

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ГИДРОАКУСТИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ БОЛЬШОЙ ДАЛЬНОСТИ ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ

Ю.В. Матвиенко, И.Н. Бурдинский

Гидроакустические навигационные системы большой дальности действия (ГАНС БД) предназначены для высокоточного определения местоположения АНПА, выполняющих длительные миссии при значительных удалениях (до 500 км) от приемопередающих устройств. Создание таких систем связано с выбором структуры сложных сигналов при использовании гидроакустических маяков или излучателей, стационарно размещенных в прибрежной полосе вдали от района нахождения объекта навигации. На основе классического уравнения дальности гидроакустики решается оптимизационная задача, состоящая в определении точностных и энергетических характеристик M -последовательностей различной длины и отношении сигнал/шум в зависимости от уровня излучения сигналов. Путем сравнительного анализа известных методов построения дальномерных навигационных систем большой дальности получены оценки достижимых отношений сигнал/шум при различных вариантах построения схемы обработки для M -последовательностей различной длины. По экспериментальным данным рассчитываются отношения сигнал/шум в точке приема сигналов при различных дальностях и типах сигналов. Показано, что оптимизация энергетических характеристик ГАНС БД, а также трактов приема и обработки сигналов достигается при использовании M -последовательностей средней длины ($M = 127$).

Ключевые слова: гидроакустические навигационные системы, подводные аппараты, гидроакустические маяки, псевдослучайные сигналы, M -последовательности, приемо-излучающие устройства.

ВВЕДЕНИЕ

Определение местоположения подводных аппаратов (ПА) в глубоком море, как правило, обеспечивается их бортовыми навигационными средствами, а необходимая точность позиционирования достигается комплексированием автономных бортовых средств с внешними навигационными средствами [1, 2]. Среди последних наиболее точными являются гидроакустические средства, и их реализация относится к числу важнейших предметов исследований. Большое распространение получили гидроакустические навигационные системы с длинной базой, основанные на точных измерениях дальности объекта навигации от ряда опорных точек (маяков-ответчиков или синхронных излучателей), предварительно установленных в районе работ. При этом координаты маяков могут быть известны перед началом работ на борту подводного аппарата или передаваться от маяков на ПА по гидроакустической линии связи [3]. Сами маяки могут быть стационарными донными [3, 4] или нестационарными – поверхностными дрейфующими

[5]. Нестационарные маяки обладают дополнительными средствами для определения своих текущих координат и информационного обмена с пунктом управления, например, имея средства спутниковой навигации и связи, с размещением элементов маяков на поверхности моря [6].

Работа дальномерных систем возможна также при наличии только одного опорного маяка [7, 8] с измерением дальности до маяка из ряда точек специальной траектории аппарата, которую он выполняет для решения навигационной задачи путем накопления траекторных дальномерных данных. Однако применение таких маяков с их постановкой для поддержки навигации оказывается оправданным при выполнении продолжительных работ в локальном районе, размер которого соизмерим с дальностью действия маяков, которая, для известных систем, не превышает 10–15 км. Одиночный опорный гидроакустический маяк, служащий в качестве средства для внешней навигационной коррекции может быть размещен на борту судна, связан с ним кабельной линией и выполнен в виде буксируемого устройства,

координаты которого определяются средствами судовой навигации и передаются по гидроакустическому каналу на борт ПА в составе навигационных сигналов излучаемых маяком. Судно может сопровождать движущийся ПА, что снимает ограничения на дальность автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) [9].

При выполнении длительной протяженной миссии обеспечение навигации возможно также путем применения относительно редкой сети установленных по трассе движения радиогидроакустических маяков-ретрансляторов большой дальности действия, снабженных средствами спутниковой навигации и связи. Каждый из маяков обеспечивает информационный обмен с ПА по гидроакустическому каналу связи. Маяки содержат большую по размеру приемопередающую аппаратуру низкочастотного (НЧ) канала гидроакустической связи с большой дальностью действия и малоразмерную приемопередающую аппаратуру высокочастотного (ВЧ) канала гидроакустической связи с малой дальностью. При этом на ПА, наряду с бортовой системой счисления, размещают малоразмерную приемопередающую аппаратуру ВЧ канала гидроакустической связи с маяком-ретранслятором, а также малоразмерную приемную аппаратуру НЧ канала гидроакустической связи с маяком. Формирование редкой сети маяков, выставляемых по трассе движения ПА, достигается за счет их размещения в точках предполагаемых обсерваций, а период обсерваций устанавливается временем, в течение которого формируемая ошибка счисления координат ПА не превысит дальности действия НЧ канала гидроакустической связи [10].

