

УДК 004.942: 531.7.08

© 2014 г. **И.Н. Бурдинский**, канд. техн. наук,
Л.Г. Вайнер, канд. техн. наук,
А.С. Миронов,
М.А. Линник,
И.В. Карбанов

(Тихоокеанский государственный университет, Хабаровск)

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОРОГОВОГО ЗНАЧЕНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ СЛОЖНОГО ГИДРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Рассматривается методика определения порогового значения при использовании порогового критерия для достоверного обнаружения сложного фазоманипулированного сигнала в информационно-измерительных и управляющих гидроакустических системах. Приведены результаты натурального эксперимента, подтверждающие корректность предлагаемой методики.

Ключевые слова: посимвольная корреляция, сложные сигналы, информационно-измерительные и управляющие гидроакустические системы.

Введение

При обработке сигналов гидроакустических систем, наряду с задачей точного детектирования, ключевой является задача оценки достоверности принятого сигнала. В результате развития микропроцессорных технологий появилась возможность и наметилась тенденция к использованию методов цифровой обработки сложных сигналов (DSSS) в информационно-измерительных и управляющих гидроакустических системах. Преимущество систем с DSSS заключается в высокой помехозащищенности и разрешающей способности при детектировании сигналов. Основная проблема при использовании сложных сигналов – невозможность применять как традиционные методы генерации, излучения приема и обработки сигналов, так и соответствующие технические средства, основанные на преобразовании Фурье.

В системах телекоммуникации и координатной локации, где решается задача точного обнаружения сигнала на фоне помех с заданным разрешением, при использовании сложных сигналов, как правило, используются методы детектирования, основанные на интегральных преобразованиях, – например, согласованная фильтрация или корреляция. Вопрос достоверного обнаружения сигнала в существующих системах решается с помощью сравнения отклика с выхода согласо-

ванного фильтра при приеме сигнала и отклика в момент, когда сигнал в канале отсутствует. Такой метод обработки требует постоянной оценки состояния сигнала и не может обеспечить необходимую надежность его обнаружения [1, 2].

Целью работы является разработка эффективного метода достоверного обнаружения сложного гидроакустического сигнала, фазоманипулированного псевдослучайными последовательностями (М-последовательности или последовательности Голда) для синхронных и асинхронных информационно-измерительных и управляющих гидроакустических систем.

Алгоритм классической корреляции для асинхронного обнаружения сложного фазоманипулированного гидроакустического сигнала

При использовании алгоритма классической корреляции отличительным признаком наличия сигнала в канале является максимальное значение корреляционной функции (энергетический показатель) на всем наблюдаемом интервале. Ввиду наличия в канале быстро меняющихся шумов, импульсных помех большой мощности, а также пространственного затухания сигнала при использовании алгоритма классической корреляции невозможно определить фиксированный уровень корреляционной функции (порог), при котором будет обеспечено достоверное детектирование сигнала с заданной вероятностью [3, 4]. На рис.1 приведены графики корреляционных функций, полученных с помощью алгоритма классической корреляции для реальных гидроакустических сигналов.

