

Способ передачи дискретных сообщений в гидроакустическом канале

В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов

Предложен способ передачи формулярных сообщений, в котором излучаемые гидроакустические сигналы содержат маскируемую шумом информационную часть и акустическую окраску, близкую по акустическому восприятию к возможным естественным шумам морской среды известной акватории.

Ключевые слова: структура и обработка сигналов, техническая реализация способа, достоверность приёма.

1. Введение

Предлагаемый способ может использоваться в гидроакустических информационно-управляющих сетях [1] на участках гидрорелейных линий связи для передачи формулярных сообщений с ограниченными объёмами (от нескольких десятков до нескольких сотен) информационных символов.

В публикациях [2], [3] рассмотрен способ гидроакустического поиска необитаемых подводных объектов, в основе которого лежат следующие основополагающие принципы:

- для передачи сигналов управления в гидроакустическом канале между поисковым судном и подводным объектом используются импульсные фрагменты сонограмм записей звуков морских животных, рыб и ракообразных с заданными амплитудными, временными и частотными параметрами, схожими по акустическому восприятию с возможными естественными шумами морской среды известной акватории;

- гармонический навигационный сигнал в процессе поиска подводного объекта маскируется квазибелым шумом, близким по акустическому восприятию к возможному фоновому шуму мелкого или глубокого моря, а обработка навигационного сигнала на поисковом судне осуществляется с использованием процедуры синфазирования – обеспечения синфазности двух гармонических сигналов, имеющих существенно разные отношения сигнал/шум;

- информационный обмен между объектами взаимодействия «поисковое судно – подводный объект» организуется на основе асинхронного режима приёма-передачи сеансовых сигналов поискового судна и автономного подводного объекта с необходимым различием в условиях преимущественно флуктуационных шумов морской среды акватории поиска.

Трансформируя указанные выше принципы построения комбинированной навигационно-информационной системы на чисто информационную систему, можно сформулировать признаки предлагаемого способа передачи формулярных сообщений в гидроакустическом канале:

- излучаемые сеансовые гидроакустические сигналы содержат в необходимом соотношении маскируемую информационную часть и акустическую окраску, в совокупности обеспечивающие достаточное приближение сигналов по акустическому восприятию к возможным естественным шумам морской среды известной акватории;

- акустическая окраска создаётся фрагментами сонограмм записей звуков морских животных, рыб и ракообразных, размещаемых в соответствующих местах сеансовых сигналов;

– информационная часть излучаемых гидроакустических сигналов с выбранным видом модуляции маскируется квазибелым шумом, близким по акустическому восприятию к возможному фоновому шуму мелкого или глубокого моря;

– асинхронный приём сигналов информационной части осуществляется с использованием стартстопного режима и процедуры синфазирования сигналов с разными отношениями сигнал/шум.

Информационную часть излучаемых сеансовых гидроакустических сигналов целесообразно создавать, используя бинарные фазоманипулированные (БФМ) сигналы [4], удовлетворяющие указанным выше признакам и отвечающие необходимым требованиям по формированию, обработке и помехоустойчивости приёма.

Структурные требования, предъявляемые к излучаемым в водную среду сигналам при передаче сообщений, во многом схожи с требованиями к сигналам при осуществлении гидроакустического поиска необитаемых подводных объектов [2], [3].

2. Структура излучаемых сигналов

Для повышения скрытности передачи сообщений к излучаемому в водную среду известной морской акватории сеансовому сигналу предъявляются следующие базовые структурные требования:

– общая структура сигнала должна обеспечивать возможность осуществления асинхронного приёма его информационной части с использованием стартстопного режима;

– длительность акустической окраски сигнала должна обеспечивать его достаточное приближение к возможному естественному акустическому фону морской среды;

– превышение сигнала информационной части над фоновыми шумами морской среды должно быть достаточным для его приёма с необходимой достоверностью;

– соотношение амплитудных параметров информационного сигнала и маскирующего его квазибелого шума должно обеспечивать достаточную акустическую маскировку под возможные фоновые шумы известной морской акватории;

– соотношение частотных параметров информационного сигнала и квазибелого маскирующего шума должно обеспечивать требуемую достоверность приёма замаскированного информационного сигнала при его соответствующей цифровой обработке;

– используемые для акустической окраски сигнала фрагменты сонограмм записей звуков морских животных, рыб и ракообразных должны обладать слабо выраженным импульсным характером для исключения ложных стартов при стартстопном режиме приёма.

Сформированный для излучения в водную среду сеансовый сигнал $y(t)$ в общем случае содержит в полосе частот ΔF_y шесть составляющих (рис. 1) и имеет вид:

$$\begin{aligned} y(t) &= a(t_1) + c(t_2) + x(t_3) + n(t_3) + d(t_4) + b(t_5) = \\ &= U_a a(t_1) + U_c c(t_2) + U_x \cos \{2\pi f_0 t_3 + [1 + \mu(t_3)] \frac{\pi}{2}\} + \\ &+ \sigma_n n(t_3) + U_d d(t_4) + U_b b(t_5); \quad U_c, U_d > U_a, U_b, \sigma_n; \quad U_x \ll \sigma_n; \\ t_1 &\in [\tau_1 \dots \tau_2]; \quad t_2 \in [\tau_3 \dots \tau_4]; \quad t_3 \in [\tau_5 \dots \tau_6]; \quad t_4 \in [\tau_7 \dots \tau_8]; \\ t_5 &\in [\tau_9 \dots \tau_{10}]; \quad \Delta \tau_1 = \tau_2 - \tau_1; \quad \Delta \tau_2 = \tau_4 - \tau_3; \quad \Delta \tau_3 = \tau_6 - \tau_5; \\ \Delta \tau_4 &= \tau_8 - \tau_7; \quad \Delta \tau_5 = \tau_{10} - \tau_9; \quad \Delta \tau_2, \Delta \tau_4 \ll \Delta \tau_1, \Delta \tau_3, \Delta \tau_5, \end{aligned} \quad (1)$$

