

Экспериментальная апробация методики оценки доплеровского смещения с помощью сложных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами

А.В. Буренин,* В.В. Безответных, Е.А. Войтенко, М.С. Лебедев, Д.С. Стробыкин, А.А. Тагильцев
 Федеральное государственное учреждение науки Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева Дальневосточное отделение Российской академии наук,
 Россия, 690041, Владивосток, ул. Балтийская, д.43
 (Статья поступила 28.11.2014; Подписана в печать 10.12.2014)

В данной работе представлена методика оценки доплеровского смещения, которая базируется на применении сигнального пакета, состоящего из сложных сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами и операции автокорреляции («свертки» принятого сигнала с самим собой) на приемнике. Приведены результаты экспериментальной апробации методики. Полученные натурные данные сравниваются с измерениями системы GPS и аналогичными гидроакустическими подходами для оценки доплеровского смещения.

PACS: 43.28.Py

УДК: 534.171

Ключевые слова: эффект Доплера, оценка доплеровского смещения, сложные сигналы, M-последовательность на несущей, автокорреляция.

Неотъемлемой частью исследований морских акваторий стало применение разнообразных автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА), перемещающихся в исследуемой акватории. Сильное затухание электромагнитных волн в морской среде препятствует использованию радиосвязи для удаленного контроля за работой АНПА. Единственным доступным средством связи с АНПА являются акустические волны. Развитая многолучевость и существенное влияние эффекта Доплера на распространение акустических сигналов в акваториях осложняет «прямое» переложение методов радиосвязи в гидроакустику. В силу низкой скорости звуковых волн (около 1500 м/с), использование методов широкополосной модуляции в морских условиях дает доплеровский сдвиг на несколько порядков выше, чем в радиосвязи. В основном для оценки влияния и компенсации воздействия эффекта Доплера исследователи усложняли структуру сигнального пакета, добавляя вспомогательные сигналы с «удобными» для оценки доплеровского смещения свойствами.

Итак, сигнальный пакет, распространяясь от источника к приемнику, подвергается влиянию эффекта Доплера, вызванного движением их источника и/или движением приёмника. В частотной области эффект Доплера заключается в изменении несущей частоты сигнала

$$f = (1 + \Delta) f_0, \quad (1)$$

здесь f_0 — несущая частота сигнала; f — частота сигнала, смещенная эффектом Доплера; $\Delta = v/C$ — величина, которая выполняет функцию масштабирующего множителя; v — относительная скорость движения источник-приемник и C — скорость распространения

волны. Оценка f в прикладной гидроакустике, традиционно, базируется на вычислении функции взаимной неопределенности [1–4]. Но данный подход требует значительных вычислительных ресурсов [5].

Для снижения вычислительной нагрузки при оценке f авторами работы [5] был предложен оригинальный алгоритм, который базируется на детектировании изменений, вызванных эффектом Доплера, во временной области и применении устойчивых к эффекту Доплера сигналов. Во временной области изменение частоты сигнала эквивалентно изменению длительности сигнала, эффект «сжатия-растяжения»:

$$T_r = (1 / (1 + \Delta)) T_s, \quad (2)$$

здесь T_s — длительность излученного сигнала; T_r — длительность сигнала после воздействия эффекта Доплера. Таким образом, с помощью измерения длительности сигнала на приемнике T_r и сопоставления её с T_s , можно оценить значение масштабирующего множителя Δ и, далее, скомпенсировать его. Группа авторов [5] предлагает использовать сигнальный пакет следующего вида: $s(t) = [x_{лчм}(t), x_{инф}(t), x_{лчм}(t)]$. В начале и в конце пакета размещают устойчивый к эффекту Доплера сигнал с линейной (логарифмической) частотной модуляцией ЛЧМ-сигнал $x_{лчм}(t)$, а в середине информационный сигнал $x_{инф}(t)$. Обработка на приемной стороне такого пакета заключается в вычислении «свертки» принятого пакета $r(t)$ с $x_{лчм}(t)$:

$$R_{лчм}(\tau) = r(t) \otimes x_{лчм}(t). \quad (3)$$

Затем вычисляется временной интервал между пиками (рис. 1) и оценивается Δ , используя (2). Далее, для компенсации эффекта Доплера в принятом сигнальном пакете пересчитывается частота дискретизации принятого сигнала: $F'_s = (1 + \Delta) F_s$, здесь F_s — частота дискретизации на приемнике и с помощью операции линейной интерполяции в соответствии с новой