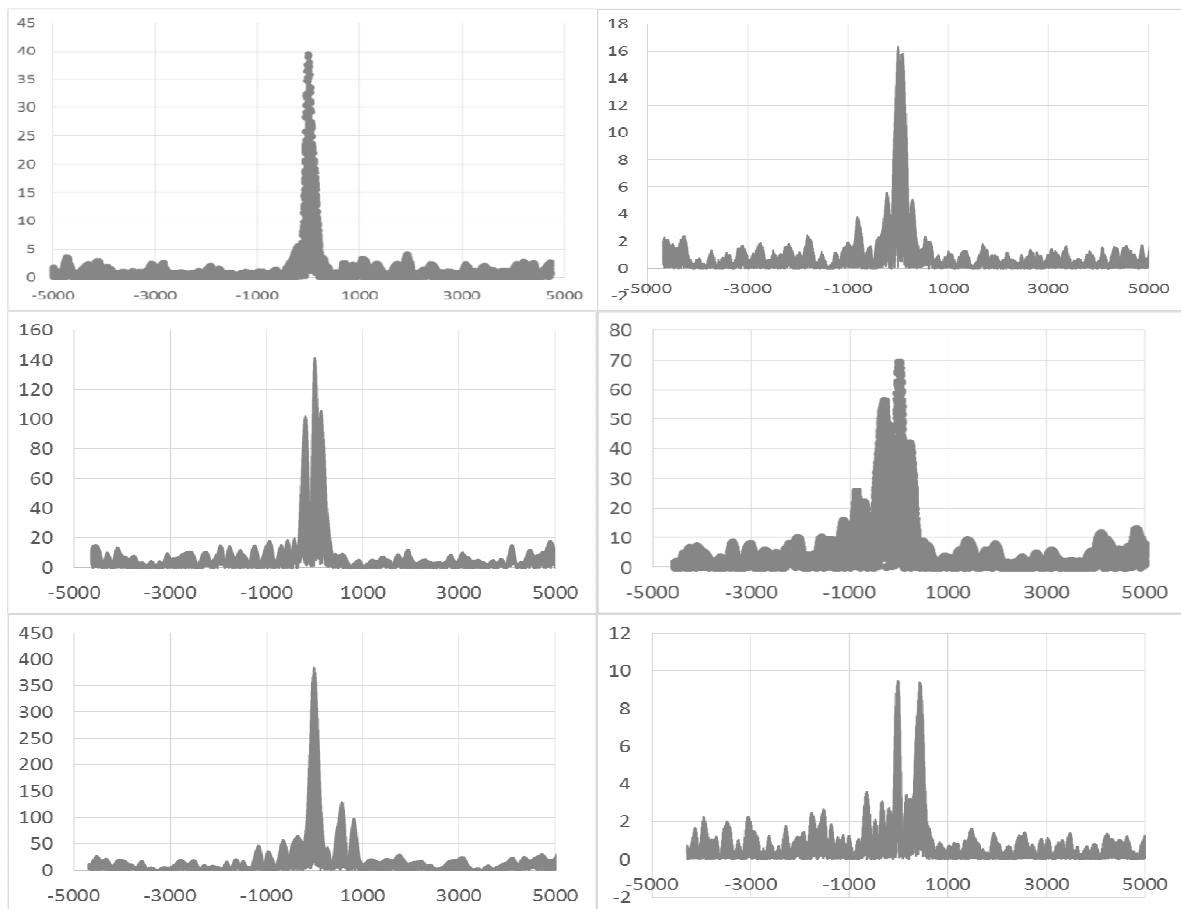


Рис. 1. Внешний вид корреляционной функции для реального сложного фазоманипулированного гидроакустического сигнала.

Сигналы были излучены и приняты при использовании одного и того же оборудования. Максимальные значения корреляционных функций определяют момент достоверного обнаружения сигналов. Каждый информационный ряд на графиках соответствует корреляционной функции одного сигнала. Все обрабатываемые сигналы имели следующую структуру и характеристики: длительность 83 мс, число символов моделирующей M-последовательности 127, длительность одного символа 0.6 мс. Соотношение сигнал/шум (SNR) во всех случаях было меньше 0 дБ. Как можно видеть на представленных графиках, максимальное значение корреляционной функции при достоверном обнаружении для различных сигналов лежит в диапазоне от 9 ед. до 380 ед., при этом максимальное значение боковых лепестков превышает 100 ед. Таким образом, можно сделать вывод о невозможности применения в реальных условиях достоверного порогового детектирования по заранее заданному значению корреляционной функции, так как продемонстрированное, априори непредсказуемое поведение корреляционной функции приведет к ложным срабатываниям приемного устройства. Возможная реализация с использованием адаптивного порога за счет определения значения соотношения энергии основного лепестка максимума корреляционной функции к энергии боковых лепестков представляется затруднительной, так как в реальных условиях эксплуатации в общем случае наблюдается неизвестный «размыв» основного лепестка за счет различных искажений при распространении сигнала (экспериментальные исследования показали возможность «размыва» до 4 мс).

Эффект «размыва» существенно затрудняет точное определение положения максимума основного лепестка и его ширины. Применение адаптивного алгоритма детектирования приведет к заведомой ошибке оценки времени запаздывания сигнала, равной ширине основного лепестка корреляционной функции для самых неблагоприятных условий. Также необходимо учитывать эффект многолучевости распространения сигнала, характерный для мелкого моря. Согласно модели Райса, пришедший первый луч будет определять наикратчайшее расстояние распространения между излучателем и приемником. При этом первый пришедший луч не всегда будет иметь максимальное значение классической корреляционной функции [5].