1. Гидроакустические дальномерные системы большой дальности

В последнее время предложены принципиально иные методы создания дальномерных ГАНС для высокоточного способа позиционирования подводных аппаратов в глубоком море путем определения их местоположения по дальномерным данным от гидроакустических маяков или излучателей, стационарно размещенных в прибрежной полосе на значительном удалении от района нахождения объекта навигации [11]. В работе [12] предложен способ гидроакустической дальнометрии, который обеспечивает возможность создания нового поколения высокоточных гидроакустических навигационных систем с большим радиусом действия. Способ позволяет увеличить их дальность действия, повысить точности позиционирования, расширить функциональность и повысить

надежность. В таких системах используются фазоманипулированные импульсные сигналы, излучаемые гидроакустическими маяками, размещенными вблизи побережья. Дополнительным достоинством систем является возможность передачи навигационных сигналов и команд управления на подводные объекты, аппаратура которых работает только в режиме приема.

Каждый маяк излучает индивидуальный низкочастотный шумоподобный навигационный сигнал в системе единого времени маяков и ПА, копии излучаемых сигналов и координаты маяков хранятся в памяти бортового вычислителя координат ПА. Бортовым акустическим приемником ПА определяются времена распространения сигналов до каждого маяка и рассчитывается результирующее значение текущей дальности от каждого маяка на основе измерений времени распространения и скорости распространения сигналов. Эта технология может применяться для позиционирования подводных объектов на больших дальностях от береговой черты, когда необходимо провести корректировку автономной бортовой навигации ПА и сбросить накопленную ошибку счисления, и позволяет осуществлять одновременное позиционирование нескольких ПА в любых метеоусловиях и в условиях скрытности [13].

Увеличение дальности действия такой системы требует снижения рабочих частот излучаемых сигналов ввиду их меньшего затухания в среде или увеличения мощности излучения. Это неизбежно ведет к увеличению массогабаритных характеристик гидроакустических излучателей и потребляемой электрической мощности. Целесообразно ограничить в допустимых пределах мощность излучения за счет использования низкочастотных сложных сигналов с характерной для их структуры увеличенной длительностью навигационной посылки и выигрыша в отношении сигнал/помеха, получаемом при обработке сигнала.

Для выделения полезного сигнала, пришедшего от излучателя в точку приема, и ослабления влияния переотраженных сигналов на процесс измерения дистанции, а также для увеличения дальности действия используют низкочастотные сложные сигналы и взаимно-корреляционную обработку излученного и принятого полезного сигнала. Результатом корреляционной обработки является импульсная характеристика канала распространения сигнала, которая представляет собой амплитудно-временную зависимость, отражающую последовательность прихода в точку приема прошедшей по различным траекториям в среде энергии излученного маяком акустического сигнала. Структура импульсной характеристики и времена

приходов используются затем при расчете дистанций между излучателем и приемником по известным методикам, например [14].

Применение сложных шумоподобных сигналов в системе позиционирования обусловлено их свойствами, в частности хорошими автокорреляционными свойствами, благодаря которым при излучении достаточно длинного импульса в процессе обработки принятый акустический сигнал может быть «свернут» в короткий импульс, обеспечивающий высокое временное разрешение и отношение сигнал/шум в приемном тракте, возможность на этой основе эффективной борьбы с многолучевым характером распространения сигналов в условиях шельфа, а так же идентификации одновременно работающих излучателей при одном и том же типе сигнала [15]. Одним из эффективных способов получения сложных сигналов является модуляция несущей частоты излучения последовательностью максимальной длины (М-последовательность).

В навигационных системах нового поколения в качестве навигационных используют низкочастотные кодоимпульсные фазоманипулированные сигналы типа М-последовательностей большой длительности, состоящих из М элементарных символов равной длины, фазы несущих частот которых 0 или 180 градусов меняются по законам, задаваемым индивидуальными кодовыми комбинациями. М-последовательности обладают ортогональными свойствами, что позволяет применять их дополнительно для передачи информационных сообщений [16].

2. Энергетическая оценка навигационных сигналов в ГАНС БД

Для практической реализации навигационных систем с использованием синхронного излучения мощных низкочастотных сигналов крайне важным представляется оценка их энергетических характеристик. Не вдаваясь в особенности искажений навигационных сигналов, обусловленных условиями распространения, выполним расчеты уровня сигнала и отношения сигнал/шум в точке приема на основе классического уравнения дальности гидроакустики [17]. Задачами исследования являются:

- определение уровня излучения для уверенного приема сигналов на заданной дальности в глубоком море при излучении из мелководной части;
- оценка инструментальной ошибки определения времени прихода навигационного сигнала;
- оценка энергии для излучения одного навигационного импульса, выбор наиболее предпочти-

тельных с энергетической точки зрения М-последовательностей с учетом особенностей практической реализации систем их обработки.

Параметрами сигналов являются: уровень излучения P , частота несущей F , число символов – М, используемых для кодировки, и число периодов несущей частоты на передаваемый символ – k . При этом длительность импульсного сигнала может варьироваться как за счет использования последовательностей с большим или меньшим числом символов М, так и за счет увеличения числа периодов несущей частоты на передаваемый символ. Далее в качестве навигационного сигнала будем использовать М-последовательность фазоманипулированных сигналов, символы одинаковой длины, имеют фазы 0 и 180°, число символов последовательности от 1 до 1023, общая длина сигнала фиксирована.