*E-mail: shurck_burenin1@mail.ru, alex_bu@poi.dvo.ru

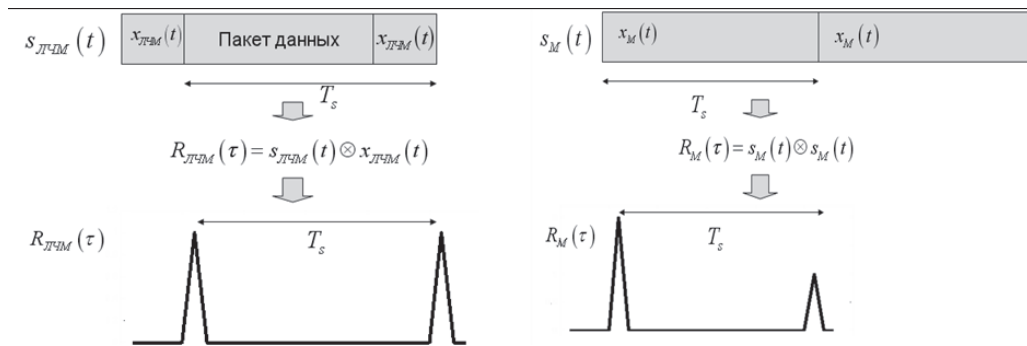


Рис. 1: Краткая графическая схема алгоритма измерения длительности сигнала: слева — предложенная группой авторов работы [5]; справа — предложенная в данной работе

F'_s изменяется $r_{\text{ПАКЕТ}}(t)$. Обозначим операцию линейной интерполяции $\tilde{r}_{\text{ПАКЕТ}}(t) = LI_{\Delta}[r_{\text{ПАКЕТ}}(t)]$.

В предлагаемой работе представлена методика, которая базируется на оценки доплеровского смещения с помощью измерения длительности принятого сигнала (3), но без применения операции «свертки» принятого сигнала с излученным и использованием в пакете устойчивых к эффекту Доплера ЛЧМ-сигналов.

Методика базируется на использование сигнального пакета, обозначим его $s(t)$, состоящего из $N = 2, 3, \dots$ сложных сигналов $x(t)$ с «хорошими» автокорреляционными свойствами и применении операции «свертки» принятого сигнала с самим собой (автокорреляция). Под «хорошими» автокорреляционными свойствами подразумевается форма автокорреляционной функции (АКФ) и, которая имеет один узкий пик при нулевой сдвигке по временной оси и незначительные по амплитуде боковыми «лепестками» при других сдвигках. Данная методика разрабатывалась специально для сигналов, не являющимися устойчивыми к эффекту Доплера, а именно, для сигналов, несущая частота которых фазоманипулирована М-последовательностью (такие сигналы еще называют М-последовательностью на несущей). Но принцип действия методики может быть использован для других типов сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами, например, ЛЧМ-сигналов. Результаты обработки ЛЧМ-сигналов по этой методике будут продемонстрированы ниже.

Для наглядного примера рассмотрим случай для М-последовательностей на несущей. Пусть сигнальный пакет состоит из $N = 2$ сложных сигналов $x(t)$, тогда структуру этого сигнального пакета можно записать следующим образом: $s_M(t) = [x_M(t), x_M(t)]$. Если вычислить «свертку» пакета с самим собой (автокорреляция) $R_M(\tau) = s_M(t) \otimes s_M(t)$, то она будет представлять собой два значительных пика, разнесенных друг от друга на временной интервал T_s равный длительности одного сложного сигнала $x(t)$ (рис. 1б). Таким образом, измерить длительность сигнала T_r на приемной стороне можно с помощью вычисления АКФ принятого пакета $r_M(t)$:

$$R_M(\tau) = r_M(t) \otimes r_M(t). \quad (4)$$

Компенсация Δ в принятом пакете выполняется по аналогичному сценарию, выше рассмотренной работы [5].