Алгоритм посимвольной корреляции для асинхронного обнаружения сложного фазоманипулированного гидроакустического сигнала

Альтернатива применения классической корреляции при обнаружении фазоманипулированного сигнала – использование алгоритма посимвольной корреляции. Отличительной особенностью данного алгоритма является то, что заранее известно максимально возможное значение корреляционной функции, равное символьной длине, используемой для модуляции последовательности. Посимвольная корреляционная обработка направлена в большей степени на оценку целостности структуры сложного фазоманипулированного сигнала, чем на его энергию, что характерно для классической корреляционной обработки. Посимвольную корреляционную обработку можно назвать оптимальной при условии когерентного приема для модели аддитивного белого гауссовского шума [6]. На рис. 2

представлена общая структурная схема ядра детектора сигнала, реализующего алгоритм посимвольной корреляции.

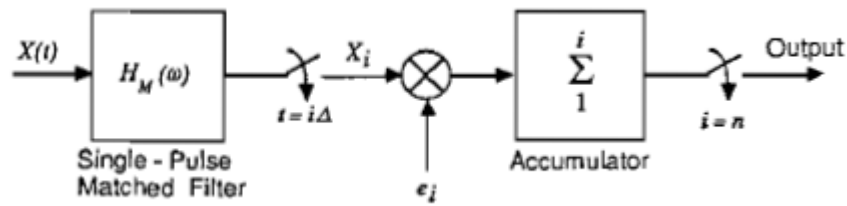


Рис. 2. Ядро детектора сложного сигнала, реализующего алгоритм посимвольной корреляции.

При использовании алгоритма посимвольной корреляции вычисление значения корреляционной функции Rs_k для сложного фазоманипулированного сигнала конечной символьной длины, представленного в цифровом виде, и детектирование сигнала проводится по следующему алгоритму [7].

Шаг 1. Для текущего положения окна производится последовательное перемножение значений векторов m и s для одного символа искомого сигнала и суммирование полученных произведений:

$$B_l = \sum_{j=1}^{Ts} m_j s_{k+l \cdot Ts+j}, \quad (1)$$

где $j = 1, \dots, Ts$; Ts – длина одного символа в отсчетах частоты дискретизации; m_j – значение одного отсчета маски символа; $s_{k+l \cdot Ts+j}$ – значение одного отсчета входного сигнала, рассматриваемого как часть очередного символа искомой последовательности; $l = 1, \dots, C_s$ – номер символа сигнала; k – номер отсчета входного сигнала.

Шаг 2. Определение бинарных символов. Если $B_l < 0$, то значение бинарного символа принимается как $u_l = -1$. В другом случае, если $B_l \geq 0$, то $u_l = 1$.

Шаг 3. Расчет корреляционной функции для k отсчета входного сигнала:

$$Rs_k = \sum_{l=1}^{C_s} PN_l u_l, \quad (2)$$

где PN_l – l -й символ псевдослучайной последовательности PN (маски); k – номер отсчета входного сигнала.

Шаг 4. Сравнение полученного значения Rs_k с максимальным Rs_{\max} за предыдущие вычисления. Если $Rs_k > Rs_{\max}$, то $Rs_{\max} = Rs_k$, в памяти сохраняется значение k .

Шаг 5. Окно сдвигается на заданное смещение dS , которое определяется требуемой разрешаемой способностью, вдоль рассматриваемого временного отрезка. Минимальное значение смещения равняется одному дискретному отсчету.

Шаг 6. Если достигнут конец анализируемого отрезка, то k номер дискретного отсчета входного сигнала, при котором было определено последнее значение Rs_{\max} , соответствует моменту обнаружения сигнала. Иначе переходим к шагу 1.

Как было указано выше, применение посимвольной корреляции является оптимальным только при соблюдении условий когерентности приемника и передатчика, а также наличия в канале аддитивного белого гауссовского шума (идеальная модель), что не соответствует реальным условиям эксплуатации гидроакустических систем. Таким образом, актуальным является вопрос об эффективности применения данного алгоритма для обнаружения гидроакустического сигнала на

практике.

Для предварительной оценки эффективности использования алгоритма по-символьной корреляции был проведен численный эксперимент с помощью разработанного программного комплекса в среде математического моделирования [8, 9]. Условия проведения моделирования:

1. Для рассмотрения влияния шума на оценку параметров сигнала при проведении эксперимента применялись две шумовые модели:

модель шума, представленная аддитивным белым гауссовским шумом (ШМ1 – шумовая модель 1);

шум реального гидроакустического канала (ШМ2 – шумовая модель 2).