Для определения отношения сигнал/шум в точке приема будем рассматривать энергетические характеристики. Известно [18], что на выходе оптимального приемника отношение сигнал /шум определяется выражением:

$$SNR = \frac{\text{энергия сигнала}}{\text{спектральная плотность шума}}$$

Для одиночного символа М-последовательности его можно переписать с учетом уравнения дальности, которое определяет уровень сигнала в точке приема, в виде:

$$SNR = 20 \lg P + 10 \lg T_{Om} - PP - (10 \lg \Delta F + УП). \quad (1)$$

Входящие в состав этого выражения величины кроме уровня излучения зависят от потерь распространения, длительности символа и полосы приемника УП-уровня помех (шума). В дальнейшем расчет уровня излучения в децибелах осуществляется относительно базового давления, равного 1 мкПа.

При установленной мощности источника и спектральной плотности помех, заданной на частоте несущей, для М-последовательностей равной длительности (фактически равной излучаемой энергии), но с разным числом символов, рассчитаем, следуя (1), отношения сигнал/шум на входе корреляционного приемника. Понятно, что усложнение сигнала и увеличение его информационной емкости при увеличении числа М сопровождается пропорциональными энергетическими потерями.

Заметные потери в энергетике для сложного сигнала компенсируются корреляционной обработкой по всей длине последовательности, причем порядок обработки следует пояснить. Можно рассматривать два варианта возможной корреляционной обработки.

1. Корреляция, при которой определяются характеристики сигнала с использованием опоры на несущей частоте на интервале длительности символа, и далее выполняется корреляционное декодирование с использованием опорного кодового слова, заданного структурой М-последовательности на интервале длительности последовательности, назовем этот вариант символьной обработкой.

2. Корреляционная обработка на интервале длительности последовательности с использованием опоры на несущей частоте, сформированной опорным кодовым словом, заданным структурой М-последовательности – назовем этот вариант обработкой по несущей или классической корреляцией.

Рассмотрим результат формирования сигнала в точке приема на различных примерах реализации М-последовательностей.

Символьная обработка предполагает определение фрагментов сигнала по каждому символу и, при принятии решения об обнаружении, осреднение их по числу символов – фактически это классический вариант некогерентного накопления. Выигрыш при такой обработке пропорционален корню из числа символов, из которых состоит М-последовательность.

Обработка по несущей заключается в том, что принятый сигнал с заданным числом символов и заданной длительности сворачивается с опорой такой же длительности, что фактически обеспечивает когерентное накопление данных при обработке отдельных символов последовательности. Выигрыш при такой обработке пропорционален числу символов.

Необходимо также отметить, что при работе с цифровыми массивами данных и относительно низкой частоте дискретизации возникают проблемы расчета корреляции по несущей, связанные с точным учетом начальной фазы входного сигнала. Как из-

вестно, на практике, особенно в случае применения фазоманипулированных сигналов со значениями фаз 0 и 180°, в реализации очень эффективны модульные корреляторы [19]. При этом обработка данных ведется по двум квадратурным каналам, в которых опора записана, например, со сдвигом на четверть периода несущей, с выбором в качестве решения максимального значения или модуля. Однако вследствие неопределенности начальной фазы (максимальная фазовая ошибка зависит от частоты дискретизации и будет составлять половину четверти периода) значение функции корреляции уменьшается на величину, равную значению синуса угла фазовой неопределенности (угол в нашем случае составляет 45°), равной 3 дБ.

Выигрыши в отношении сигнал/шум, обусловленные оптимальной обработкой с выбором оптимальных значений полосы приемника, представлены в табл. 1. При этом значения SNR нормированы значением при $M = 1023$.

КУсим – коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с символьной обработкой, КУнес – коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с обработкой по несущей, КУмод – коэффициент усиления (выигрыш) при выполнении корреляции с модульной обработкой. Нижняя строка табл. 1 фактически является основной энергетической оценкой, на основании которой необходимо выбирать структуру навигационного сигнала. Итоговый результат имеет ясный физический смысл. Энергия М-последовательности заданной длительности не зависит от числа М, шум в точке приема растет с увеличением полосы приемника, т. е. с увеличением М, и именно этот фактор определяет выигрыш при суммарной обработке данных.

Таблица 1. Результаты оптимального выбора соотношения сигнал/шум

М	1023	511	255	127	63	31	15	7	1
T_{ом}, с	0,01	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32	0,64	1,28	10,0
ΔF, Гц	200	100	50	25	12,5	6,25	3,125	1,56	0,1
SNR	1	4	16	64	256	1024	4096	16384	10×6
SNR, дБ	0	6	12	18	24	30	36	42	60
КУнес, дБ	30	27	24	21	18	15	12	9	0
КУсим, дБ	15	13,5	12	10,5	9	7,5	6	4,5	0
КУмод, дБ	27	24	21	18	15	12	9	6	-3
Сумма, дБ	30	33	36	39	42	45	48	51	60

Далее используем полученные оценки для анализа конкретной системы. Примем, что дальность действия ГАНС БД должна составлять 500 км, несущая частота 400 Гц, а спектральная плотность шумов моря на этой частоте равна 60 дБ. В качестве навигационного сигнала будем использовать М-последовательность фазоманипулированных сигналов, символы одинаковой длины, имеют фазы 0 и 180°, число символов последовательности от 7 до 1023, общая длина сигнала фиксирована и составляет 4096 периодов несущей – чуть более 10 с.

