

Б. И. Филиппов

АЛГОРИТМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ ДИСТАНЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Объект исследования – принципы и методы построения комбинированной системы измерения дистанции (СИД) и передачи сигналов управления и цифровой информации по гидроакустическому каналу связи (ГАКС) вертикальной ориентации. Цель работы – исследование путей построения комбинированной системы СИД – ГАКС, используемой в составе оперативного гидроакустического комплекса. Проведён выбор системы сигналов и метода измерения дистанции. Разработан алгоритм комбинированной системы СИД – ГАКС, построенной на принципах асинхронно-адресной передачи с кодовым разделением сигналов и совмещением операции измерения дистанции с передачей сигналов управления. С точки зрения обмена сигналами комбинированную систему СИД – ГАКС, можно рассматривать как многостанционную информационную сеть (сеть связи), в которой обслуживающее судно и объект измерения могут выполнять функции центральной (ведущей) станции, а все остальные элементы системы – её абоненты (ведомые станции). В качестве сигналов команд управления и квитанций предложено применять шестикратно повторяемые двоичные последовательности, каждая из которых состоит из синхронизирующей стартовой последовательности длительностью 32 символа и кодовой комбинации корректирующего циклического кода (32,16). Выбор системы сигналов для передачи команд управления и квитанций осуществлён из условий обеспечения вероятности: приёма абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{н.о} \leq 10^{-8}$; ложного приёма команды абонентом при отсутствии её передачи $P_{л.пр} \leq 4 \cdot 10^{-7}$; набора сигнала вызова абонента $P_{н.ш} \leq 10^{-8}$; непрохождения сигнала по кольцу управления «центральная станция – абонент – центральная станция» при однократной передаче команды управления $P_y \leq 10^{-2}$. Показана реализация в разрабатываемой системе алгоритма измерения дистанции, совмещённого с передачей команд управления, что позволяет измерять дистанцию при любом обмене сигналами между центральной станцией и абонентом.

Ключевые слова: гидроакустический канал связи, система измерения дистанции, многофункциональная гидроакустическая станция, команды управления.

Введение

Состояние проблемы. Особенность исследуемой комбинированной системы измерения дистанции (СИД) с использованием гидроакустического канала связи (ГАКС), т. е. СИД – ГАКС, заключается в том, что обмен сигналами между её составными частями осуществляется сеансами и начинается всегда с передачи сигнала команды управления. Передача команд управления может осуществляться или с обслуживающего судна или с объекта измерения. Это означает, что инициатива начала обмена сигналами в системе может принадлежать либо только обслуживающему судну, либо только объекту измерения. С точки зрения обмена сигналами комбинированную систему СИД – ГАКС можно рассматривать как многостанционную информационную сеть (сеть связи), в которой обслуживающее судно и объект измерения могут выполнять функции центральной (ведущей) станции, а все остальные элементы системы – её абоненты (ведомые станции).

Представляется целесообразным рассмотреть ряд ситуаций, которые могут возникать при обмене сигналами между элементами комбинированной системы СИД – ГАКС.

1. *Обмен сигналами в сети осуществляется по инициативе обслуживающего судна.* В этой ситуации обслуживающее судно – центральная станция, все (не менее 10) многофункциональные гидроакустические станции (МГАС) и объект измерения являются его абонентами. Обслуживающее судно в поочерёдном режиме может осуществлять вызов своих абонентов. В [1] показано, что для упрощения процедуры вхождения в связь и обмена сигналами в сети целесообразно в качестве сигнала вызова абонента применять сигналы команд управления, передаваемых этому абоненту. В ответ на команду абонент, которому адресована данная команда управления, передаёт на обслуживающее судно квитанцию о приёме и исполнении команды управления. Остальные абоненты сети на команду, переданную с обслуживающего судна, не реагируют.

2. *Обмен сигналами в сети осуществляется по инициативе объекта измерения.* Объект измерения – центральная станция, все МГАС и обслуживающее судно являются его абонентами. Обслуживающее судно в поочередном режиме может осуществлять вызов своих абонентов. Как и в предыдущем случае, в качестве сигнала вызова абонента целесообразно применять сигналы команд управления, передаваемых этому абоненту. В ответ на команду абонент, которому адресована данная команда управления, передаёт на обслуживающее судно квитанцию о приёме и исполнении команды управления. Остальные абоненты сети на команду, переданную с обслуживающего судна, не реагируют.

Сходство рассмотренных ситуаций заключается в том, что и в той и в другой передача сигналов команд управления и квитанций осуществляется в вертикальном канале, поэтому следует предусмотреть меры, обеспечивающие надёжное разделение отражённых от границ «вода – воздух» и «вода – дно» сигналов команд управления $S_{к.у}(t)$ от соответствующих им сигналов квитанций $S_{кв}(t)$.