Цель использования нескольких шумовых моделей заключалась в определении той модели, при использовании которой будет получена наилучшая сходимость результатов численного и реального экспериментов.

2. Для шумовой модели 2 использовалась усредненная по 300 различным независимым выборкам реализация шума реального гидроакустического канала (мелкое море – акватория Японского моря, Приморский край, Россия). Каждая выборка была получена с помощью гидроакустического преобразователя: ПИ1-ЛУ3.814 – резонансная частота составляет 11700 Гц.

3. Моделирование проводилось для диапазона значений $SNR = 10\log(P_s/P_n)$ на входе детектора от -20 до 10 дБ. P_s – мощность сигнала; P_n – мощность шума. Для каждого значения сигнал/шум на входе приемника при фиксированных прочих параметрах осуществлялось 273 измерения, что позволяет, используя формулу Бернулли, провести оценку вероятности достоверного обнаружения сигнала для доверительной вероятности $Q = 0,9$ при доверительном интервале $\varepsilon = 0,05$. В качестве оценки вероятности достоверного обнаружения сигнала использовалась частота успешного события \hat{P} .

4. Несущая частота сигнала $f_{s0} = 11,7$ кГц (соответствует резонансной частоте гидроакустического преобразователя ПИ1-ЛУ3.814). Изменение несущей частоты сигнала в процессе моделирования проходило с учетом движения приемника относительно передатчика со скоростью $v = (0 - 3)$ м/с вдоль направления распространения волны и в зависимости от длительности сигнала. Значение v выбиралось случайным образом из указанного предела для каждой итерации при моделировании.

5. Относительный период $f^* : f^* = f_\delta / f_{s0} = 4$, где f_δ – частота дискретизации; f_{s0} – несущая частота сигнала.

6. Длина одного символа – 0,6 (6) мс (около 8 периодов несущей).

7. T – длительность сигнала. Изменение параметра: 20 мс – соответствует последовательности длиной в 31 символ; 40 мс – соответствует последовательности длиной в 63 символа; 85 мс – соответствует последовательности длиной в 127 символов.

8. Шаг dS – шаг в отсчетах, с которым можно двигать окно для определения максимума корреляционной функции без потери в точности оценки. Изменение параметра: 1, 2, 4, 16.

9. Допустимая граница оценки времени запаздывания (максимальная допус-

тимая погрешность детектирования) $\tau_{оц}$ обнаружения сигнала. Изменение параметра: 0,6 (6) мс (длительность одного символа).

10. Фаза в момент детектирования сигнала. Изменение параметра: случайное в пределах одного периода несущей частоты.

11. Все сигналы, анализируемые в ходе эксперимента, обладали одинаковой мощностью.

12. Фактом успешного детектирования сигнала считалось определение времени запаздывания сигнала с погрешностью, не превышающей заданной допустимой границы оценки времени запаздывания. Исходя из этого вычислялась частота \hat{P} . В случае успешного детектирования фиксировалась погрешность детектирования как разница между детектируемым и действительным значениями момента прихода сигнала в пределах допустимой границы оценки сигнала. Вычислялась максимальная, средняя и среднеквадратичная ошибка детектирования для каждого значения SNR . Представленные ниже граничные значения искомых характеристик и оценок рассматриваются для значения $\hat{P}=1$.

В результате проведения численного эксперимента с помощью разработанной методики были эмпирически определены пороговые значения посимвольной корреляционной функции для обеспечения достоверного обнаружения гидроакустических сигналов различной длины.

Методика определения порогового значения для обеспечения достоверного обнаружения сигнала при заданных параметрах и условиях: тип шумовой модели; символьная длина сигнала; f^* и $\tau_{оц}$ описываются следующей последовательностью действий.

Шаг 1. Строится график функции частоты $\hat{P}(SNR)$. Алгоритм обработки – «посимвольная корреляция».

Шаг 2. Строится график *минимальных* значений посимвольной корреляционной функции $R_s(SNR)$, полученных в результате проведения численного эксперимента для соответствующих значений SNR при достоверном обнаружении.