Наиболее важной характеристикой предлагаемой навигационной системы является оценка уровня излучения для уверенного приема сигналов на дальности до 500 км в глубоком море при их излучении из мелководной части. Уровень принимаемого сигнала, кроме того, будет определять инструментальную ошибку времени прихода навигационного сигнала.

Предполагаем, что при распространении сигнала по мелководной части потери распространения определяются сферическим законом, а в глубоком море при затягивании сигнала на ось подводного звукового – цилиндрическим.

Кроме того, пусть мелководный участок имеет длину 10 км, тогда потери на распространение составят 80 дБ, а при распространении по трассе от 10 до 500 км добавляются потери примерно 17 дБ.

Потери на поглощение на частоте 400 Гц составляют примерно 3–5 дБ, поэтому будем оценивать общие потери в мелководной части для упрощения величиной 20 дБ.

Сначала оценим энергетику источника, излучающего длинный тональный сигнал. Пусть излучатель излучает тональный сигнал с уровнем излучения 100 Па и длительностью 1 с. Тогда на дистанции 10 км при приеме сигнала в полосе 1 Гц получим исходя из (1) в точке приема значение $SNR = 20$ дБ, принимая, что уровень шума УП = 60 дБ и потери распространения ПР = 80 дБ.

Если длительность тонального сигнала составляет 10 с, уровень излучения 100 Па, полоса приема 0,2 Гц, то уравнение дальности изменится, и для дистанции 10 км получим, исходя из (1), в точке приема значение $SNR = 37$ дБ. Рост SNR происходит за счет увеличения времени приема относительно 1 с, что соответствует росту на 10 дБ, и за счет уменьшения полосы приема относительно 1 Гц, что соответствует росту на 7 дБ.

Соответственно на дальности 500 км будем иметь $SNR = 37 - 20 = 17$ дБ. Это означает, что длинный тональный сигнал можно использовать для навигации на дальности 500 км при уровне излучения 100 Па

(около 100 мВт мощности). При этом ошибка измерения времени прихода будет около 1 с и по дальности соответственно около 1,5 км.

Далее рассчитаем отношение сигнал/шум для ряда сигналов М-последовательностей и при различной мощности источника. Посмотрим, что формируется в точке приема на различных примерах реализации М-последовательностей.

Пусть сигнал М-последовательность с числом $M = 1023$, каждый символ состоит из 4 периодов несущей. Излучаем 100 Па, длительность символа 10 мс, полоса приема 200 Гц. Тогда значение отношения сигнал/шум для одиночного символа при дистанции 10 км составит $SNR = -23$ дБ. Падение SNR происходит за счет уменьшения длительности символа относительно 1 с, что соответствует потере на 20 дБ, и за счет увеличения полосы приема относительно 1 Гц полосы приема, что соответствует потере на 23 дБ.

Соответственно для дистанции 500 км значение отношения сигнал/шум для одиночного символа составит $SNR = -43$ дБ.

Отношение сигнал/шум в точке приема на дальности 500 км на выходе схемы символьной обработки (которая дает выигрыш 15 дБ) составит $SNR = -28$ дБ. Отношение сигнал/шум на выходе обработки по несущей составит соответственно -13 дБ. Естественный способ увеличения отношения сигнал/шум – это увеличение мощности источника.

Аналогично формируются оценки для М-последовательностей: при $M = 127$ каждый символ состоит из 32 периодов несущей, при $M = 63$ каждый символ состоит из 64 периодов несущей, при $M = 8$ каждый символ состоит из 512 периодов несущей.

Полученные результаты приведены в таблице 2. Отметим также еще две характеристики: энергию, отбираемую от источника при излучении каждого сигнала, значение которой составит, и инструментальное разрешение времени прихода.

Как следует из приведенных расчетов, для достижения высокой точности измерения времени прихода навигационных сигналов необходимо уменьшать длительность элементарных символов и увеличивать мощность излучения. Если задаться величиной относительной ошибки измерения дальности, например (30–40 мс), формируемой за счет инструментальной ошибки измерения времени, то высокую точность (50 м на дальности 500 км) можно получить уже при $M = 127$, длительности символа 80 мс, реализации более простой символьной корреляции и уровне излучения 1000 Па (180 дБ, 10 Вт акустической мощности). При корреляции по несущей с использованием модульной обработки при $M = 127$,

Таблица 2. Оценки для M-последовательностей при различных значениях числа символов M

Сигналы – число символов, M	1023	127	63	8	1
Длительность символа, с	0,01	0,08	0,16	1,25	10
Полоса приема, Гц	200	25	12,5	2	0,2
Уровень излучения, Па	5000	1000	1000	300	100
Энергия от источника, Дж	2500	100	100	10	1
Отношение SNR в точке приема, дБ:					
Один символ	-9	-5	1	9	17
Символьная корреляция	6	5,5	10	13,5	17
Корреляция по несущей	21	16	19	18	17
Модульная обработка	18	13	16	15	14
Ошибка измерения времени, мс:					
Один символ	–	–	160	420	1200
Символьная корреляция	5	40	50	250	1200
Корреляция по несущей	1	10	20	130	1200
Модульная обработка	1,4	14	28	182	1680

длительности символа 80 мс и уровне излучения 1000 Па получим при приеме отношение сигнал/шум 13 дБ и инструментальную ошибку измерения дальности около 20 м.