Различие ситуаций состоит в том, что обслуживающее судно и объект измерения могут исполнять роль ведущей и ведомой станции. При этом необходимо принять меры по надёжному различению другими абонентами сети МГАС сигналов команд управления, передаваемых с обслуживающего судна, и сигналов команд управления, передаваемых с объекта измерения.

Надёжное разделение сигналов команд управления от сигналов соответствующих им квитанций достигается, если для передачи команд управления и соответствующих им квитанций применять противоположные сигналы: $S_{к.у}(t) = -S_{кв}(t)$.

Разделение в МГАС сигналов команд управления, передаваемых с обслуживающего судна, от сигналов команд управления, передаваемых с объекта измерения, может быть достигнуто путём двукратного увеличения алфавита используемых сигналов. При этом для передачи команд управления с обслуживающего судна и с объекта управления должны применяться неперекрывающиеся подмножества сигналов $\{S_{oi}(t)\}$ и $\{S_{li}(t)\}$ соответственно.

Методы и результаты исследования

Выбор ансамбля сигналов для передачи команд управления и квитанций осуществляется исходя из показателей качества функционирования комбинированной системы СИД – ГАКС.

К числу таких показателей относятся: вероятность неправильного приёма команды управления не более 10^{-6} ; вероятность ложного приёма команды при отсутствии её передачи не более 10^{-8} ; вероятность неприёма команды управления не более 10^{-2} . Переходя к терминологии, принятой в технике связи и в телеуправлении, отметим, что термину «вероятность неправильного приёма команды управления» в технике связи соответствует термин «прием команды управления с необнаруженной ошибкой». Этот показатель принято характеризовать вероятностью необнаруженной ошибки $P_{н.о}$. Вместо термина «вероятность неприёма команды управления» корректнее применять термин «вероятность того, что затраты времени на передачу команды превысят некоторую наперёд заданную величину, называемую временем управления t_y »; эту вероятность обозначим P_y . Под временем управления, согласно [2], понимается промежуток времени от момента принятия решения о передаче команды управления до момента получения сообщения об исполнении этой команды.

Вероятность ложного приёма команды при отсутствии её передачи, обозначим её $P_{л.пр}$, соответствует сумме вероятности набора сигнала вызова из шумов $P_{н.ш}$ и вероятности трансформации сигнала вызова i -го абонента в сигнал вызова j -го абонента $P_{тр}(j/i)$. Очевидно, что

$$P_{л.пр} = P_{н.ш} + (A' - 1) \sum_{j=1}^{A-1} \sum_{i=1}^K P_{тр}(j/i)P(i), \quad (1)$$

где $P(i)$ – априорная вероятность передачи абоненту с номером j команды номер i ; K – количество команд управления, передаваемых каждому из абонентов сети, выбираем $K \geq 25$; A – количество абонентов в сети; A' – количество абонентов, находящихся в зоне связи центральной станции.

Для получения верхней оценки вероятности ложного приёма команды при отсутствии её передачи $P_{л.пр}$ достаточно в выражении (1) считать, что априорные вероятности передач всех команд одинаковы $P(i) = 1/K$, а вместо вероятности трансформации сигнала вызова i -го абонента в сигнал вызова j -го абонента $P_{тр}(j/i)$ использовать вероятность необнаруженной ошибки $P_{н.о}$.

$$P_{л.пр} = P_{н.ш} + (A'-1)(A-1)P_{н.о}. \quad (2)$$

Откуда следует:

$$P_{н.о} = \frac{P_{л.пр} - P_{н.ш}}{(A'-1)(A-1)}. \quad (3)$$

Из выражения (2) видно, что некоторые характеристик нереализуемы, вероятность приёма команды с необнаруженной ошибкой $P_{н.о}$ должна быть по крайней мере в $(A'-1)(A-1)$ раз меньше вероятности ложного приёма команды при отсутствии её передачи $P_{л.пр}$.

В состав комбинированной системы СИД – ГАКС входит не менее 10 МГАС. Кроме того, в состав абонентов сети могут входить дополнительно либо объект измерения, либо обслуживающее судно. Это позволяет при проведении последующего анализа считать, что количество абонентов в сети должно соответствовать условию $A \geq 11$. В предельном случае в зоне связи с центральной станцией могут оказаться все абоненты сети, т. е. в пределе $A' = A$. Однако, учитывая конфигурацию комбинированной системы, порядок взаимодействия её составных частей, предполагаемые глубины постановки МГАС и связанный с этим предполагаемый размер зоны связи, следует ожидать, что в зоне связи с центральной станцией может оказаться не более 4–5 абонентов. Примем $A' = 5$.

В этом случае выражение (3) принимает вид

$$P_{н.о} = \frac{P_{л.пр} - P_{н.ш}}{(5-1)(11-1)} = \frac{P_{л.пр} - P_{н.ш}}{40}. \quad (4)$$

Из формулы (4) следует, что вероятность ложного приёма команды при отсутствии её передачи $P_{л.пр}$ должна быть по крайней мере в 40 раз больше вероятности приёма команды с необнаруженной ошибкой $P_{н.о}$.