где $a(t_1)$ – первый сигнал акустической окраски; $c(t_2)$ – стартовый сигнал приёма; $x(t_3)$ – информационный БФМ-сигнал; $n(t_3)$ – маскирующий информационный сигнал квазибелый шум; $d(t_4)$ – стоповый сигнал приёма; $b(t_5)$ – второй сигнал акустической окраски; f_0 – несущая частота колебаний БФМ-сигнала; $\mu(t_3)$ – функция, принимающая значения -1 или 1,

повторяющая изменения информационного бинарного сигнала; U_c – амплитуда стартового сигнала приёма; U_a – средняя амплитуда первого сигнала акустической окраски; U_x – амплитуда колебаний БФМ-сигнала; U_d – амплитуда стопового сигнала приёма; U_b – средняя амплитуда второго сигнала акустической окраски; $\Delta\tau_1$ – длительность первого сигнала акустической окраски; $\Delta\tau_2$ – длительность стартового сигнала приёма; $\Delta\tau_3$ – длительность информационного БФМ-сигнала; $\Delta\tau_4$ – длительность стопового сигнала приёма; $\Delta\tau_5$ – длительность второго сигнала акустической окраски; σ_n – среднеквадратическое отклонение квази-белого шума, маскирующего информационную часть сеансового сигнала.

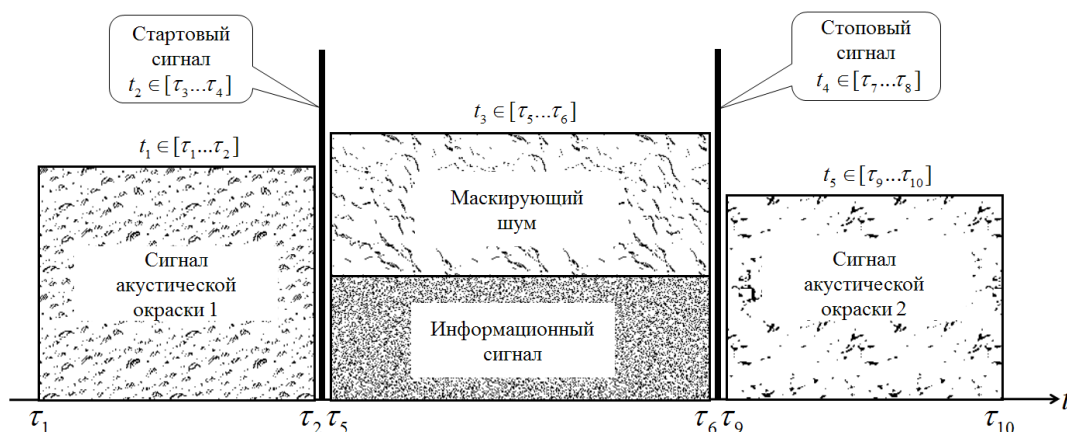


Рис. 1. Общая структура стилизованного сеансового сигнала

На рис. 2 в качестве примера показана осциллограмма излучаемого сеансового сигнала, в котором в качестве сигналов акустической окраски использованы звуки морских львов и морских котиков, стартовый и стоповый сигналы приёма сформированы на основе звуков ракообразных, а информационная часть сигнала замаскирована шумами глубокого моря.

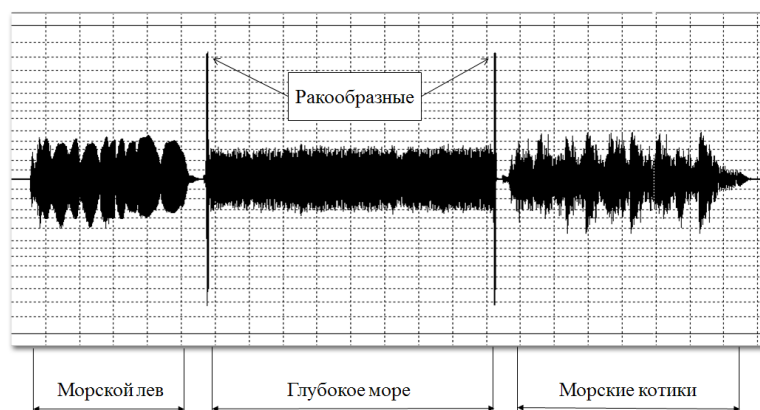


Рис. 2. Пример возможной структуры сеансового сигнала

3. Обработка принимаемых сигналов

Аналитическая запись сеансового сигнала $y(t)$ (1), принятого широкополосным гидрофоном, после линейного усиления приобретает следующую форму:

$$z(t) = g\{U_a a(t_1) + U_c c(t_2) + U_x \cos\{2\pi f_0 t_3 + [1 + \mu(t_3)] \frac{\pi}{2} + \varphi_B\} + \sigma_n n(t_3) + U_d d(t_4) + U_b b(t_5)\} + \sigma_\xi \xi(t); \quad U_x \gg \sigma_\xi; \quad \sigma_\xi \ll \sigma_n, \quad (2)$$

где g – коэффициент, усреднённый по частотному диапазону ΔF_y излучаемого сигнала $y(t)$, обусловленный затуханием акустических колебаний в водной среде известной акватории, передаточными характеристиками приёмного гидрофона и его линейного усилителя; φ_B – фазовый сдвиг колебаний БФМ-сигнала, вносимый водной средой распространения сигнала, приёмным гидрофоном и его линейным усилителем; $\xi(t)$ – фоновый флуктуационный шум водной акватории в месте приёма; σ_ξ – среднеквадратическое отклонение фонового шума.

В публикациях [2], [3] приведены частотные диапазоны пригодных для использования возможных фоновых акустических шумов морской среды:

- фрагменты сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных имеют преобладающий частотный диапазон колебаний от 100 Гц до 8 кГц;

- фрагменты сонограмм записей шумов мелкого моря обладают преимущественно частотным диапазоном колебаний от 20 Гц до 20 кГц;

- во фрагментах сонограмм записей шумов глубокого моря превалирует частотный диапазон колебаний от 500 Гц до 20 кГц.

Будем считать, что при формировании БФМ-сигналов информационной части сеансового сигнала используются несущие частоты, находящиеся в частотном диапазоне 25 – 35 кГц, наиболее распространённом для передачи различного рода сообщений в гидроакустическом канале. Следовательно, для системы передачи сообщений, использующей маскировку под фоновые акустические шумы морской среды, значения частот в полосе маскирующего шума информационной части излучаемого сеансового сигнала будут меньше величины несущей БФМ-сигнала, а полосы пропускания передающего и приёмного оборудования системы должны быть не меньше значений несущих частот из указанного частотного диапазона для передачи и приёма всех составляющих сеансового сигнала.