3. Энергетические оценки в экспериментальных данных

Был обработан ряд данных, полученных в ходе экспериментальных работ, направленных на создание ГАНС БД. Сигналы излучались из прибрежной полосы. Прием велся в глубоком море на удалении 100, 200 и 330 км. Уровень излучения (мощность) был постоянным, частота несущей составляла 400 Гц. Приемник имел рабочую полосу 200 Гц для оптимального приема M-последовательности с числом символов 1023, при длительности символа 0,01 с. Оценивалось отношение сигнал/шум в точке приема при излучении различных последовательностей с числом M, равным 1023, 127 и 63 символа. Расчет отношения SNR выполнялся на выходе коррелятора классическим (по несущей) методом как отношение максимума корреляционной функции в интервале приема сигнала к значению этой функции на интервале 10 с в отсутствие сигнала.

На рис. 1–3 приведены рассчитанные зависимости SNR в децибелах для последовательности из сорока 5-минутных интервалов N, в каждом из которых излучались сигналы с M = 1023, M = 127 и M = 63, длительностью порядка 10 с.

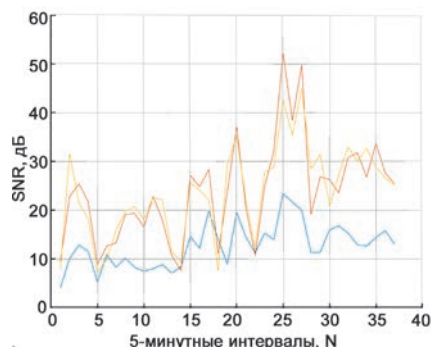


Рис. 1. Дальность 100 км. Синий график: M = 1023, красный: M = 127, желтый: M = 63

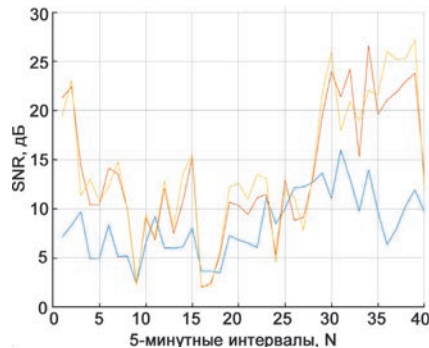


Рис. 2. Дальность 200 км. Синий график: M = 1023, красный: M = 127, желтый: M = 63.

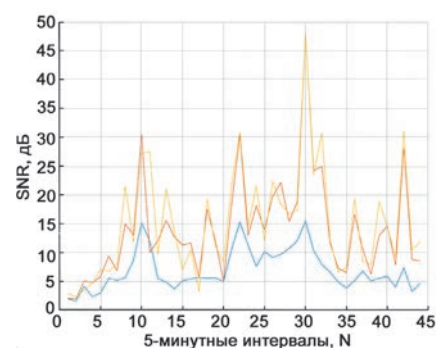


Рис. 3. Дальность 330 км. Синий график: M = 1023, красный: M = 127, желтый: M = 63

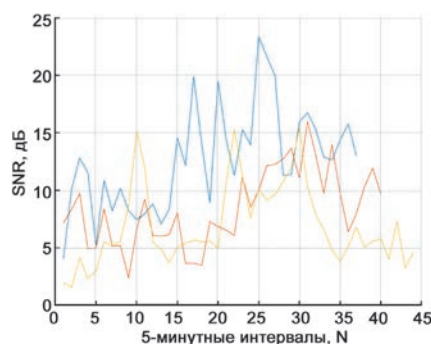


Рис. 4. Последовательность M = 1023. Синий график: 100 км, красный: 200 км, желтый: 330 км

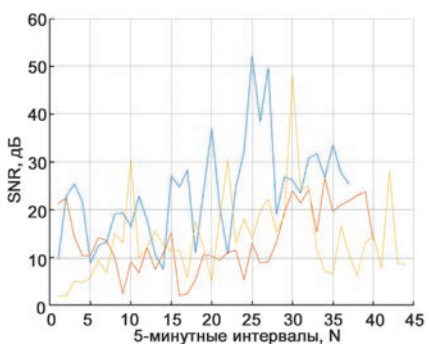


Рис. 5. Последовательность M = 127. Синий график: 100 км, красный: 200 км, желтый: 330 км

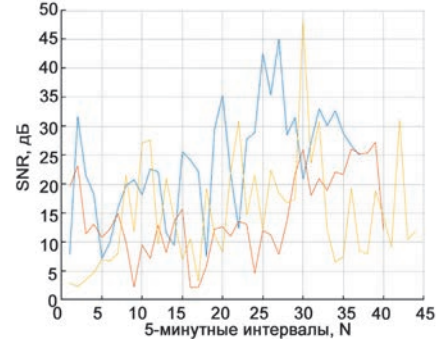


Рис. 6. Последовательность M = 63. Синий график: 100 км, красный: 200 км, желтый: 330 км

На рис. 4–6 приведены полученные при проведении тех же экспериментов оценки отношения SNR для различных M -последовательностей в зависимости от дальности.