Следует задать хотя бы оценочное значение вероятности приёма команды с необнаруженной ошибкой $P_{н.о}$. Положим в качестве предельного значение $P_{н.о} = 10^{-8}$, что достаточно хорошо согласуется с данными, приведёнными в [2], об усреднённой величине вероятности приёма команды с необнаруженной ошибкой в системах гидроакустического телеуправления. Соответственно, в качестве предельного при выборе системы сигналов будем использовать значение вероятности ложного приёма команды при отсутствии её передачи $P_{л.пр} \leq 4 \cdot 10^{-7}$ и значение вероятности набора сигнала вызова из шумов $P_{н.ш} \leq 10^{-8}$.

Задача выбора ансамбля сигналов для передачи команд управления и квитанций в комбинированной системе СИД – ГАКС должна решаться таким образом, чтобы минимизировать составляющие вероятности $P_{л.пр}$ в выражении (2).

В исследуемой системе обмен сигналами между центральной станцией и абонентами должен осуществляться сеансами и начинается передачей с центральной станции команды управления. Абоненту неизвестен момент начала передачи команды управления, поэтому передаче команды управления должна предшествовать передача специального стартового сигнала. Сказанное позволяет при передаче команд управления считать комбинированную систему СИД – ГАКС разновидностью стартстопной асинхронной адресной системы связи.

В работах [1, 3–7] показано, что для уменьшения затрат на реализацию гидроакустической стартстопной асинхронной адресной системы телеуправления в ней целесообразно приме-

нение в качестве сигналов управления и стартового сигнала двоичных последовательностей. Рекомендуется в качестве стартового сигнала применять также M -последовательности, а для повышения помехозащищённости передачи команд управления использовать корректирующие циклические (n, k) -коды Боуза – Чоудхури – Хоквенгема с обнаружением ошибок.

M -последовательности характеризуются хорошими корреляционными свойствами, что объясняет их широкое распространение в технике связи для целей цикловой синхронизации и кодового разделения сигналов. Нормированная периодическая корреляционная функция $r(k)$ и аperiodическая взаимная корреляционная функция $r_{ij}(k)$ M -последовательности равны [3, 4]:

$$r(k) = \begin{cases} 1, & \text{при } k = 0, \\ m_i/L, & \text{при } k \neq 0, \end{cases}$$

$$r_{ij}(k) = m_j/L, \text{ при } i \neq j,$$

где m_i и m_j – постоянные, значения которых характеризуют максимальные значения боковых выбросов и определяются длиной M -последовательности, m_i меняется в пределах от 0,75 до 1,25, а m_j – в пределах от 1,4 до 5 при изменении длины последовательности L от 127 до 2047.

В случае применения M -последовательности в качестве синхронизирующей стартовой последовательности её выделение из шумов должно производиться с помощью L -разрядного дешифратора [8].

В пользу применения корректирующих циклических (n, k) -кодов Боуза – Чоудхури – Хоквенгема с обнаружением ошибок для повышения помехозащищённости передачи команд управления в комбинированной системе СИД – ГАКС свидетельствует отсутствие достоверной информации о группировании ошибок в канале связи в районе применения этой системы. При недостатке информации о группировании ошибок в канале, как отмечается в [9], применение циклических кодов Боуза – Чоудхури – Хоквенгема является предпочтительным, поскольку их отличает высокая обнаруживающая способность при работе в каналах связи с широкими пределами изменения параметров группирования ошибок. Другим достоинством этого класса кодов является простота, приспособленность для программной реализации, регулярная процедура кодирования и декодирования информации.

Выбор сигналов целесообразно начать с учётом вероятности набора сигнала команды управления из шумов $P_{н.ш}$.

Не вдаваясь в детали вопроса, следует отметить, что при корректном построении приёмного устройства сигналов команд управления в отсутствие сигнала на выходе демодулятора формируются последовательности нулей и единиц. Статистические параметры этих последовательностей определяются вероятностными характеристиками помех, действующих в канале [9].

Для выбранной модели гидроакустического канала связи вертикальной ориентации основным видом помех являются помехи типа случайного гауссова процесса с нулевым математическим ожиданием. Это позволяет принять гипотезу о независимом характере распределения ошибок в дискретном канале и считать, что в отсутствие сигнала появление символов «0» и «1» на выходе демодулятора равновероятно.

При стартстопном режиме передачи команда управления набирается из шумов, если при отсутствии передачи на выходе приемника двоичных сигналов формируется стартовая последовательность и одна из разрешенных кодовых комбинаций команды управления. Для рассматриваемого класса циклических (n, k) -кодов общее количество N кодовых комбинаций равно $N = 2^n$; из них только N_0 кодовых комбинаций используется для передачи: $N_0 = 2^k - 1$. Эти N_0 кодовых комбинаций называются разрешенными. В число разрешенных не входит кодовая комбинация, состоящая из одних нулей. Остальные $N - N_0 = 2^n - 2^k - 1$ кодовых комбинаций называются запрещенными и для передачи не используются.