Кроме того, чтобы получить соответствующую акустическую маскировку и достоверный приём БФМ-сигнала в условиях малых отношений сигнал/маскирующий шум, необходимо исключить перекрытие спектров информационного сигнала и маскирующего шума, более того, обеспечить на приёме значительное превышение значений частот в полосе маскирующего шума над несущей частотой БФМ-сигнала.

Указанные требования можно выполнить, используя на приёме замаскированного БФМ-сигнала операцию гетеродинирования с преобразованием несущей частоты БФМ-сигнала вниз, выбирая частоту гетеродина меньше несущей частоты БФМ-сигнала и обеспечивая после гетеродинирования величину промежуточной частоты преобразования, которая значительно меньше значений частот в полосе маскирующего шума.

Операция необходимого гетеродинирования принятого широкополосным гидрофоном замаскированного БФМ-сигнала иллюстрируется рис. 3, где обозначены: $G(f)$ – спектральная плотность процессов в области частот f ; f_0 – несущая частота колебаний БФМ-сигнала; f_Γ – частота колебаний гетеродина; $f_{\min}$, $f_{\max}$ – минимальная и максимальная граничные частоты спектра квазибелого шума, маскирующего БФМ-сигнал; $f_{\text{пр}}$ – промежуточная частота преобразования при гетеродинировании; $f_{\text{пр min}}$, $f_{\text{пр max}}$ – минимальная и максимальная граничные частоты спектра квазибелого шума, маскирующего БФМ-сигнал, после операции гетеродинирования.

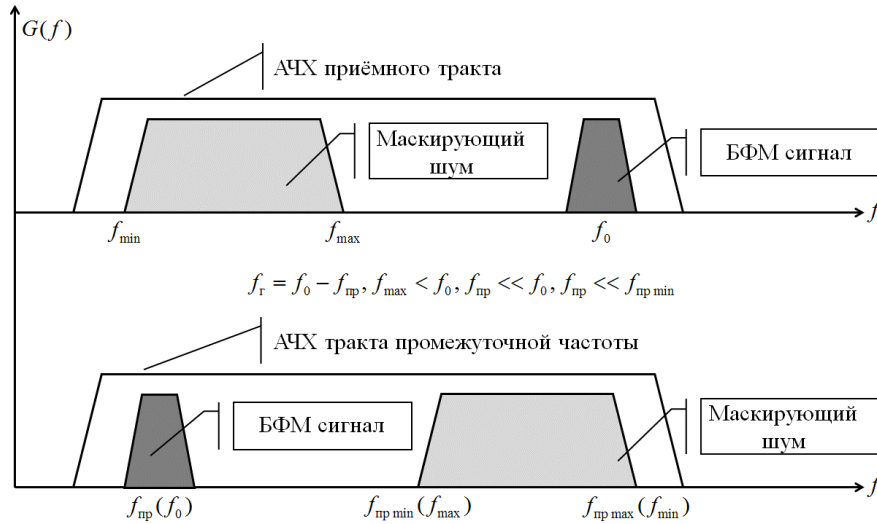


Рис. 3. Стилизованные спектры сигнала и маскирующего шума при гетеродинировании

В процессе гетеродинирования осуществляется перенос БФМ-сигнала на промежуточную частоту без изменения его спектра частот ($f_0 \rightarrow f_{пр}$) и преобразование маскирующего шума с инверсией спектра частот ($f_{min} \rightarrow f_{пр max}$, $f_{max} \rightarrow f_{пр min}$).

Представляя сигнал гетеродина $u_r(t)$ в виде непрерывного гармонического колебания:

$$u_r(t) = U_r \cos [2\pi(f_0 - f_{пр})t + \varphi_r], \quad (3)$$

где U_r , φ_r – амплитуда и начальная фаза колебаний, замаскированный БФМ-сигнал после преобразования частоты вниз и фильтрации колебаний суммарной частоты с учётом (2) можно описать зависимостью:

$$\begin{aligned} X(t_3) = & \chi U_r \sqrt{\frac{\Delta F_{пр}}{\Delta F}} \{g\{U_x \cos\{2\pi f_{пр} t_3 + [1 + \mu(t_3)]\frac{\pi}{2} + \\ & + \varphi_{в} + \varphi_{пр} - \varphi_r\} + \sigma_n n(t_3)\} + \sigma_\xi \xi(t_3)\}; \quad t_3 \in [\tau_5 \dots \tau_6]; \\ & U_x \ll \sigma_n; \quad U_x \gg \sigma_\xi; \quad \sigma_\xi \ll \sigma_n; \quad \Delta F > \Delta F_{пр}; \quad \Delta F_{пр} \approx \Delta F_y, \end{aligned} \quad (4)$$

где χ – коэффициент передачи преобразователя частоты (смеситель + фильтр); $\Delta F_{пр}$ – полоса пропускания тракта промежуточной частоты; ΔF – полоса пропускания приёмного широкополосного гидрофона; ΔF_y – частотный диапазон излучаемого сеансового сигнала $y(t)$; $\varphi_{пр}$ – фазовый сдвиг, внесённый преобразователем частоты.

Для обработки замаскированного БФМ-сигнала формируется вспомогательный сигнал $Y(t)$ промежуточной частоты $f_{пр}$ в виде двух квадратурных составляющих $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ с большим отношением сигнал/шум, которые математически характеризуются как функционально связанные непрерывные гармонические колебания:

$$Y(t) \rightarrow \begin{cases} Y_1(t) = U_0 \cos(2\pi f_{пр} t + \varphi_0) \\ Y_2(t) = U_0 \sin(2\pi f_{пр} t + \varphi_0) \end{cases}, \quad (5)$$

где U_0 , φ_0 – амплитуда и начальная фаза колебаний.