Экспериментальные исследования по предлагаемой нами методике проводились на акустогидрофизическом полигоне ТОИ ДВО РАН м. Шульц 17 августа 2013 г. Приемник был установлен в одном метре от дна при глубине моря 10 м и на расстояние 50 м от берега. В качестве излучателя использовался цилиндрический пьезокерамический излучатель. Характеристики излучателя позволяют работать с широкополосными сигналами на центральной частоте 2 кГц. Излучатель был свешен с яхты, которая перемещалась по заданной траектории в течение всего эксперимента. Географические координаты траектории движения регистрировались системой GPS. Для того чтобы точка излучения держалась на одном горизонте, излучатель был снабжен подводным крылом. Измерения проводились в течение 2 часов.

На рис. 2а представлена схема эксперимента. Яхта двигалась по траектории треугольника (на удаление от приемника, параллельно приемнику и навстречу приемнику). Вертикальные профили скорости звука (ПСЗ), представленные на рис. 2б, были измерены в точках, указанных серым цветом на рис. 2а, в начале и в конце эксперимента. Используя данные системы GPS, которая измеряет координаты движения источника каждую секунду, были рассчитаны: изменение дистанции от приемника до источника (рис. 3а), азимут между приемником и излучателем (рис. 3б); и относительная скорость движения приемник-источник V_{GPS} (рис. 3в).

Для зондирования использовался сигнальный пакет, который состоял из блока сложных сигналов (длительностью около 2 с) $s(t)$, секундной паузы и тонального сигнала на несущей частоте 2 кГц (длительность 2 с) $x_{\text{ТОН}}(t)$: $s_{\text{ПАКЕТ}}(t) = [s(t), 0, x_{\text{ТОН}}(t)]$.

Блок сложных сигналов состоял из: 2 ЛЧМ сигналов $x_{\text{ЛЧМ}}(t)$ (центральная частота 2 кГц, полоса от 1,6 до 2,4 кГц, длительность одного ЛЧМ сигнала 0,2 с), расположенных в начале и конце блока, и 2 М-последовательности на несущей $x_M(t)$ (длина после-

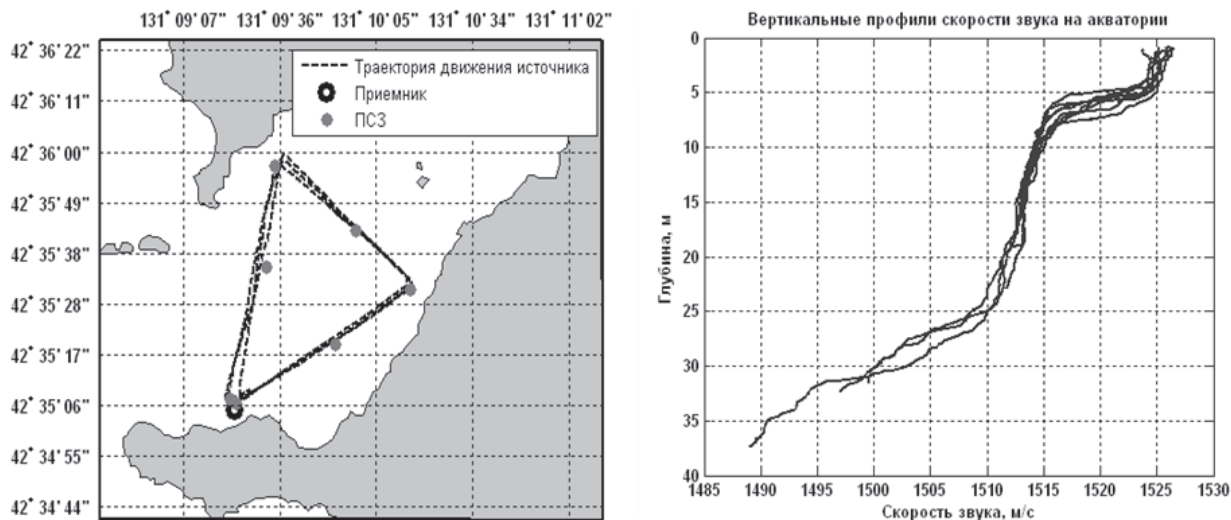


Рис. 2: Географическая схема эксперимента — слева. Профили скорости звука — справа