ВЫВОДЫ

При сравнении отношения сигнал/шум в точке приема ряда излучаемых M -последовательностей на различных дальностях графики SNR, приведенные на рис. 1–3, для всех M на всех дистанциях идентичны и близки по t -величине, при этом уровень для $M = 1023$ ниже на 3–5 дБ уровня для $M = 127$ и $M = 63$. Это соответствует приведенным выше оценкам, поскольку для последовательностей разной длины потери энергии при уменьшении длительности символа компенсируются когерентной обработкой всех символов. Отметим также, что в проведенных экспериментах не была выполнена частотная фильтрация для оптимального приема символов различной длительности, за счет которой энергетически сигналы с меньшим M предпочтительны. Меньший

уровень SNR для $M = 1023$ объясняется недостаточным согласованием тракта излучения (излучателя с устройством согласования и усилителем мощности) с частотной полосой коротких символов этой последовательности.

При сравнении SNR каждой M -последовательности на различных дальностях (рис. 4–6) можно оценить потери энергии при распространении в глубоководном участке моря. При изменении дальности от 10 до 330 км в случае сферического закона имеем потери около 10 дБ, а в случае цилиндрического около 3 дБ. В экспериментах наблюдаем 1–4 дБ, что согласуется с введенными ранее допущениями.

Приведенные оценки и выполненный анализ могут быть полезны разработчикам гидроакустических навигационно-информационных систем большой дальности, основанных на использовании сложных сигналов.

Авторы считают своим долгом выразить глубокую признательность сотрудникам ТОИ ДВО РАН за их усилия по созданию навигационных систем нового поколения и предоставленные экспериментальные материалы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Инзарцев А.В., Киселев Л.В., Костенко В.В., Матвиенко Ю.В., Павин А.М., Щербатюк А.Ф. Подводные робототехнические комплексы: системы, технологии, применение. Владивосток: Дальнаука, 2018. 368 с.
2. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: системы и технологии. М.: Наука, 2005. 398 с.
3. Пат. WO/2001/065274 US, МПК G01S 5/18, G01S 5/30, G01S 15/87. Methods and systems for navigating under water / LARSEN M.: заявл.: 02.03.2001, опубли.: 07.09.2001.
4. Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Сидоренко А.В. Гидроакустические средства навигации и телеуправления для автономных необитаемых подводных аппаратов // Подводные технологии. 2005. № 1. С. 20–27.
5. Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C. Use of GIBsin AUVs for Underwater Archaeology // SeaTechnology. 2003. December. P. 22–27.
6. Пат. 5,579,285 US, G01S11/14. Method and device for the monitoring and remote control of unmanned mobile underwater vehicle / Thomas Hubert. – No WO94/14081; опубли.: 26.11.1996.
7. Scherbatjuk A. The AUV Positioning using Ranges from one Transponder LBL // OCEANS. 1995. Vol. 3. P. 1620–1623.
8. Пат. 2556326 РФ, МПК G01S 15/06. Способ навигации подводного робота с использованием одномаяковой системы / Бурдинский И.Н., Отческий С.А., Безручко Ф.В., Мяготин А.В. – № 2014111388/28; заявл.: 25.03.2014, опубли.: 10.07.2015. Бюл. № 19.
9. Пат. 2344435 РФ, МПК G01S 3/80. Способ навигационного обеспечения автономного подводного робота, контролируемого с борта обеспечивающего судна / Матвиенко Ю.В., Рылов Р.Н., Каморный А.В., Кузьмин А.В., Нурғалиев Р.Ф. – № 2007117288/28; заявл.: 08.05.2007, опубли.: 20.01.2009. Бюл. № 2.
10. Пат. 2687844 РФ, МПК G01S 3/808. Способ навигационно-информационной поддержки АНПА большой автономности, совершающего протяженный переход / Матвиенко Ю.В., Львов О.Ю. – № 2018131832; заявл.: 04.09.2018, опубли.: 16.05.2019. Бюл. № 14.
11. Burdinsky I.N., Otchetskii S.A. Assessment of the possibility of underwater navigation support for autonomous underwater vehicles at long ranges // 25th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS. Saint Petersburg, Russia, 2018. P. 1–8.
12. Акуличев В.А., Моргунов Ю.Н., Бородин А.Е. Региональная система подводного навигационного обеспечения и дистанционного управления // Фундаментальная и прикладная гидрофизика. 2014. Т. 7, № 2. С. 36–40.
13. Пат. 2469346 РФ, МПК G01S 3/80. Способ позиционирования подводных объектов / Моргунов Ю.Н., Тагильцев А.А., Безответных В.В., Буренин А.В., Голов А.А. – № 2011128643/28; заявл.: 11.07.2011, опубли.: 10.12.2012. Бюл. № 34.
14. Безответных В.В., Буренин А.В., Моргунов Ю.Н., Половинка Ю.А. Экспериментальные исследования особенностей распространения импульсных сигналов из шельфа в глубоком море // Акустический журнал. 2009. Т. 55, № 3. С. 371–380.
15. Burdinsky I., Myagotin A. Navigation of autonomous underwater vehicles using acoustic and visual data processing // Intelligent Systems Reference Library. 2015. Vol. 75. P. 231–250.
16. Моргунов Ю.Н., Безответных В.В., Буренин А.В., Войтенко Е. А., Голов А.А. Экспериментальное тестирование технологии высокоточной подводной акустической дальнометрии // Акустический журнал. 2018. Т. 64, № 2. С. 191–196.
17. Евтютов А.П., Митько В.Б. Инженерные расчеты в гидроакустике. Л.: Судостроение, 1988. 287 с.
18. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М.: Радио и Связь, 1981. 416 с.
19. Алексеев А.И. Теория и применение псевдослучайных сигналов. М.: Наука, 1969. 368 с.