Приём замаскированного БФМ-сигнала $X(t_3)$ осуществляется с использованием синхронизации по несущей информационного сигнала. Для этого выполняется процедура синфазизации

рования гармонических колебаний вспомогательного сигнала $Y(t)$ и колебаний гармонической посылки синхронизации, передаваемой в БФМ-сигнале перед информационными посылками без разрыва фазы колебаний несущей информационного сигнала.

Длительность гармонической посылки синхронизации для упрощения технической реализации приёма целесообразно выбирать кратной длительности информационной посылки, при этом сама процедура синфазирования осуществляется на интервале, равном длительности информационной посылки, а длительность дополнительного временного интервала гармонической посылки синхронизации, который можно назвать защитным, согласовывается со временем, необходимым для выполнения соответствующих операций в процедуре синфазирования. Указанная процедура синфазирования предполагает выполнение следующих действий и операций.

Вспомогательные сигналы $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ и сигнал $X(t_3)$ на интервале посылки синхронизации, равном длительности информационной посылки, подвергаются синхронной дискретизации с количеством отсчётов k на периоде колебаний промежуточной частоты и общим числом отсчётов L на длительности этого интервала.

Запоминаются три массива $Y1(n)$, $Y2(n)$, $X(n)$ выборок сигналов:

$$Y_1(t) \rightarrow Y1(n); Y_2(t) \rightarrow Y2(n); X(t_3) \rightarrow X(n); n \in [1 \dots L], \quad (6)$$

где n – порядковый номер отсчёта в выборке массива, при этом параметры k и L связаны соотношениями: $L = 100k$, $k \geq 360$.

Вычисляются и запоминаются весовые коэффициенты $W1$ и $W2$, определяющие проекции сигнала $X(t_3)$ (для интервала посылки синхронизации) на квадратурные составляющие вспомогательного сигнала $Y(t)$:

$$W1 = \frac{\sum_{n=1}^L Y1(n)X(n)}{\sum_{n=1}^L [Y1(n)]^2}; \quad W2 = \frac{\sum_{n=1}^L Y2(n)X(n)}{\sum_{n=1}^L [Y2(n)]^2}. \quad (7)$$

Выполнение операций (7) позволяет находить проекции сигнала $X(t_3)$ (на длительности гармонической посылки синхронизации) с малым отношением сигнал/маскирующий шум на квадратурные составляющие $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ вспомогательного гармонического сигнала $Y(t)$, имеющего большое отношение сигнал/шум.

Указанные проекции необходимы для получения массива $R(n)$ отсчётов гармонического сигнала с большим отношением сигнал/шум, синфазного с несущей замаскированного БФМ-сигнала, используемого для дальнейшего корреляционного приёма информационных посылок сеансового сигнала. Отсчёты массива $R(n)$ формируются и запоминаются в результате следующей операции:

$$R(n) = W1 \cdot Y1(n) + W2 \cdot Y2(n); n \in [1 \dots L]. \quad (8)$$

Корреляционный приём информационных посылок замаскированного БФМ-сигнала реализуется с использованием импульсов тактовой синхронизации, сформированных после приёма стартового сигнала, передаваемого перед посылкой синхронизации. Процедура корреляционного приёма предусматривает выполнение следующих действий и операций.

По мере поступления импульсов тактовой синхронизации осуществляется дискретизация гармонических колебаний (с запоминанием соответствующего массива отсчётов $X(n)$ для последующей обработки в режиме «аппаратно-программного» времени) каждой информационной посылки замаскированного шумом БФМ-сигнала $X(t_3)$ с количеством отсчётов k на периоде колебаний промежуточной частоты и общим числом отсчётов L на длительности посылки:

$$X(t_3) \rightarrow X(n); n \in [1 \dots L], \quad (9)$$

где n – порядковый номер отсчёта в выборке массива, при этом параметры k и L связаны, как и при синфазировании, соотношениями: $L = 100k$, $k \geq 360$.

Для уменьшения времени последующих вычислений осуществляется нормирование отсчётов массивов $R(n)$ и $X(n)$ путём их представления своими знаками по правилу:

$$R(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } R(n) > 0 \\ -1, & \text{если } R(n) < 0 \end{cases}; X(n) = \begin{cases} 1, & \text{если } X(n) > 0 \\ -1, & \text{если } X(n) < 0 \end{cases}; n \in [1 \dots L]. \quad (10)$$

Вычисляется на длительности $\tau_{\text{и}}$ каждой информационной посылки замаскированного БФМ-сигнала корреляционный параметр β_{τ} :

$$\beta_{\tau} = \sum_{n=1}^L R(n) \cdot X(n). \quad (11)$$

Принимается решение о приёме соответствующего информационного символа $\mu(t_3)$:

$$\begin{cases} \mu(t_3) = 1, & \text{если } \beta_{\tau} \geq 0 \\ \mu(t_3) = -1, & \text{если } \beta_{\tau} < 0 \end{cases}. \quad (12)$$

Выбор базовых параметров дискретизации ($k \geq 360$) и усреднения ($L = 100k$) осуществлён по результатам моделирования системы передачи сообщений в математической среде Mathcad 15 для достижения приемлемой достоверности приёма бинарных сигналов с вероятностью ошибок $P_0 \leq 10^{-3}$.

Исходя из выбранного значения параметра L (сто периодов промежуточной частоты при усреднении), несложно оценить необходимую для достоверного приёма длительность $\tau_{\text{и}}$ информационной посылки БФМ-сигнала и частоту манипуляции $F_{\text{м}}$ при его формировании:

$$\tau_{\text{и}} \geq \frac{100}{f_{\text{пр}}}; \quad F_{\text{м}} \leq \frac{f_{\text{пр}}}{100}. \quad (13)$$

Так, например, при выборе промежуточной частоты $f_{\text{пр}} = 1$ кГц длительность информационной посылки БФМ-сигнала не может быть менее $\tau_{\text{и}} \geq 0.1$ с, а частота манипуляции при его формировании не будет превышать $F_{\text{м}} \leq 10$ Гц, что соответствует канальной скорости передачи сообщений не более 10 Бод.

4. Техническая реализация способа

Техническая реализация предлагаемого способа может быть достаточно разнообразной. В статье имеет смысл ограничиться рассмотрением возможного варианта технического исполнения системы передачи сообщений на уровне укрупнённых функциональных элементов, не вдаваясь в особенности их конкретного схмотехнического исполнения, сохранив при этом все присущие представленному способу отличительные признаки.