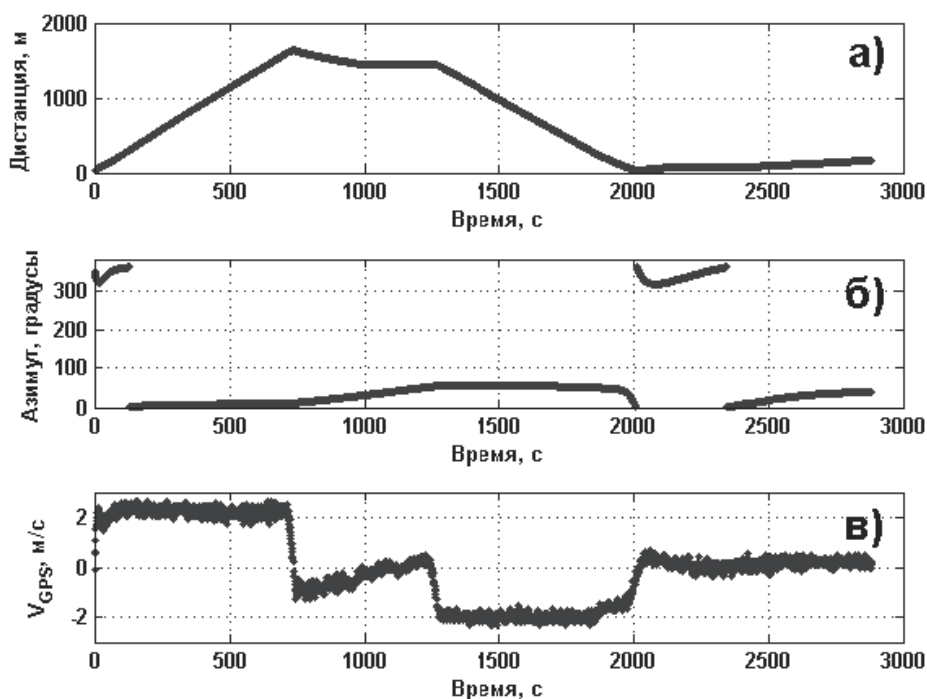


Рис. 3: Параметры движения источника относительно приемника, рассчитанные с помощью данных GPS: а) Дистанция до приемника до источника; б) Азимут между приемником и источником; в) Скорость относительного движения приемник-источник v_{GPS}

довательности 255 символов, $f_0 = 2$ кГц, на один символ последовательности приходится 4 периода несущей частоты, длительность одной М-последовательности на несущей 0,51 с), расположенных в центре блока: $s(t) = [x_{лчм}(t), x_M(t), x_M(t), x_{лчм}(t)]$.

На приемной стороне сигнал с гидрофона оцифровался на частоте дискретизации $F_S = 48$ кГц и записывался на ПК. Перед обработкой все сигнальные пакеты фильтровались в полосе частот от 1,5 до 2,5 кГц.

Обработка тональных сигналов во всех пакетах за-

ключалась в вычислении спектра принятого сигнала с помощью преобразования Фурье и поиска частоты, соответствующей максимуму спектра. Обработка блока сложных сигналов и последующая оценка Δ проводилась в соответствии (3) и (4).

Для того чтобы избежать путаницы при сопоставлении оценок одной и той же физической величины (доплеровского смещения частоты f), полученной с помощью измерений GPS и нескольких акустических методик, результаты оценок, соответствующие

Таблица I: Сопоставление результатов измерений

Измеряемая физическая величина f	Обозначение оценок f , полученных с помощью различных подходов	Краткое описание методик
$f = (1 + \Delta) f_0$	$f_{GPS} = (1 + \Delta_{GPS}) f_0 = \left(1 + \frac{v_{GPS}}{C}\right) f_0$	измерение смещений несущей частоты с помощью значений v_{GPS} , полученных системой GPS.
	$f_T = (1 + \Delta_T) f_0$	измерение смещения несущей частоты с помощью оценок Δ_T , полученных по формуле (4)
	$f_{ТОН}$	измерение смещения несущей частоты с помощью тонального сигнала
	$f_{лчм} = (1 + \Delta_{лчм}) f_0$	измерение смещения несущей частоты с помощью оценок $\Delta_{лчм}$, полученных по формуле (3).