Для цитирования:

Матвиенко Ю.В., Бурдинский И.Н. Энергетические характеристики гидроакустической навигационной системы большой дальности для автономных подводных аппаратов // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 3 (33). С. 4–10. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.001.

ОБ АВТОРАХ

МАТВИЕНКО Юрий Викторович – доктор технических наук, главный научный сотрудник.

Область научных интересов: гидроакустика, подводная робототехника, гидроакустическая навигация и связь.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690950, Владивосток, ул. Суханова., 5а.

Тел.: +7 (423) 243-25-78.

E-mail: ymat@marine.febras.ru.

Orcid ID: 0000-0002-4486-3719

БУРДИНСКИЙ Игорь Николаевич – кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией интеллектуальных технологий и систем.

Область научных интересов: гидроакустика, подводная робототехника, гидроакустическая навигация и связь.

Институт проблем морских технологий ДВО РАН

Адрес: 690950, Владивосток, ул. Суханова., 5а.

Тел.: +7 (423) 243-25-78.

E-mail: igor_burdinsky@mail.ru

Orcid ID: 0000-0002-2039-0451

Статья поступила в редакцию 15.06.2020

Опубликована 25.03.2020



ENERGETIC CHARACTERISTICS OF LONG-RANGE UNDERWATER ACOUSTIC NAVIGATION SYSTEM FOR AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES

Yu.V. Matvienko, I.N. Burdinskiy

Long-range underwater acoustic navigation systems (LR UANS) are used for high-precision positioning of AUVs during longstanding missions at significant distances (up to 500 km) from reference transceiver devices. The development of such systems involves the selection of the structure of composite signals when using underwater acoustic beacons or transceivers stationary located in a coastal zone far apart from the object of navigation. Based on the classic equation of the underwater acoustic range, it is possible to solve an optimization task, which involves accuracy and energy characterization of M-sequences of different lengths and evaluation of signal-to-noise ratio with respect to emitting signals level. By comparative analysis of the known approaches to the design of long-range circular navigation systems, some estimates of achievable signal-to-noise ratio values were acquired for different techniques of processing the M-sequences of different lengths. According to the experimental data, signal-to-noise ratios in the reception point were calculated for different ranges and signal types. It is shown that the optimization of energetic characteristics of LR UANS along with paths circuits of signal reception and processing is achieved when using M-sequences of medium length ($M = 127$).

Key words: underwater acoustic navigation systems, underwater vehicles, underwater acoustic beacons, pseudorandom signals, M-sequences, underwater acoustic transducers.

Recommended citation:

Matvienko Yu.V., Burdinskiy I.N. Energetic characteristics of long-range underwater acoustic navigation system for autonomous underwater vehicles // *Underwater Investigation and Robotics*. 2020. No. 3 (33). P. 4–10. DOI: 10.37102/24094609.2020.33.3.001