Укрупнённые схемы функциональных элементов передающей и приёмной частей системы передачи сообщений представлены на рис. 4 и 5 соответственно, где обозначены: 1 – источник бинарного сигнала, 2 – фазовый модулятор, 3 – аналоговый сумматор, 4 – аналоговый коммутатор, 5 – усилитель мощности, 6 – широкополосный передающий гидрофон, 7 – формирователь сигнала несущей частоты, 8 – формирователь маскирующего шума, 9 – формирователь первого сигнала акустической окраски, 10 – формирователь второго сигнала акустической окраски, 11 – формирователь стартового сигнала, 12 – формирователь стопового сигнала, 13 – устройство формирования управляющих сигналов, 14 – широкополосный приёмный гидрофон, 15 – усилитель сигнала приёмного гидрофона, 16 – преобразователь частоты, 17 – селектор стартстопных сигналов, 18 – аналого-цифровые преобразователи, 19 –

вычислитель, 20 – формирователь вспомогательных сигналов, 21 – устройство управления, 22 – получатель бинарного сигнала.

Техническая реализация способа скрытной передачи формулярных сообщений предполагает выполнение определённых действий, процедур и операций, которые для удобства восприятия целесообразно разделить на соответствующие этапы.

Выбор параметров сигнала

Из априорно известного частотного диапазона (25 – 35 кГц) системы передачи сообщений выбирается несущая частота f_0 колебаний сеансового БФМ-сигнала.

Определяются временные, амплитудные, частотные параметры сигналов $a(t_1)$, $b(t_5)$ акустической окраски и стартстопных сигналов $c(t_2)$, $d(t_4)$ излучаемого сеансового сигнала, а также амплитудные параметры квазibelого шума $n(t_3)$, маскирующего БФМ-сигнал. Достаточно подробно подход к выбору и рекомендуемые параметры указанных сигналов рассмотрены в [2] при описании способа гидроакустического поиска автономного донного подводного объекта.

С учётом соображений приемлемой технической реализации оборудования и распространённых в гидроакустических модемах скоростей передачи сообщений на основе требования (13) выбирается промежуточная частота $f_{\text{пр}}$ преобразования в операции гетеродинирования (с частотой гетеродина $f_{\text{Г}} = f_0 - f_{\text{пр}}$) из предпочтительного для цифровой обработки сигналов диапазона частот 1 – 5 кГц.

Из условия достоверного приёма БФМ-сигналов: $\frac{f_{\text{пр min}}}{f_{\text{пр}}} \geq 10$, где

$f_{\text{пр min}} = f_0 - f_{\text{пр}} - f_{\text{max}}$ (см. рис. 3), на основе неравенства $f_{\text{max}} \leq f_0 - 11f_{\text{пр}}$ определяется максимальная граничная частота f_{max} спектра квазibelого шума $n(t_3)$, маскирующего излучаемый БФМ-сигнал.

Минимальная граничная частота f_{min} спектра квазibelого шума, маскирующего излучаемый БФМ-сигнал, согласовывается с частотной характеристикой широкополосного передающего гидрофона в области низких частот.

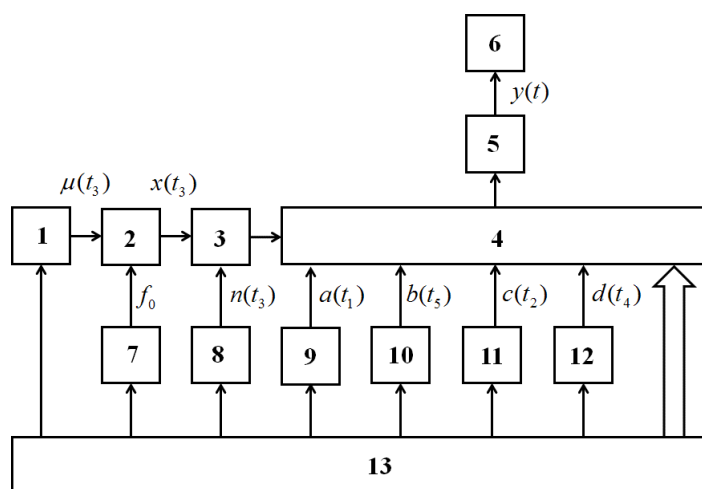


Рис. 4. Структура передающей части системы передачи сообщений

С использованием зависимости (13) рассчитывается частота манипуляции F_m для формирования БФМ-сигнала и частота импульсов тактовой синхронизации для его приёма, равная частоте манипуляции.

Формирование и излучение сеансового сигнала

С использованием необходимых фрагментов сонограмм записей звуков морских животных, рыб, ракообразных во флэш-накопителях формирователей сигналов 9, 10 записываются сигналы $a(t_1)$, $b(t_5)$ акустической окраски, а во флэш-накопителях формирователей сигналов 11, 12 – стартстопные сигналы $c(t_2)$, $d(t_4)$ с параметрами, определёнными на этапе выбора параметров сигнала.

На основе фрагментов сонограмм записей шумов мелкого или глубокого моря во флэш-накопителе формирователя маскирующего шума 8 записывается квазибелый шум $n(t_3)$, соответствующий длительности БФМ-сигнала, с граничными частотами спектра $f_{\min}$ и $f_{\max}$, также установленными на этапе выбора параметров сигнала.