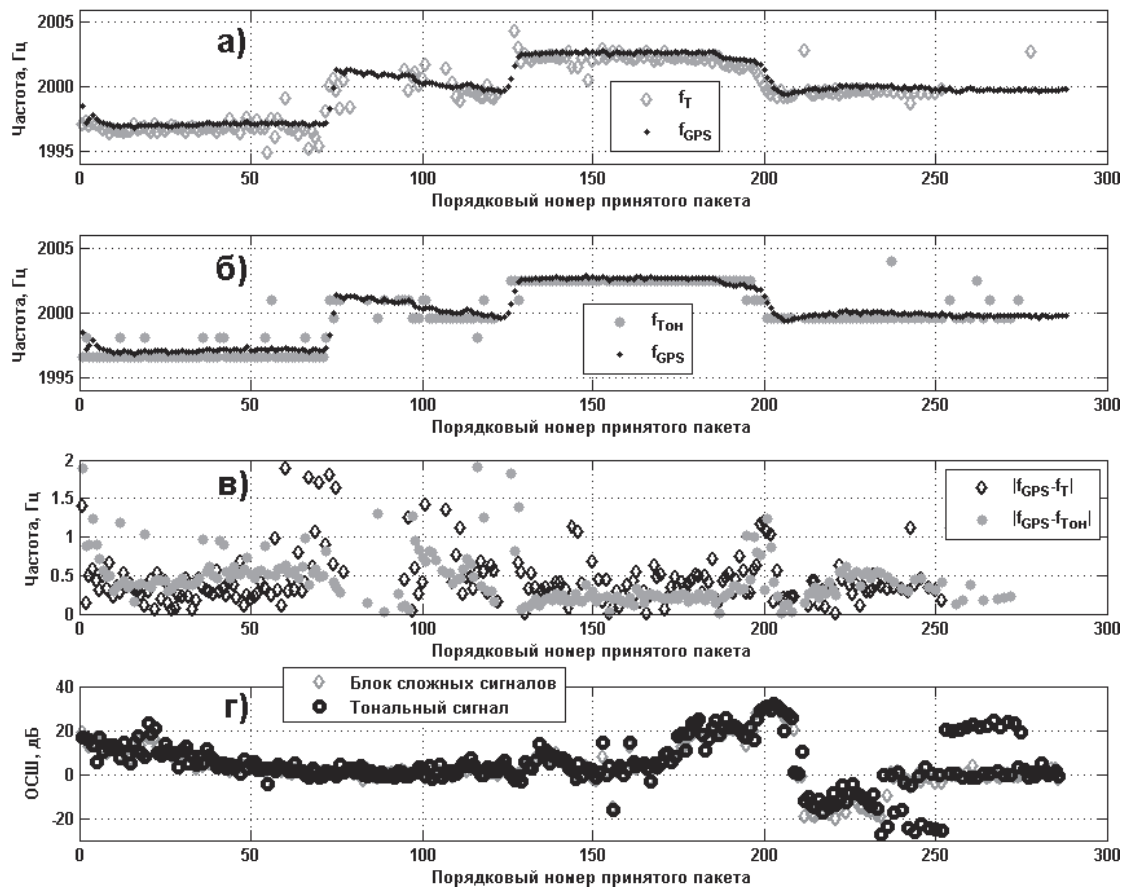


Рис. 4: Результаты обработки сигнального пакета, с помощью методики представленной в этой работе и измерений системы GPS. Сопоставление результатов измерения f : а) акустическая методика f_T и данные GPS f_{GPS} ; б) акустическая методика $f_{ТОН}$ и данные GPS f_{GPS} ; в) Оценка точности измерений относительно данных GPS $|f_{GPS} - f_{ТОН}|$ и $|f_{GPS} - f_T|$; г) отношение сигнал-шум для $f_{ТОН}$ и f_T

щие различным подходам, были обозначены как указано в табл. 1. Для преобразования относительной скорости движения v_{GPS} в доплеровское смещение несущей частоты использовались следующие значения: $f_0 = 2$ кГц и среднее значение скорости звука в волноводе $C = 1513,87$ м/с.