Шаг 3. Определяется максимальное значение Er посимвольной корреляционной функции, при котором имело место ложное обнаружение сигнала ($\hat{P} < 1$) для всего проведенного численного эксперимента. Ложным является обнаружение сигнала, при котором его положение на временной оси определяется с худшей точностью, чем заданная оценка времени запаздывания $\tau_{оц}$.

Шаг 4. Определяется максимальное значение Lp посимвольной корреляционной функции, находящееся вне интервала заданной точности оценки времени запаздывания при достоверном обнаружении сигнала ($\hat{P} = 1$) для всего проведенного численного эксперимента.

Шаг 5. Определяется минимальное значение «посимвольной корреляционной» функции $R_s(SNR)$ при значении $\hat{P} = 1$, для которого выполняется неравенство $Tr > EL$, где $EL = \max(Er, Lp)$. Полученное пороговое значение Tr соответствует минимальному отношению сигнал/шум ($MSNR$), для которого возможно достоверное обнаружение сигнала с применением предложенной методики.

Таким образом, пороговое значение можно описать как

$$Tr = R_s(\hat{P} = 1, MSNR). \quad (3)$$

На рис. 3 представлено графическое отображение методики определения порогового значения при использовании порогового критерия для оценки достоверности обнаружения сложного фазоманипулированного сигнала со следующими характеристиками: ШМ1, ШМ2, символьная длина – 127, $f^* = 4$; τ_{oc} соответствует длительности одного символа.

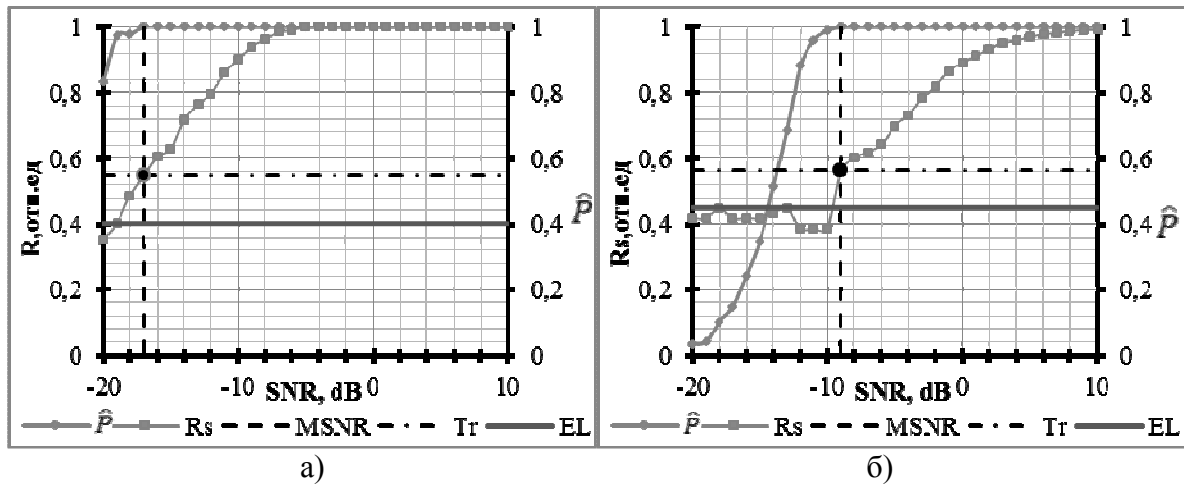


Рис. 3. Определение порогового значения для достоверного обнаружения сигнала: а) ШМ1; б) ШМ2.

В табл.1 приведены определенные в результате численного эксперимента пороговые значения в *процентах* от максимального значения посимвольной корреляционной функции и в относительных единицах – для исследуемых последовательностей различной символьной длины. Максимальное значение посимвольной корреляционной функции сложного сигнала в относительных единицах равно количеству символов модулирующей последовательности.

Таблица 1

№ п/п	Модель шума	Структура сигнала					
		Симв.длина-31		Симв.длина-63		Симв.длина-127	
		%	отн. ед.	%	отн. ед.	%	отн. ед.
1	ШМ1	80,6	25	55,6	36	48,7	62
2	ШМ2	80,6	25	52,4	34	55,9	71

Экспериментальные исследования

Для определения достоверности предложенной методики в период 2007 – 2013 гг. была проведена серия натурных экспериментов в акватории Японского моря, залив Петра Великого.