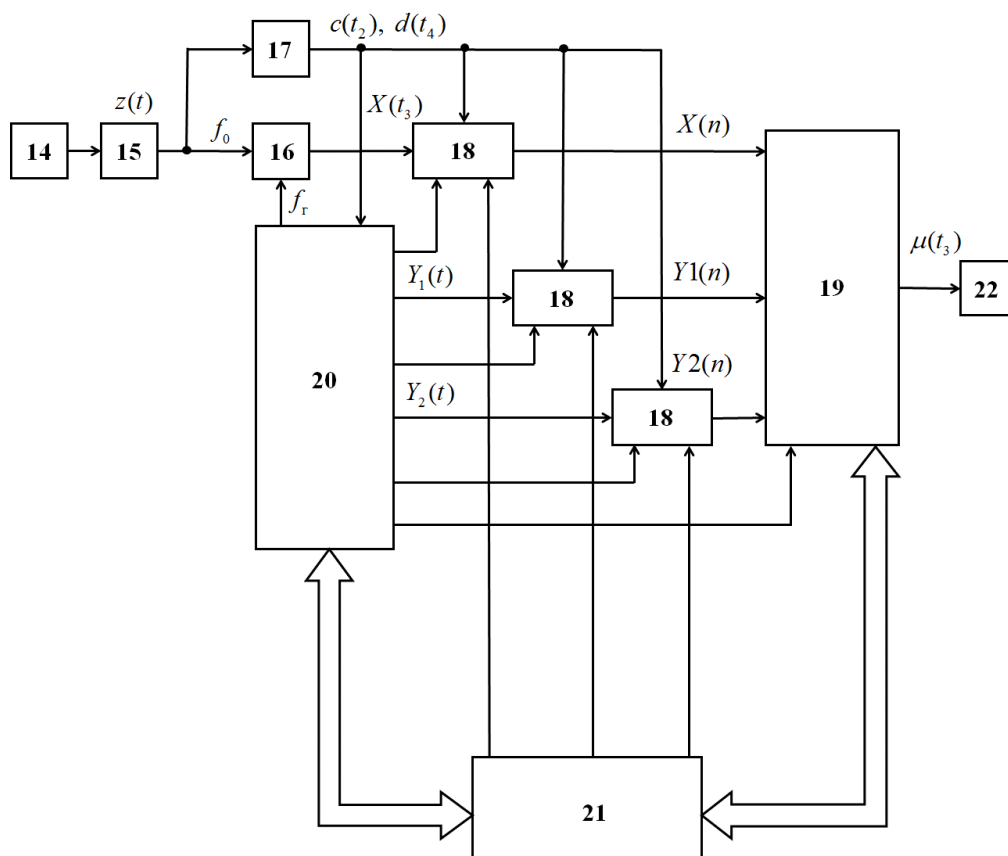


Рис. 5. Структура приёмной части системы передачи сообщений

Под управлением устройства 13 формирования управляющих сигналов:

- в фазовом модуляторе 2 осуществляется фазовая манипуляция несущей частоты f_0 формирователя сигнала несущей частоты 7 бинарным сигналом $\mu(t_3)$ источника 1 с частотой манипуляции F_m , рассчитанной на этапе выбора параметров сигнала, с получением БФМ-сигнала $x(t_3)$ и гармонической посылки синхронизации;

- с помощью аналогового сумматора 3 к БФМ-сигналу $x(t_3)$ добавляется квазибелый шум $n(t_3)$ формирователя маскирующего шума 8;

– посредством аналогового коммутатора сигналов 4 из сигналов $a(t_1)$, $c(t_2)$, $x(t_3)$, $n(t_3)$, $d(t_4)$, $b(t_5)$ формируется сеансовый сигнал $y(t)$ заданной длительности и выбранной структуры (см. рис. 1, 2).

Усилителем мощности 5 сеансовый сигнал $y(t)$ доводится до уровня, обеспечивающего необходимую акустическую мощность, и излучается широкополосным передающим гидрофоном 6 в водную среду.

Приём и обработка сеансового сигнала

Широкополосным приёмным гидрофоном 14 принимается из водной среды и усиливается до необходимого уровня усилителем сигнала приёмного гидрофона 15 сеансовый сигнал $z(t)$ с несущей частотой f_0 БФМ-сигнала.

Обработка принимаемого сеансового сигнала $z(t)$ производится с использованием многофункционального устройства управления 21, которое может быть реализовано на базе одного из видов современных микроконтроллеров.

Осуществляется гетеродинирование усиленного сеансового сигнала $z(t)$ на выбранную промежуточную частоту $f_{\text{пр}}$ с частотой колебаний $f_{\Gamma} = f_0 - f_{\text{пр}}$ сигнала гетеродина, поступающего на преобразователь частоты 16 от формирователя вспомогательных сигналов 20, который формирует также гармонические квадратурные сигналы $Y_1(t)$ и $Y_2(t)$ промежуточной частоты с большим отношением сигнал/шум и импульсные сигналы тактовой синхронизации с частотой манипуляции F_m , необходимые для работы аналого-цифровых преобразователей 18 и вычислителя 19.

По стартовому сигналу $c(t_2)$ усиленного сеансового сигнала $z(t)$, выделенному селектором стартстопных сигналов 17, посредством аналого-цифровых преобразователей 18 выполняется на длительности посылки синхронизации БФМ-сигнала синхронная дискретизация сигналов $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ формирователя вспомогательных сигналов 20 и сигнала $X(t_3)$ на выходе преобразователя частоты 16 с количеством отсчётов k на периоде колебаний промежуточной частоты и общим числом отсчётов L на длительности посылки, которые выбираются соответственно: $k \geq 360$, $L = 100k$.

В вычислителе 19 на длительности посылки синхронизации БФМ-сигнала из полученных от аналого-цифровых преобразователей 18 отсчётов:

- формируются и запоминаются три массива выборок $Y1(n)$, $Y2(n)$, $X(n)$;
- вычисляются и запоминаются весовые коэффициенты $W1$ и $W2$, определяющие проекции сигнала $X(t_3)$ на квадратурные составляющие $Y_1(t)$, $Y_2(t)$ вспомогательного сигнала $Y(t)$;
- выполняется операция (8) по получению и запоминанию массива $R(n)$ отсчётов гармонического сигнала с большим отношением сигнал/шум, синфазного с несущей замаскированного БФМ-сигнала на промежуточной частоте.

