1 + \frac{v_r \cos \vartheta_r}{c}}{1 + \frac{v_t \cos \vartheta_t}{c}} - 1 \right). \quad (8)$$

Если числитель и знаменатель (7) умножить на $\left(1 - \frac{v_t \cos \vartheta_t}{c}\right)$, произвести несложные преобразования и пренебречь слагаемыми второго порядка в числителе и знаменателе, то

$$f = f_0 \frac{1 + \frac{v_r \cos \vartheta_r}{c} - \frac{v_t \cos \vartheta_t}{c} - \frac{v_r v_t \cos \vartheta_r \cos \vartheta_t}{c^2}}{1 - \left(\frac{v_t \cos \vartheta_t}{c}\right)^2} \approx f_0 \left(1 + \frac{v_r \cos \vartheta_r - v_t \cos \vartheta_t}{c}\right). \quad (9)$$

Приближенное значение доплеровского смещения частоты

$$\Delta f = f - f_0 = f_0 \frac{v_r \cos \vartheta_r - v_t \cos \vartheta_t}{c}. \quad (10)$$

Приближенное выражение (10) широко используется как при анализе распространения акустических волн, так и радиоволн, хотя точные выражения в этих случаях несколько различаются. Если скорости движения реальных объектов, как правило, значительно меньше скорости света и приближенная формула (10) довольно точно описывает доплеровское смещение частоты радиоволн, то этого нельзя сказать по отношению к акустическим волнам.

Пусть передатчик неподвижен относительно воды и излучает акустический сигнал частотой 1 кГц, а приемник движется навстречу ему со скоростью 40 узлов (скорости движения современных атомных подводных лодок могут достигать и больших значений). Доплеровское смещение частоты, рассчитанное как по точной (8), так и по приближенной (10) формуле, в этом случае, составит 13,70 Гц. Если же приемник неподвижен, а передатчик движется навстречу ему со скоростью 40 узлов, то расчет по точной формуле дает 13,89 Гц, а по приближенной — 13,70 Гц. Ошибка вычислений доплеровского смещения частоты по приближенной формуле, в некоторых случаях, может оказаться существенной. В рассмотренном примере она превышает 1 %.

В системах гидроакустической связи тактовая частота формирования сигналов сравнима с их несущей частотой, в отличие от аппаратуры радиосвязи, где она, как правило, значительно меньше несущей. Тактовая частота подвержена доплеровским изменениям в той же мере, что и несущая частота. Это приводит к тому, что при взаимном движении приемника и передатчика акустических сигналов происходит существенное изменение не только несущего колебания, но и длительности сигналов на приемной стороне. Поэтому необходимо отслеживать эти изменения для обеспечения надежной передачи информации по гидроакустическому каналу.

Выводы

Гидроакустический канал нестационарен по своей природе, его передаточная характеристика подвержена изменениям во времени и зависит от множества факторов, как естественного происхождения, так и техногенного характера. Совокупность факторов, зависящих от свойств дна и поверхности, а также от скорости звука и коэффициента его пространственного затухания, и определяет, в конечном итоге, характеристики распространения акустических сигналов в морской среде.

Таким образом, анализ особенностей распространения акустических волн в морской воде при передаче информации показывает, что:

для увеличения дальности связи необходимо уменьшать среднюю частоту сигнала; относительно широкополосный сигнал претерпевает значительные частотные искажения при прохождении через морскую среду;

широкополосный акустический сигнал при отражении от границ моря существенно теряет свою интенсивность и подвергается частотным искажениям;

акустическая волна в приповерхностном подводном звуковом канале распространяется по цилиндрическому закону на десятки километров по нескольким лучам, причем интенсивность и начальная фаза волны в этих лучах довольно быстро изменяются (интервал корреляции этих процессов измеряется десятками миллисекунд), а частота может иметь доплеровское смещение, даже при неподвижном приемнике и передатчике. Временная задержка в приходе волны по различным лучам также не постоянна, но незначительна (не более нескольких миллисекунд), поэтому они интерферируют между собой, что приводит к нестационарным во времени, селективным частотным искажениям широкополосных сигналов;