При проведении экспериментальных исследований использовался мобильный информационно-измерительный комплекс [10], разработанный сотрудниками лаборатории ЛИТИС ТОГУ. В состав комплекса входят два унифицированных блока приемопередачи гидроакустического сигнала, работающих в общей синхронной временной сетке, которая обеспечивается системой единого времени на базе приемников GPS и двух блоков сбора, обработки и отображения информации. В качестве микропроцессорного блока цифровой обработки информации для исследования рассматриваемого алгоритма применялась программируемая логи-

ческая интегральная схема, выполненная по технологии FPGA. Во время проведения работ развертывались пункт излучения сигналов и пункт приема сигналов. Пункт излучения располагался на стационарном носителе (пирс), пункт приема мог быть как относительно стационарным – заякоренное судно, так и мобильным – лодка, перемещающаяся с заданной скоростью по заданной акватории. Прием данных осуществлялся в нескольких точках при одинаковых значениях мощности излучения. Эксперимент проводился с использованием гидроакустических преобразователей ПИ1-ЛУ3.814.

В ходе эксперимента исследовались сложные гидроакустические сигналы (M-последовательности и последовательности Голда) с фазовой модуляцией со следующими параметрами: несущая частота $f_{s0} = 11,700\text{кГц}$; длительность излучаемого сигнала $t_C = 84\text{мс}$; длительность защитного интервала $t_{ЗИ} = 50\text{мс}$; частота дискретизации $f_D = 48\text{кГц}$. Каждый сигнал модулировался уникальной 127-битной фазоманипулированной M-последовательностью: символьная длина – 127,32 отсчета частоты дискретизации на символ. Мощность излучения изменялась от 500 до 4500 Па/м.

Максимальная дистанция между приемником и излучателем при проверке эффективности обнаружения сложных сигналов составляла 2000 м.

Для каждой принятой последовательности фиксировались следующие данные: максимум посимвольной корреляционной функции; момент времени, соответствующий максимуму посимвольной корреляционной функции или моменту преодоления заданного порога при вычислении посимвольной корреляционной функции; наклонная дальность, рассчитанная при заданной скорости звука в воде; координаты GPS, расстояние между приемником и излучателем, определенное по GPS.

При анализе результатов эксперимента оценка соотношения сигнал/шум на входе приемника определялась как отношение энергии полезного сигнала к энергии шума, по формуле:

$$SNR = 10\log((E_{sn} - E_n)/E_n), \quad (4)$$

где E_{sn} – энергия смеси полезного сигнала и шума; E_n – энергия шума. Выборка значений для оценки E_{sn} и E_n производилась на временном интервале, равном по длительности $0.5t_C$ для каждого излученного сигнала. Для определения E_{sn} интервал отсчитывался от момента достоверного обнаружения сигнала; для E_n – после окончания излучения сигнала, во время следования защитного интервала.

За время проведения натурного эксперимента было излучено и проанализировано около 20000 сложных сигналов модулированных 127 символьными псевдослучайными последовательностями и последовательностями Голда. Сигналы излучались “пакетами” по 7, 10, 17 штук. При этом было принято следующее допущение: для всего пакета импульсов условия распространения являются одинаковыми (соответствует интервалу когерентности канала для исследуемых сигналов), все сигналы распространяются по одному пути. В качестве оценочного соотношения сигнал/шум использовалась усредненная величина для каждого сигнала, составляющего пакет. Отличительным критерием достоверного корректного приема сигнала являлась совокупность следующих признаков:

смещение принятого сигнала относительно предыдущего (первый сигнал в пакете определялся по назначенному порогу для посимвольной корреляции в соответствии с моделью для реального шума гидроакустического канала). Смещение сигнала должно соответствовать времени, равному временному интервалу между излучением двух соседних последовательностей, с погрешностью, не превышающей длительности одного символа. Смещение каждого последующего сигнала в пакете относительно первого определялось с помощью посимвольной корреляционной обработки;

информационная достоверность принятого сигнала. Пакет представляет собой ансамбль ортогональных последовательностей (сигналов), слабо коррелируемых друг с другом. Каждый излученный сигнал занимал четко отведенное ему место в «пакете» и, соответственно, не мог быть обнаружен ни в каком другом.