С учётом указанного вероятность набора сигнала команды из шумов оценивается величиной

$$P_{н.ш} = 2^{-L} N_0 \cdot 2^{-(n-k)} = N_0 2^{-(L+n-k)}.$$

Принимая во внимание, что для большинства практических случаев $2^k \gg 1$, имеем

$$P_{н.ш} = N_0 2^{-(L+n-k)} \approx 2^k \cdot 2^{-(L+n-k)} = 2^{-(L+n)}.$$

Полагая, что $P_{н.ш} \leq 10^{-8}$, получаем, что суммарная $(L+n)$ длина M -последовательности и кодовой комбинации циклического (n, k) -кода должна выбираться из условия $-\lg P_{н.ш} \leq 8$ или из эквивалентного ему условия

$$(L+n) \geq \frac{8}{\lg 2} = 26,6.$$

Суммарная $(L+n)$ длина M -последовательности и кодовой комбинации циклического (n, k) -кода должна быть не менее 27 символов.

Сформулируем требования к циклическому (n, k) -коду.

Все известные методы практического решения проблемы помехоустойчивой передачи заключаются в использовании разного рода избыточности, вводимой в передаваемое сообщение. Различают два вида избыточности: кодовую и избыточность повторения.

Исходя из условия минимизации вероятности приема абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{н.о}$, в комбинированной системе СИД – ГАКС для передачи команд управления целесообразно использовать блочные корректирующие (n, k) -коды, обнаруживающие ошибки. Вероятность приема команды с необнаруженной ошибкой может быть снижена до сколь угодно малой величины путем увеличения количества проверочных символов $r = n - k$ в составе соответствующих кодовых комбинаций; здесь k – количество информационных символов в кодовой комбинации; n – длина кодовой комбинации.

Определим требуемую избыточность кода. Если ошибки в канале имеют независимый характер и появляются с вероятностью p , то вероятность приема кодовой комбинации из n элементов с ошибкой равна $P_{ош} = 1 - (1 - p)^n$.

При использовании корректирующих кодов все возможные случаи ошибочного приема комбинаций разделяются на обнаруживаемые ошибки и необнаруживаемые. Обнаруживающую способность кода характеризует коэффициент обнаружения ошибок $K_{обн} = 1 - 1/2^{n-k}$.

Вероятность приема кодовой комбинации с необнаруженной ошибкой $P_{о.н}$ равна

$$P_{о.н} = P_{о.ш} (1 - K_{обн}) = [1 - (1 - p)^n] / 2^{n-k}. \quad (5)$$

Выбор параметров циклического кода должен осуществляться исходя из допустимой вероятности приема абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{н.о доп}$, $P_{н.о доп} \geq P_{н.о}$ [10].

Выше отмечалось, что допустимая вероятность приема абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{н.о доп}$ должна выбираться из условия $P_{н.о} \leq 10^{-8}$.

Количество информационных символов в кодовой комбинации k выбирается исходя из требуемого количества передаваемых каждому из абонентов команд управления K . При $K \leq 25$ в составе информационной части кодовой комбинации следует зарезервировать для нумерации передаваемых команд по крайней мере пять двоичных разрядов, что позволит организовать передачу 31 команды управления.

Кодовое разделение сигналов предполагает, что все множество кодированных сигналов, используемых для передачи команд управления в сети гидроакустических донных автономных станций (ГДАС), разбивается на A подмножеств по числу абонентов сети (как уже отмечалось,

$A \geq 11$). Сигналы каждого из подмножеств используются для передачи команд управления соответствующему абоненту, остальные абоненты на сигналы данного подмножества не реагируют. Отличие в сигналах закладывается на структурном уровне, на этапе формирования сигнала.

Возможны два варианта организации разделения команд управления [8]. В первом синхронизирующая M -последовательность исполняет роль адреса абонента, а передаваемая за ней кодовая комбинация циклического кода служит для передачи номеров команд. Количество используемых M -последовательностей должно соответствовать количеству абонентов в сети. Разделение сигналов между абонентами осуществляется только по их адресам, а комбинации номеров команд могут совпадать. Необходимый алфавит сигналов, реализующий этот вариант кодового разделения, имеет объем

$$V = A + K, \quad (6)$$

где A – количество абонентов в сети; K – количество команд управления, передаваемых каждому абоненту.

Во втором варианте синхронизирующая последовательность может быть одинаковой для всех абонентов. Разделение сигналов между ними осуществляется по кодовым комбинациям номеров команд управления. При этом объем используемого алфавита – как и в (6), но с некоторой оговоркой. При первом варианте организации количество информационных символов k в кодовой комбинации должно выбираться исходя из количества команд K , передаваемых одному абоненту сети. При втором варианте организации передачи команд количество информационных символов k определяется не только количеством команд K , передаваемых каждому из абонентов, но и количеством абонентов A , объединенных в сеть: $k = f(K + A)$.