Реализуется корреляционный приём следующих за посылкой синхронизации информационных посылок замаскированного БФМ-сигнала с использованием импульсов тактовой синхронизации формирователя вспомогательных сигналов 20, поступающих с частотой манипуляции F_m и сформированных после приёма стартового сигнала $c(t_2)$. Корреляционный приём предусматривает:

- дискретизацию посредством аналого-цифровых преобразователей 18 по мере поступления сигнала тактовой синхронизации от формирователя вспомогательных сигналов 20 гармонических колебаний с последующим запоминанием в вычислителе 19 соответствующего мас-

сива отсчётов $X(n)$ каждой информационной посылки замаскированного шумом БФМ-сигнала $X(t_3)$ с количеством отсчётов k на периоде колебаний промежуточной частоты и общим числом отсчётов L на длительности посылки – операция (9);

– нормирование в вычислителе 19 отсчётов массивов $R(n)$ и $X(n)$ путём их представления своими знаками по правилу (10);

– определение в вычислителе 19 на длительности $\tau_{\text{и}}$ каждой информационной посылки БФМ-сигнала корреляционного параметра β_{τ} – операция (11);

– принятие в вычислителе 19 решения о приёме соответствующего информационного символа $\mu(t_3)$ по правилу (12).

Завершается процесс приёма информационных посылок БФМ-сигнала по стоповому сигналу $d(t_4)$, выделенному селектором стартстопных сигналов 17 из принятого сеансового сигнала $z(t)$.

5. Оценка достоверности приёма

Достоверность приёма БФМ-сигналов в условиях маскирования квазигелым шумом оценивалась путём статистического моделирования в математической среде Mathcad 15. При моделировании использовались следующие исходные данные: количество сеансов приёма БФМ-сигналов – 50; число информационных символов БФМ-сигнала в сеансе – 100; маскирующий квазигелый шум с заданной полосой частот имеет нормальное распределение с нулевым средним, обеспечивается некоррелированность реализаций шума от посылки к посылке принимаемого БФМ-сигнала; число усредняемых периодов промежуточной частоты при синфазировании (синхронизации по несущей частоте БФМ-сигнала) и корреляционном приёме информационных символов – 100; доплеровское смещение несущей частоты принимаемого БФМ-сигнала относительно соответствующей частоты формирователя вспомогательных сигналов составляет $2 \cdot 10^{-3}$, что соответствует относительному перемещению передатчика и приёмника гидроакустической линии связи с радиальной скоростью 3 м/с.

В качестве исследуемых параметров при сеансовом моделировании были приняты: отношение сигнал/маскирующий шум в каждом сеансе приёма БФМ-сигнала – параметр H ; количество отсчётов на периоде колебаний промежуточной частоты при дискретизации каждой посылки сеансового БФМ-сигнала для его корреляционного приёма – параметр k ; границы полосы частот квазигелого шума на промежуточной частоте при корреляционном приёме – параметры $\frac{f_{\text{пр min}}}{f_{\text{пр}}}$ и $\frac{f_{\text{пр max}}}{f_{\text{пр}}}$.

На рис. 6 и 7 представлены результаты статистического моделирования процесса приёма сеансового БФМ-сигнала для выбранных значений исследуемых параметров:

$$H = -40 \text{ дБ}, H = -30 \text{ дБ}; k = 360, k = 2000; \frac{f_{\text{пр min}}}{f_{\text{пр}}} = 10; \frac{f_{\text{пр max}}}{f_{\text{пр}}} = 15.$$

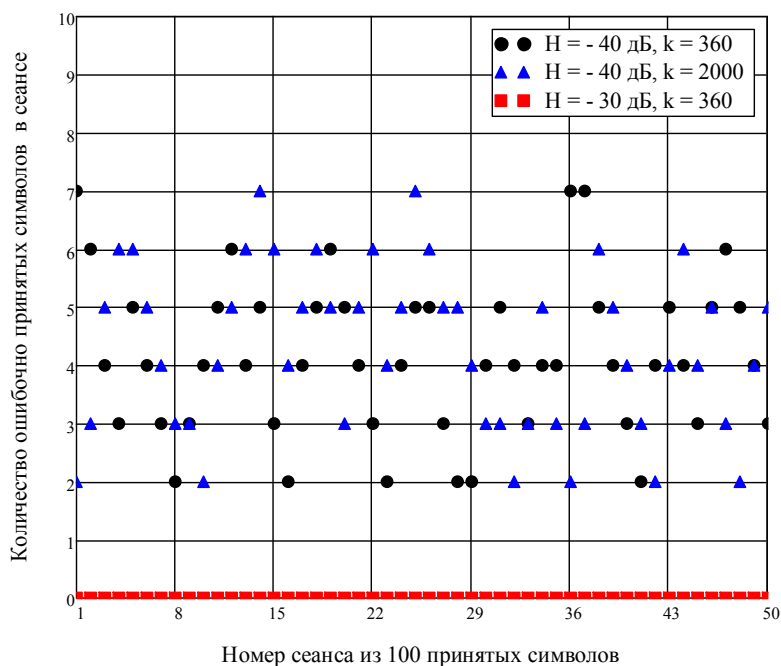


Рис. 6. Результаты сеансового приёма БФМ-сигналов первого цикла испытаний

Представленные на рисунках зависимости ошибочно принятых символов в сеансе от номера сеанса получены в двух циклах статистических испытаний, отличающихся разными реализациями маскирующего послылки БФМ-сигнала квазибелого шума.

В процессе моделирования получены следующие важные системные результаты:

- для поэлементного приёма сеансового БФМ-сигнала с достоверностью $P_0 \leq 10^{-3}$ величина превышения среднеквадратического отклонения квазибелого маскирующего шума над амплитудой БФМ-сигнала не должна превышать 30 дБ;
- увеличение количества отсчётов на периоде колебаний промежуточной частоты при дискретизации каждой послылки сеансового БФМ-сигнала для его корреляционного приёма относительно выбранного базового значения ($k = 360$) не повышает достоверность приёма.