Корректным считался прием только в случае, если был правильно принят весь пакет. Если какие-либо сигналы из пакета не были приняты, действующим значением отношения сигнал/шум для данного пакета считается среднее для совокупности принятых сигналов этого пакета. Отношение принятых и непринятых сигналов для каждого отношения сигнал/шум является частотой для оценки вероятности достоверности приема. На рис. 4 приведено распределение количества испытаний (попыток принятия сигнала для различных соотношений сигнал/шум на входе приемника). Линией ограничен *порог*, соответствующий минимальному количеству испытаний, необходимых для получения требуемой оценки. В соответствии с имитационным моделированием порог выбран равным 273, что соответствует 1,3 % от числа всех испытаний, проведенных за время натурального исследования.

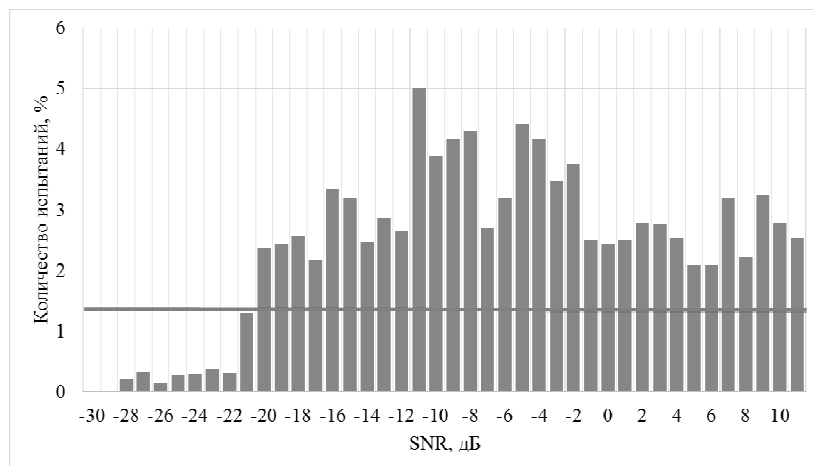


Рис. 4. Распределение количества испытаний в зависимости от соотношения сигнал/шум на входе приемника при проведении натуральных исследований.

В табл. 2 приведены результаты обработки экспериментальных данных, где *пороговое значение* выбиралось исходя из расчетного (для модели реального шума) и равнялось 71.

Как видно, для алгоритма посимвольной корреляции пороговое значение, полученное при моделировании и равное 71, является оптимальным с точки зрения достоверности принятых данных. В ходе проведения экспериментального исследования не было зафиксировано ни одного случая, когда бы имело место ложное определение сигнала с использованием заданного порогового значения.

Стоит отметить, что количество ложно обнаруженных сигналов, для которых максимальное значение посимвольной корреляции равнялось значениям, указанным в табл. 2, в строке 4, составляет не более 5% от общего числа ложно обнаруженных сигналов.

Таблица 2

№ п/п	Оцениваемая характеристика		Мощность излучателя, %			
			12.5	25	50	100
1	Потеря сигналов, %	Посимвольная корреляция по <i>пороговому значению</i>	20	1,3	0	0
		Посимвольная корреляция по максимуму	10	0	0	0
2	Отношение сигнал/шум на входе приемника, дБ	Максимальное	3	1	3	14
		Среднее	-7	-4	0	9
		Минимальное	-28	-13	-5	2
3	Ошибка определения оценки времени запаздывания, СКО, мс		0.355	0.343	0.240	0.241
			0	6	6	3
4	Максимальное значение посимвольной корреляционной функции при недостоверном приеме		70	69	63	63
5	Минимальное значение посимвольной корреляционной функции при достоверном приеме		73	73	89	107

На рис. 5 приведено распределение ошибки оценки времени запаздывания при обнаружении сигнала.

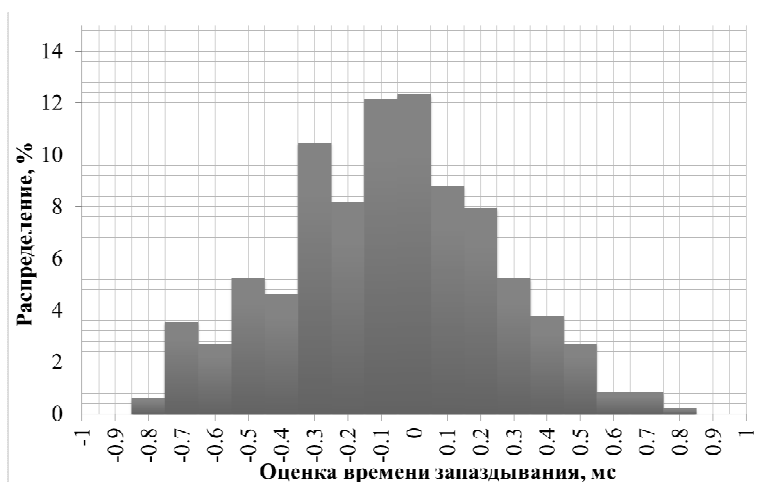


Рис. 5. Распределение величины оценки времени запаздывания при обнаружении сигнала.