Применение первого варианта предпочтительно при небольшом количестве донных станций в сети (до 6), что связано небольшим объемом ансамбля M -последовательностей малой длины [8]. При большем количестве абонентов эффективность первого варианта падает, т. к. уже при $A \geq 9$ необходимо применять M -последовательности длиной $L \geq 127$, при $A \geq 18 - L \geq 255$; поэтому в разрабатываемой системе целесообразно применять второй вариант разделения сигналов [11], в котором различие сигналов закладывается в кодовые комбинации циклического кода. В этом случае количество информационных символов k в кодовых комбинациях циклического кода определяется не только количеством команд управления K , передаваемых каждому из абонентов, но и зависит от количества адресов A .

Количество абонентов в сети может быть более 12, не менее 10 МГАС и плюс 2 дополнительных абонента, роль которых поочередно могут исполнять обслуживающее судно и объект измерения. Таким образом, минимальное количество абонентов равняется 12. Для задания их адресов A в двоичной форме достаточно зарезервировать в составе информационной части кодовой комбинации четыре двоичных разряда, что позволяет различать в составе разрабатываемой системы 15 адресов.

Выше отмечалась целесообразность передачи в составе сигнала команды управления сигнала-идентификатора центральной станции (обслуживающее судно или объект измерения). Для передачи соответствующего идентификатора J представляется целесообразным зарезервировать в составе информационной части кодовой комбинации два двоичных разряда.

На каждую принятую команду управления абонент должен передать на центральную станцию сигнал квитанции, в котором должна присутствовать информация о номере абонента A , номере принятой абонентом команды K и признак исполнения абонентом данной команды. Ранее отмечалось, что для надёжного разделения сигналы команд управления и соответствующие им квитанции должны быть противоположны друг другу. С учётом этого обстоятельства следует предусмотреть выделение в составе информационной части одного бита E для передачи в составе сигнала квитанции признака исполнения абонентом команды управления.

С учётом высказанных соображений количество элементов k информационной части кодовой комбинации корректирующего циклического (n, k) -кода должно удовлетворять условию

$$k \geq A + K + J + D + E = 4 + 5 + 2 + 3 + 1 = 15.$$

Выбор количества проверочных символов n осуществляется в соответствии с выражением (5) исходя из допустимой вероятности приема абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{\text{н.о доп}} = 10^{-8}$.

$$P_{\text{н.о доп}} = 10^{-8} \geq \frac{[1 - (1 - p)^n]}{2^{n-k}} = \frac{2^k [1 - (1 - p)^n]}{2^n} = \frac{2^{16} [1 - (1 - p)^n]}{2^n}.$$

В силу малости вероятности искажения символа в канале p , $p \ll 1$, имеем

$$10^{-8} \geq \frac{2^{16} [1 - (1 - np)]}{2^n} = \frac{2^{16} np}{2^n}. \quad (7)$$

В реальных условиях $p \cong 10^{-3}$. Решая неравенство (7), получаем условие выбора длины кодовой комбинации циклического кода $n = 32$. На основании изложенного для передачи сигналов команд управления и квитанции следует применять корректирующий циклический код $(n, k) = (32, 16)$.

При выборе стартовой M -последовательности следует учесть, что длина M -последовательностей L может принимать значения $L = 2^m - 1$, где m – целое число.

В качестве синхронизирующей стартовой последовательности рекомендуется использовать M -последовательность длиной 31 символ. Поскольку для достижения надёжной цикловой синхронизации приём стартовой M -последовательности должен осуществляться дешифратором, который должен реализовываться программным способом на цифровом контроллере с 8- или 16-разрядной организацией, то целесообразно к указанной M -последовательности добавить ещё один дополнительный символ. Тогда длительность стартовой последовательности будет равна $L = 32$.

Применение в аппаратуре кода, обнаруживающего ошибки, в сочетании с приемом дешифратором стартовой синхронизирующей последовательности приводит к увеличению вероятности стирания кодовых комбинаций при декодировании.

Для увеличения надежности прохождения команд управления и их квитанций по каналу связи их передача должна осуществляться многократно [8, 12]. Сигнал команды (квитанции) будем считать принятым, если при его декодировании хотя бы в одной из кодовых комбинаций не обнаруживается ошибок.

Предлагается следующий алгоритм передачи команд управления.

С центральной станции (с обслуживающего судна или объекта измерения) передается сигнал команды управления, состоящий из N_1 повторяющихся пар: синхронизирующей последовательности и кодовой комбинации циклического (n, k) -кода. В приёмном устройстве абонента сигнал демодулируется, после обнаружения дешифратором синхронизирующей последовательности включается декодер циклического кода. Если в следующей за синхронизирующей последовательностью кодовой комбинации не обнаруживается ошибок, то команда считается принятой. Команда подается на исполнение, одновременно формируется и передается на центральную станцию сигнал квитанции, состоящий из N_2 повторяющихся пар, проинвертированных синхронизирующей последовательностью и кодовой комбинацией циклического (n, k) -кода принятой команды.