На рис. 4 представлены результаты измерений доплеровского смещения частоты f , используя сигнальный пакет. Графическое сопоставление f_{GPS} с f_T и $f_{ТОН}$ приведено на рис. 4а и 4б. Как видно из графиков оценки доплеровского смещения частоты, полученные различными подходами, дают близкие значе-

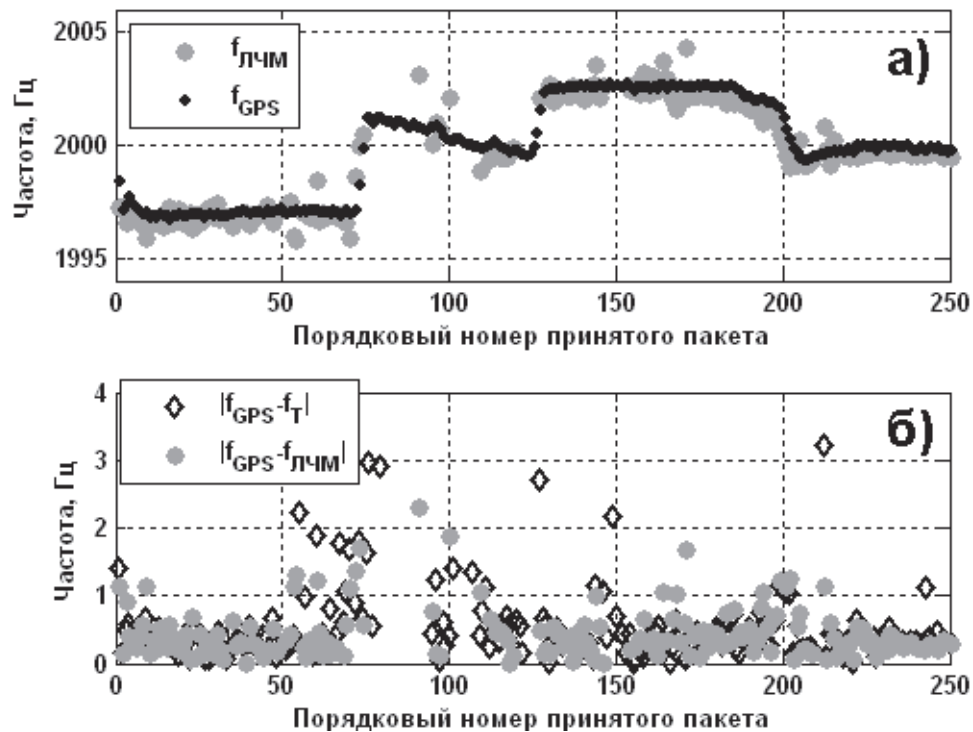


Рис. 5: Результаты обработки сигнального пакета с помощью ЛЧМ-сигналов и измерений системы GPS. Сопоставление результатов измерения f : а) акустическая методика $f_{\text{ЛЧМ}}$ и данные GPS f_{GPS} ; б) Оценка точности измерений относительно данных GPS $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{T}}|$ и $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{ЛЧМ}}|$

ния. Отсутствие отдельных значений f_{T} и $f_{\text{ТОН}}$ связано с довольно высокими уровнями шума, вызванными перемещением нескольких туристических катеров на акватории. Приблизительная оценка отношения сигнал-шум (ОСШ), приведена на рис. 4г. Сравнения точности оценок между акустическими методами относительно измерений GPS $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{ТОН}}|$ и $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{T}}|$ приведено на рис. 4в.

Для результатов, полученных по тональному сигналу и по предлагаемой в докладе методике, можно заключить, что эффективность точности (результативность) оценок уменьшается при значении ОСШ ниже ~ 5 дБ. Расчет более точного порогового значения может быть сделан при контролируемом уровне и характере шума.