акустическая волна в условиях отрицательного градиента скорости звука распространяется на очень малые расстояния, не более нескольких километров, как правило, по одному лучу, причем ее интенсивность и начальная фаза стабильны;

акустическая волна в зоны конвергенции и в подводном звуковом канале распространяется по цилиндрическому закону на сотни километров по нескольким лучам, причем интенсивность и начальная фаза волны в этих лучах довольно стабильны (интервал корреляции этих процессов превышает несколько секунд). Временная задержка в приходе волны по различным лучам также изменяется довольно медленно, но может достигать сотен миллисекунд. Интерференция лучей между собой приводит к стабильным селективным частотным искажениям широкополосных сигналов;

для повышения надежности передачи информации на малых дистанциях, когда потери поглощения и рассеяния еще невелики, необходимо повышать среднюю частоту сигналов;

при разработке аппаратуры гидроакустической связи необходимо предусматривать меры для борьбы с мощными как импульсными, так и тональными помехами;

при разработке аппаратуры гидроакустической связи необходимо учитывать, что мультипликативные помехи естественного и техногенного происхождения ограничивают интервал когерентности сигналов, принимаемых аппаратурой;

ошибка вычислений доплеровского смещения частоты по приближенной формуле, в некоторых случаях, может оказаться существенной;

при взаимном движении приемника и передатчика акустических сигналов, происходит существенное изменение не только несущего колебания, но и длительности сигналов на приемной стороне.

INFORMATION COMMUNICATIONS IN HYDROACOUSTIC CHANNEL

A.I. MAKAROV, V.D. DVORNIKOV, V.K. KONOPELKO

Abstract

The results of experimental research of acoustic waves absorption in the sea and their delivery features at different hydrological conditions are presented.

Литература

1. Конопелько В.К., Липницкий В.А. Теория норм синдромов и перестановочное декодирование помехоустойчивых кодов. Мн.: БГУИР, 2000. 242 с.
2. Дворников В.Д., Конопелько В.К., Липницкий В.А. Теория и практика низкоскоростных кодов. Мн., БГУИР. 2002. 210 с.
3. Макаров А.И. Квазикогерентный приём сигналов в каналах с дискретной многолучевостью // Изв. вузов, Радиоэлектроника. Киев, 1988, Т. 31, № 8, С. 61–63.

4. *Thorp W.H.* Deep Sound Attenuation in the Sub and Low Kilocycle per-second Range // *J. Acoust. Soc. Am.*, 1965. Vol. 38, P. 648–654.
5. *Меллен Р.* Химическое поглощение звука в море. Сб. Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ./ Под ред. Л. Бьёрнё. М.: Мир, 1985. 488 с.
6. *Бурдик В.С.* Анализ гидроакустических систем. Пер. с англ. Л.: Судостроение, 1988. 392 с.
7. *Свердлин М.С.* Прикладная гидроакустика. М.: Судостроение, 1976. 280 с.
8. *Бьёрнё Л.* Неоднородности и нестабильность распространения звука под водой. Сб. Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Л. Бьёрнё. М.: Мир, 1985. 488 с.
9. *Браунинг Д.Дж., Фон Винкль У.А.* Уровни собственных шумов океана. В сборнике Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Л. Бьёрнё. М.: Мир, 1985.- 488 с., ил.
10. *Knudsen V.O., Alford R.S., Emling J.W.* Underwater Ambient Noise // *J. Mar. Res.* 1948. Vol. 7. P. 410.
11. *Росс Д.* Шумы: источники, излучение и ослабление. Сб. Подводная акустика и обработка сигналов: Пер. с англ. / Под ред. Л. Бьёрнё. М.: Мир, 1985. 488 с.
12. *Яворский Б.М., Детлаф А.А.* Справочник по физике: 2-е изд. М.: Наука, 1985. 512 с.