Прием сигнала квитанции на центральной станции осуществляется аналогично. При получении на центральной станции первой кодовой комбинации циклического кода, не искаженной помехами, квитанция считается принятой, оператору выдается сообщение.

Количество повторных передач пар синхронизирующей последовательности и кодовых комбинаций команд N_1 и квитанций N_2 должно выбираться таким образом, чтобы с вероятностью P_y не превышалось время управления t_y .

По определению [2]

$$t_y = T_{\text{ком}} + 2\Delta t + T_a + T_{\text{и}} + T_{\text{кв}} + T_c + T_{\text{инд}}, \quad (8)$$

где $T_{\text{ком}}$ – затраты времени на формирование сигнала команды управления; Δt – время распространения сигнала от центральной станции до абонента; T_a – затраты времени абонентом на прием команды управления; T_n – время на исполнение команды управления абонентом; $T_{\text{кв}}$ – затраты времени на формирование сигнала квитанции; T_c – затраты времени на прием квитанции на центральной станции; $T_{\text{инд}}$ – время на выдачу (индикацию) информации оператору об исполнении абонентом команды управления.

Очевидно, что при передаче команды сигнал не пройдет по кольцу управления «центральная станция – абонент – центральная станция» только в том случае, если ошибки обнаруживаются во всех N_1 парах стартовой синхронизирующей последовательности и кодовых комбинациях сигнала команды или во всех N_2 парах синхронизирующей последовательности и кодовых комбинациях сигнала квитанции. Полагая, что формирование сигналов команд управления и квитанций осуществляется одновременно с их передачей и что затраты времени на прием команды T_a и прием квитанции T_c , в расчете на наихудший случай, равны длительности сигнала команды и сигнала квитанции соответственно, получаем условие для выбора количества повторений N_1 и N_2 [11]:

$$\begin{cases} N_1 + N_2 \geq (t_{\text{с}} - 2\Delta t - T_n - T_{\text{инд}}) \frac{V}{(L+n)}, \\ P_y \geq \{[1 - (1-p)^{L+n}] (1 - \frac{1}{2^{n-k}})\}^{N_1} + \{[1 - (1-p)^{L+n}] (1 - \frac{1}{2^{n-k}})\}^{N_2}, \end{cases} \quad (9)$$

где V – скорость передачи, $V = 100$ бит/с.

Если положить $N_1 = N_2 = N$, то при совместном решении неравенств (9) при условиях, что вероятность ошибки в канале $p \leq 10^{-2}$, а время управления t_y , определенное согласно (8), будет превышено с вероятностью $P_y = 10^{-2}$, получаем $N \geq 5$. С учётом результатов экспериментальных исследований аппаратуры [1] положим количество повторных передач пар синхронизирующей последовательности и кодовой комбинации циклического (n, k) -кода в составе сигнала команд управления и квитанций равным шести: $N = 6$.

С учётом результатов выполненного анализа структура сигналов команд управления и квитанций приобретает вид, представленный на рис. 1 и 2.

M	K	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K	M	K
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 1. Структура сигналов команд управления и квитанций:
 M – стартовая синхронизирующая последовательность;
 K – кодовая комбинация циклического кода (32,16)

J	J	A	A	A	A	K	K	K	K	K	D	D	D	E	R
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Рис. 2. Распределение 16 информационных символов кодовой комбинации циклического кода (32,16):
 J – идентификатор центральной станции; A – символы, используемые для задания адреса абонента;
 K – символы, используемые для задания номера команды; N – символы, используемые для задания номера кодовой комбинации (№ пары) в составе сигнала команды управления или квитанции;
 E – служебный символ, используемый для передачи на судно признака неисполнения абонентом принятой команды управления; R – резервный символ

Алгоритм измерения дистанции

Суть метода для рассматриваемого случая заключается в измерении времени распространения Δt акустического сигнала от центральной станции до абонента и расчётного определения дистанции D между ними [13].

Для определения времени распространения Δt акустического сигнала от центральной станции до абонента должно осуществляться измерение временного интервала ΔT между моментом времени t_1 начала передачи с центральной станции команды управления и моментом времени t_2 приёма центральной станцией от абонента сигнала соответствующей квитанции.

Для этого в момент начала передачи сигнала команды управления, состоящий из шести пронумерованных пар синхронизирующей стартовой последовательности – кодовой комбинации циклического кода (32,16), на центральной станции должен быть запущен счётчик измерения временного интервала ΔT .

В приёмном устройстве абонента осуществляется приём сигнала команды управления. При обнаружении кодовой комбинации, не искажённой помехами, определяется порядковый номер N этой кодовой комбинации в составе сигнала команды управления. У абонента включается таймер переменной задержки, который обеспечивает выдачу своего выходного сигнала спустя время $T_{\text{зад}}$ после приёма сигнала команды управления (после обнаружения первой не искажённой помехами кодовой комбинации с номером N). Длительность времени задержки $T_{\text{зад}}$ задаётся из условия

$$T_{\text{зад}} = (6 - N) \frac{L + n}{V},$$

где L – длина синхронизирующей стартовой последовательности, $L = 32$; n – длина кодовой комбинации циклического кода (32,16), $n = 32$; V – скорость модуляции, $V = 100$ бит/с.