REFERENCES

- Inzartsev A.V., Kiselev L.V., Kostenko V.V., Matvienko Yu.V., Pavin A.M., Shcherbatyuk A.F. *Underwater robotics: systems, technologies, application*. Vladivostok: IMTP FEB RAS, 2018. 368 p.
- Ageev M.D., Kiselev L.V., Matvienko Yu.V. et al. *Avtonomnye podvodnye roboty: sistemy i tekhnologii*. M.: Nauka, 2005. 398 p.
- Pat. WO/2001/065274 US, MPK G01S 5/18, G01S 5/30, G01S 15/87. Methods and systems for navigating under water / LARSEN M.: *zayavl.*: 02.03.2001, *publ.*: 07.09.2001.
- Matvienko Yu.V., Rylov R.N., Sidorenko A.V. *Gidroakusticheskie sredstva navigatsii i teleupravleniya dlya avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov // Podvodnye tekhnologii*. 2005. No. 1. P. 20–27.
- Desset S., Damus R., Morash J., Bechaz C. Use of GIBsin AUVs for Underwater Archaeology // *SeaTechnology*. 2003. December. P. 22–27.
- Pat. 5,579,285 US, G01S11/14. Method and device for the monitoring and remote control of unmanned mobile underwater vehicle / Thomas Hubert. – No WO94/14081; *publ.*: 26.11.1996.
- Scherbatjuk A. The AUV Positioning using Ranges from one Transponder LBL // *OCEANS*. 1995. Vol. 3. P. 1620–1623.
- Pat. 2556326 RF, MPK G01S 15/06. *Sposob navigatsii podvodnogo robota s ispol'zovaniem odnomayakovoy sistemy / Burdinskiy I.N., Otcheskiy S.A., Bezruchko F.V., Myagotin A.V.* – No. 2014111388/28; *zayavl.*: 25.03.2014, *publ.*: 10.07.2015. *Byul.* No. 19.
- Pat. 2344435 RF, MPK G01S 3/80. *Sposob navigatsionnogo obespecheniya avtonomnogo podvodnogo robota, kontroliruemogo s borta obespechivayushchego sudna / Matvienko Yu.V., Rylov R.N., Kamornyy A.V., Kuz'min A.V., Nurgaliev R.F.* – No. 2007117288/28; *zayavl.*: 08.05.2007, *publ.*: 20.01.2009. *Byul.* No. 2.
- Pat. 2687844 RF, MPK G01S 3/808. *Sposob navigatsionno-informatsionnoy podderzhki ANPA bol'shoy avtonomnosti, sovershayushchego protyazhennyy perekhod / Matvienko Yu.V., L'vov O.Yu.* – No. 2018131832; *zayavl.*: 04.09.2018, *publ.*: 16.05.2019. *Byul.* No. 14.
- Burdinsky I.N., Otcheskiy S.A. Assessment of the possibility

of underwater navigation support for autonomous underwater vehicles at long ranges // 25th Saint Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems, ICINS. Saint Petersburg, Russia, 2018. P. 1–8.

12. Akulichev V.A., Morgunov Yu.N., Borodin A.E. *Regional'naya sistema podvodnogo navigatsionnogo obespecheniya i distantsionnogo upravleniya // Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika*. 2014. Vol. 7, No. 2. P. 36–40.

13. Pat. 2469346 RF, MPK G01S 3/80. *Sposob pozitsionirovaniya podvodnykh ob'ektov / Morgunov Yu.N., Tagil'tsev A.A., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Golov A.A.* – No. 2011128643/28; zayavl.:11.07.2011, publ.:10.12.2012. Byul. No. 34.

14. Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Morgunov Yu.N., Polovinka Yu.A. *Ekspiremental'nye issledovaniya osobennostey rasprostraneniya impul'snykh signalov iz shel'fa v glubokoe more //*

Akusticheskiy zhurnal. 2009. Vol. 55, No. 3. P. 371–380.

15. Burdinsky I., Myagotin A. Navigation of autonomous underwater vehicles using acoustic and visual data processing // Intelligent Systems Reference Library. 2015. Vol. 75. P. 231–250.

16. Morgunov Yu.N., Bezotvetnykh V.V., Burenin A.V., Voytenko E. A., Golov A.A. *Ekspiremental'noe testirovanie tekhnologii vysokotochnoy podvodnoy akusticheskoy dal'nometrii // Akusticheskiy zhurnal*. 2018. Vol. 64, No. 2. P. 191–196.

17. Evtyutov A.P., Mitko V.B. *Inzhenernye raschety v gidroakustike*. L.: Sudostroenie, 1988. 287 p.

18. Shirman Ya.D., Manzhos V.N. *Teoriya i tekhnika obrabotki radiolokatsionnoy informatsii na fone pomekh*. M.: Radio i Svyaz', 1981. 416 p.

19. Alekseev A.I. *Teoriya i primeneniye psevdosluchaynykh signalov*. M.: Nauka, 1969. 368 p.

ABOUT THE AUTHORS

MATVIENKO Yu.V. – doctor of engineering, senior research scientist.

Research interests: hydroacoustics, underwater robotics, hydroacoustic navigation and communications.

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950.

Phone: +7 (423) 243-25-78.

E-mail: ymat@marine.febras.ru.

Orcid ID: 0000-0002-4486-3719

BURDINSKIY I.N. – Ph.D. in technical sciences, docent, director of the intelligent technologies and systems laboratory.

Research interests: under-water robotics, signal processing, hardware and software for positioning in the marine environment.

Institute for Marine Technology Problems FEB RAS

Address: 5a, Sukhanov Str., Vladivostok, 690950.

Phone: +7 (423) 243-25-78.

E-mail: igor_burdinsky@mail.ru

Orcid ID: 0000-0002-2039-0451

Manuscript received: 15.06.2020

Published: 25.09.2020