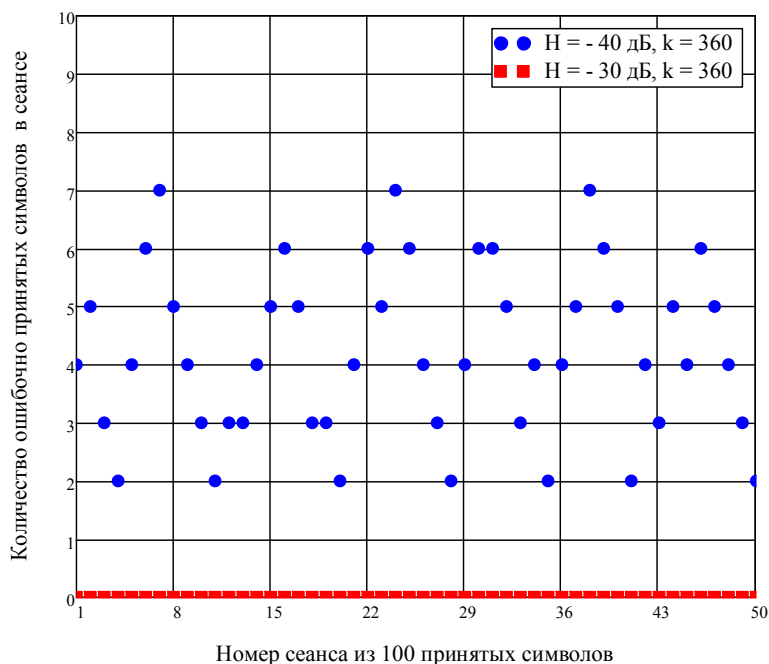


Рис. 7. Результаты сеансового приёма БФМ-сигналов второго цикла испытаний

Изменение параметров $\frac{f_{\text{пр min}}}{f_{\text{пр}}}$ и $\frac{f_{\text{пр max}}}{f_{\text{пр}}}$ маскирующего квазиглового шума в сторону увеличения ($\frac{f_{\text{пр min}}}{f_{\text{пр}}} = 19$, $\frac{f_{\text{пр max}}}{f_{\text{пр}}} = 29$) для параметров $k = 360$ и $H = -40$ дБ приводит к появлению в цикле приёма из 50 сеансов по 100 информационных символов не более одного ошибочно принятого символа.

Если считать верхней границей приемлемой маскировки БФМ-сигнала в процессе передачи сообщений величину отношения сигнал/маскирующий шум $H_{\text{max}} \leq -15$ дБ, а достаточную для достоверного приёма с вероятностью ошибок уровня $P_0 \approx 10^{-3}$ нижнюю границу указанного отношения $H_{\text{min}} \geq -30$ дБ, то можно оценить возможную длину гидроакустической линии связи (наклонное расстояние между передатчиком и приёмником гидроакустических сигналов) для заданной несущей частоты f_0 излучаемого БФМ-сигнала и выбранной максимальной граничной частоты f_{max} спектра маскирующего квазиглового шума.

Так, например, для частотных параметров гидроакустической системы передачи сообщений $f_0 = 30$ кГц, $f_{\text{max}} = 10$ кГц на основе полуэмпирической зависимости погонного затухания от частоты акустических колебаний в морской воде [4] можно получить длину $D_{\text{л}}$ гидроакустической линии связи для скрытной передачи сообщений с указанной выше достоверностью. Эта длина может быть рассчитана по формуле:

$$D_{\text{л}} \approx \frac{|H_{\text{min}}| - |H_{\text{max}}| \text{ [дБ]}}{0.036(f_0^{1.5} - f_{\text{max}}^{1.5}) \left[\frac{\text{дБ}}{\text{км}} \right]} = \frac{30 - 15}{0.036(164.3 - 31.6)} \approx 3 \text{ [км]}, \quad (14)$$

где частоты выражены в кГц.

Такой длины линии связи вполне достаточно для организации фрагментов сетевых подводных сетей, интегрированных систем подводного мониторинга, гидрорелейных систем с повышенной скрытностью передачи формулярных сообщений.

6. Заключение

Предлагаемый способ позволяет осуществлять обмен формулярными сообщениями между подводными объектами с наклонными расстояниями до трёх километров, перемещающимися относительно друг друга со скоростями до шести узлов, обеспечивая приемлемую достоверность поэлементного приёма, характерную для каналов без помехоустойчивого кодирования. Рассмотренное техническое решение позволяет достичь желаемого эффекта – повышения скрытности процесса передачи формулярных сообщений между подводными объектами за счёт использования в процессе передачи сообщений гидроакустических сигналов, маскируемых под возможные акустические фоновые шумы известной морской акватории, – звуки морских животных, рыб, ракообразных, шумы моря, выбора надлежащей структуры, амплитудных, временных и частотных параметров этих гидроакустических сигналов, осуществления в процессе приёма соответствующего гетеродинамирования принимаемых сигналов с инверсией спектра квазиглового шума, маскирующего информационные посылки сеансового сигнала, корреляционного приёма фазоманипулированного сигнала с синхронизацией по несущей информационного сигнала, реализованного за счёт введения процедуры синфазирования гармонических сигналов с разными отношениями сигнал/квазигловоый шум.

Литература

1. Абаренов С. П., Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. О выборе частотных и пространственных параметров гидроакустических информационно-управляющих сетей на основе обобщённых энергетических показателей // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2014. Т. 7, № 2. С. 27–35.
2. Арсентьев В. Г., Криволапов Г. И. Гидроакустический поиск автономного необитаемого подводного объекта // *Вестник СибГУТИ*. 2020. № 3. С. 64–78.
3. Патент РФ 2727331, МПК G01S 15/00. Способ гидроакустического поиска автономного донного подводного объекта / В. Г. Арсентьев, Г. И. Криволапов. Заявка 2019145191, заявлено 25.12.2019, опубликовано 21.07.2020. Бюл. № 21.
4. Пенин П. И. Системы передачи цифровой информации: учебное пособие для вузов. М.: Сов. Радио, 1976. 368 с.

Статья поступила в редакцию 16.02.2021.

Арсентьев Виктор Георгиевич

к.т.н., ведущий научный сотрудник научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ (630008, Новосибирск, ул. Бориса Богаткова, 51), тел. (383) 2-693-938, e-mail: viktor.arsentev.51@mail.ru.

Криволапов Геннадий Илларионович

к.т.н., доцент, заведующий лабораторией, руководитель научно-технического центра специализированных информационных систем СибГУТИ, тел. (383) 2-693-942, e-mail: krivolapov@sibsutis.ru.

Method for transmitting discrete messages in a hydroacoustic channel

V. Arsent'ev, G. Krivolapov

A method for transmitting short messages is proposed in which the radiated hydroacoustic signals contain an information part being masked by noise and an acoustic color that is close in acoustic perception to the possible marine environment natural noise of a known water area.

Keywords: structure and signal processing, technical implementation of the method, reliability of reception.