После срабатывания таймера команда подаётся на исполнение. Спустя промежуток времени T_0 , отведенный на исполнение команды, после приёма команды управления от абонента на центральную станцию передаётся сигнал квитанции, также состоящий из шести пронумерованных пар синхронизирующей стартовой последовательности – кодовая комбинация циклического кода (32,16).

На центральной станции осуществляет прием сигнала квитанции. При обнаружении кодовой комбинации, не искажённой помехами, останавливается счётчик измерения временного интервала ΔT , определяется порядковый номер N этой кодовой комбинации в составе сигнала квитанции. Число, соответствующее длительности временного интервала ΔT , и номер N используются для расчёта дистанции D до ГДАС по формуле

$$D = \frac{C}{2} \left(\Delta T - \frac{6(L + n)}{V} - \frac{N(L + n)}{V} \right),$$

где C – скорость звука в воде.

Выводы

По результатам исследования:

– комбинированную систему СИД – ГАКС предложено рассматривать в качестве многостанционной системы связи, в которой обслуживающее судно и объект измерения могут поочередно выполнять функции центральной станции. Многофункциональные гидроакустические автономные станции, а также обслуживающее судно или объект измерения, если они в данный момент времени не выполняют функции центральной станции, являются абонентами центральной станции;

– в качестве сигналов команд управления и квитанций предложено применять шестикратно повторяемые двоичные последовательности, каждая из которых состоит из синхронизирующей стартовой последовательности длительностью $L = 32$ символа и кодовой комбинации корректирующего циклического кода (32,16). Выбор системы сигналов для передачи команд управления и квитанций осуществлён из условий обеспечения:

- вероятности приёма абонентом команды управления с необнаруженной ошибкой $P_{\text{но}} \leq 10^{-8}$;
 - вероятности ложного приёма команды абонентом при отсутствии её передачи $P_{\text{л.пр}} \leq 4 \cdot 10^{-7}$;
 - вероятности набора сигнала вызова абонента $P_{\text{н.ш}} \leq 10^{-8}$;
 - вероятности непрохождения сигнала по кольцу управления «центральная станция – абонент – центральная станция» при однократной передаче команды управления $P_y \leq 10^{-2}$.
- показана реализация в разрабатываемой системе алгоритма измерения дистанции, совмещённого с передачей команд управления, что позволяет измерять дистанцию при любом обмене сигналами между центральной станцией и абонентом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чверткин Е. И. Гидроакустическая телеметрия в океанологии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1978. 148 с.
2. Тарасюк Ю. Ф. Гидроакустическое телеуправление. Л.: Судостроение, 1985. 200 с.
3. Шумоподобные сигналы в системах передачи информации / под ред. В. Б. Пестрякова. М.: Сов. радио, 1973. 424 с.
4. Варакин Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. М.: Радио и связь, 1985. 384 с.
5. Венедиктов М. Д., Марков В. В., Эйдуз Г. Г. Асинхронные адресные системы связи. М.: Связь, 1968. 231 с.
6. Варакин Л. Е., Рябов Е. А. Оптимизация стартстопной асинхронной системы передачи информации с шумоподобными сигналами // Тр. учеб. ин-тов связи. Теория передачи сигналов по каналам связи. 1979. С. 3–11.
7. Евтюнов А. П., Митько В. Б. Примеры инженерных расчетов в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1981. 256 с.
8. 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.
9. 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.
10. Евтюнов А. П., Колесников А. Е., Ляликов А. П. и др. Справочник по гидроакустике. Л.: Судостроение, 1982. 344 с.
11. Криволапов Г. И., Чернецкий Г. А. Выбор сигналов для сети телеуправления // Междунар. конф. «Информатика и проблемы телекоммуникаций»: тез. докл. Новосибирск, 1995. С. 51–53.
12. Криволапов Г. И., Макаров А. А., Постников Н. И., Чернецкий Г. А. Некоторые результаты испытаний АГАС для управления и диагностики ДСС // Методика и техника сейсмоакустических и вибросейсмических исследований на акваториях: сб. науч. тр. Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1988. С. 17–25.
13. Филиппов Б. И. Определение наклонной дальности между судном и донной станцией // Вестн. Рязан. гос. радиотехн. ун-та. 2016. № 55. С. 33–40.