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования показали, что предлагаемая методика может использоваться для получения порогового значения при реализации обнаружителя сложных гидроакустических сигналов, фазовомодулированных псевдослучайными последовательностями или последовательностями Голда.

Во время численного эксперимента для априорного определения порогового значения необходимо использовать шум реального гидроакустического канала целевой области эксплуатации гидроакустической системы. Модель белого гауссовского шума не дает возможности получить достоверные результаты.

Применение разработанной методики совместно с алгоритмом посимвольной корреляции в детекторах сигналов позволяет создавать точные и достоверные информационно-измерительные и управляющие гидроакустические системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Карабанов И.В., Бурдинский И.Н., Миронов А.С., Линник М.А.* Метод порогового детектирования гидроакустических шумоподобных фазоманипулированных сигналов // Доклады 13-й Междунар. конф. "Цифровая обработка сигналов и ее применение DSPA-2011". – М., 2011. – Вып. XIII-1. – С. 180-183.
2. *Karabanov I.V., Linnik M.A, Burdinskiy I.N.* Threshold Methods of Sonar Pseudonoise Phase-shift Signal Detection // The First Russia and Pacific Conference on Computer Technology and Applications (Russia Pacific Computer 2010) 6 – 9 September, 2010 Russian Academy of Sciences, Far Eastern Branch. – Vladivostok, 2010. – С. 404-408.
3. *Yan C., Fang J., Tang Y.* OFDM synchronization using PN sequence and its performance // In 14th IEEE Proceedings on PIMRC, 2003. – P. 936–939.
4. *Tian Y., Lei X., Tang W., Li S.* Effect of Adaptive Threshold on Time Synchronization Based on PN Sequences in OFDM System // Future Generation Communication and Networking (FGCN 2007) – 2007. – Vol.2. – P. 173-176.
5. *Карабанов И.В.* Алгоритмы обработки сложных фазоманипулированных гидроакустических сигналов системы позиционирования подводного робота: Автореф. дис... канд. техн. наук. – Хабаровск: ТОГУ, 2013.
6. *Kassam Saleem A.* Signal Detection in Non-Gaussian Noise. – New York, Berlin; Heidelberg; London; Paris; Tokyo: Springer-Verlag, 1987.
7. *Матвиенко Ю.В., Бурдинский И.Н., Миронов А.С., Рылов Р.Н.* О применении сложных сигналов в гидроакустических системах навигации и управления подводными роботами // Подводные исследования и робототехника. – 2008. – № 1. – С. 39-46.
8. *Линник М.А., Карабанов И.В., Бурдинский И.Н., Миронов А.С.* Компьютерная модель гидроакустической телекоммуникационной системы в среде MATLAB // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: Материалы V Междунар. науч. конф. – Харьков: ФЛП Е.В. Шейнина, 2011. – С. 447-452.
9. *Миронов А.С., Карабанов И.В., Бурдинский И.Н., Линник М.А.* Применение параллельных и распределенных вычислений в комплексе MATLAB для обработки данных // Информационные технологии и высокопроизводительные вычисления: Материалы Междунар. науч.-практ. конф. – Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2011. – С. 23-29.
10. *Бурдинский И.Н., Миронов А.С., Линник М.А. и др.* Мобильный измерительный комплекс для проведения гидроакустических исследований // Информатика и системы управления. – 2012. – № 2. – С. 82-91.

Статья представлена к публикации членом редколлегии Чье Ен Уном.

E-mail:

Бурдинский Игорь Николаевич – burdinsky@mail.ru;

Вайнер Леонид Григорьевич – lgvainer@mail.ru;

Миронов Андрей Сергеевич – andrei.s.mironov@yandex.ru;

Линник Михаил Александрович – mikelinnik@yandex.ru;

Карабанов Иван Вячеславович – vostokboy@mail.ru.