Статья поступила в редакцию 6.06.2016

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

ALGORITHM OF FUNCTIONING OF THE SYSTEM OF DISTANCE MEASUREMENT USING HYDROACOUSTIC CHANNEL OF COMMUNICATION

Abstract. The objects of the research are the principles and methods of creation of the combined system of distance measurement (SDM) and signal transmission of control and digital information on hydroacoustic communication channel (HACC) of vertical orientation. The aim of the research is to study the ways of creation of the combined system SDM – HACC used as a part of an operational hydroacoustic complex. The choice of the system of signals and the method of distance measurement is made. The algorithm of the combined system SDM – HACC constructed on the principles of asynchronous and address transmission code-division of signals and combination of operation of distance measurement with control signal transmission is developed. At the same time in terms of exchanging the signals, the combined system SDM – HACC can be considered as a multi-station information network (communication network), where the servicing vessel and the object of measurement can execute functions of the central (carrying) station, but all the remaining elements of the system are its subscribers (subordinate stations). As signals of control instructions and receipts it is offered to apply the six times repeated binary sequences, each of which consists of the synchronizing start sequence 32 characters and a codeword length correcting cyclic code (32,16). The choice of the system of signals for transmission of control instructions and receipts is carried out from probability support conditions: reception by the subscriber of control instruction with an undetected error $P_{u.e} \leq 10^{-8}$; false reception of a command by the subscriber in the absence of its transmission $P_{f.re} \leq 4 \cdot 10^{-7}$; a set of a call signal of the subscriber $P_s \leq 10^{-8}$; fadeout of a signal on a control ring "a central office – a subscriber – a central office" by one-fold transmission of control instruction $P_c \leq 10^{-2}$. Implementation in the developed system of the algorithm of the distance measurement combined with transmission of control instructions is shown; it allows to measure a distance in case of any exchange of signals between a central office and a subscriber.

Key words: hydroacoustic communication channel, system of distance measurement, multi-function hydroacoustic station, control instructions.

REFERENCES

1. Chvertkin E. I. *Gidroakusticheskaja telemekhanika v okeanologii* [Hydroacoustic telemetry in oceanology]. Leningrad, Izd-vo LGU, 1978. 148 p.
2. Tarasiuk Iu. F. *Gidroakusticheskoe teleupravlenie* [Hydroacoustic telecontrol]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1985. 200 p.
3. *Shumopodobnye signaly v sistemakh peredachi informatsii* [Noise-type signals in information transmission systems]. Pod redaktsiei V. B. Pestriakova. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1973. 424 p.
4. Varakin L. E. *Sistemy svyazi s shumopodobnymi signalami* [Communication systems with noise type signals]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 384 p.
5. Venediktov M. D., Markov V. V., Eidus G. G. *Asinkhronnye adresnye sistemy svyazi* [Asynchronous address communication systems]. Moscow, Svyaz' Publ., 1968. 231 p.
6. Varakin L. E., Riabov E. A. Optimizatsiia startstopnoi asinkhronnoi sistemy peredachi informatsii s shumopodobnymi signalami [Optimization of a start-stop asynchronous information transmission system with noise-type signals]. *Trudy uchebnykh institutov svyazi. Teoriia peredachi signalov po kanalam svyazi*. 1979. P. 3–11.
7. Evtiunov A. P., Mit'ko V. B. *Primery inzhenernykh raschetov v gidroakustike* [Examples of engineering calculations in underwater acoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1981. 256 p.
8. *Razrabotka printsipov i ustroystv peredachi geofizicheskoi informatsii po gidroakusticheskomu kanalu svyazi* [Development of the principles and devices of transmission of geophysical information on to 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.
9. Filippov B. I., Chernetskii G. A. Analiz statisticheskikh kharakteristik signalov i pomekh v gidroakusticheskikh kanalakh svyazi [The analysis of statistical characteristics of signals and hindrances in hydroacoustic communication channels]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Upravlenie, vychislitel'naia tekhnika i informatika*, 2015, no. 3, pp. 78–84.
10. Evtiunov A. P., Kolesnikov A. E., Lialikov A. P. i dr. *Spravochnik po gidroakustike* [Reference book on hydroacoustics]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1982. 344 p.

11. Krivolapov G. I., Chernetskii G. A. Vybor signalov dlia seti teleupravleniia [The choice of signals for a telecontrol network]. *Mezhdunarodnaia konferentsiia «Informatika i problemy telekommunikatsii». Tezisy dokladov*. Novosibirsk, 1995. P. 51–53.

12. Krivolapov G. I., Makarov A. A., Postnikov N. I., Chernetskii G. A. Nekotorye rezultaty ispytaniia AGAS dlia upravleniia i diagnostiki DSS [Some results of tests of AGAS for management and diagnostics of DSS]. *Metodika i tekhnika seismoakusticheskikh i vibroseismicheskikh issledovaniia na akvatoriiakh. Sbornik nauchnykh trudov*. Novosibirsk, VTs SO AN SSSR, 1988. P. 17–25.

13. Filippov B. I. Opredelenie naklonnoi dal'nosti mezhdu sudnom i donnoi stantsiei [Determination of inclined range between the vessel and ground station]. *Vestnik Riazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta*, 2016, no. 55, pp. 33–40.

The article submitted to the editors 6.06.2016

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.