Результаты сопоставления точностей акустических методов f_{T} и $f_{\text{ТОН}}$ относительно f_{GPS} показали, что обе методики дают близкие друг к другу оценки (средне-квадратическое отклонение $\langle |f_{\text{GPS}} - f_{\text{ТОН}}| \rangle = 0,273$ Гц, $\langle |f_{\text{GPS}} - f_{\text{T}}| \rangle = 0,270$ Гц; процентное соотношения количества непригодных к акустической обработке пакетов к общему числу принятых пакетов $N[f_{\text{ТОН}}] = 16\%$, $N[f_{\text{T}}] = 20\%$).

На рис. 5а представлено сопоставление оценок, полученных с помощью методик, описанной в работе [5] и представленной в данном докладе. На рис. 5б изображено сопоставление оценок доплеровского смещения

$f_{\text{ЛЧМ}}$ и f_{GPS} , а $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{T}}|$ и $|f_{\text{GPS}} - f_{\text{ЛЧМ}}|$. Анализ точности $f_{\text{ЛЧМ}}$ относительно f_{GPS} дал следующие значения $\langle |f_{\text{GPS}} - f_{\text{ЛЧМ}}| \rangle = 0,304$ Гц, $N[f_{\text{ЛЧМ}}] = 30\%$.

Подводя итоги можно заключить, что результаты проведенных исследований в условиях мелкого моря при наличии высокого уровня шумовых и импульсных помех показали возможность оценки доплеровского смещения частоты с помощью сигнального пакета, состоящего из сигналов с «хорошими» автокорреляционными свойствами. Значение максимальной относительной скорости движения составляло 2,2 м/с (4,28 узла). Сопоставления с другими акустическими подходами подтвердили работоспособность, корректность и эффективность предложенной в докладе методики. Данная методика, аналогично работе [5], позволяет снизить вычислительную нагрузку при обработке акустических данных на приемной стороне. Более того, она позволяет использовать не только устойчивые к эффекту Доплера сигналы, типа ЛЧМ-сигналов, а значительно расширяет спектр сложных сигналов пригодных для оценки доплеровского смещения, например, сигналы, сгенерированные на основе фазовой и частотной модуляций.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке молодежных грантов ДВО РАН 15-П-1-047 и РФФИ 15-35-20191 («мол_а_вед») и НШ-6084.2014.5.

- [1] Варакин Л.Е. Системы связи с шумоподобными сигналами. (М.: Радио и связь, 1985).
- [2] Захаров Ю.В., Коданев В.П. Акуст. журн. **41**, №2. С. 254. (1995).
- [3] Курьянов Б.Ф., Пенкин М.М. Акуст. журн. **56**, №2. С. 245. (2010).
- [4] Stojanovic M., Catipovic J., Proakis J. Oceanic Engineering, IEEE Journal of. **19**, N1. P. 100. (1994).
- [5] Sharij B.S., Neashan J., Hinton O.R., Adams A.E. Oceanic Engineering, IEEE Journal of. **25**, N1. P. 52. (2000).

Experimental testing of the estimation of the Doppler shift using complex signals with «good» autocorrelation properties

A.V. Burenin^{a,b}, V.V. Bezotvetnikh, E.A. Voitenko, M.S. Lebedev, D.S. Strobykin, A.A. Tagiltsev

V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch of Russian Academy of Science, Vladivostok, 690041, Russia
E-mail: ^ashurck_burenin1@mail.ru, ^aalex_bu@poi.dvo.ru

This paper presents a method of estimating the Doppler shift, which is based on the application of the signal package, consisting of complex signals with «good» autocorrelation properties and operations of autocorrelation (the «convolution» of the received signal with itself) on the receiver. The experimental results validate the approach. Full-scale data obtained are compared with measurements of GPS and similar an acoustic approaches to estimate the Doppler shift.

PACS: 43.28.Py

Keywords: estimation of the Doppler effect, M-sequence-modulated carrier, autocorrelation.

Received 28.11.2014.

Сведения об авторах

1. Буренин Александр Викторович — канд. физ.-мат. наук, научный сотрудник; тел.: +7 (423-2) 311-631, e-mail: shurck_burenin1@mail.ru, alex_bu@poi.dvo.ru.
2. Безответных Владимир Викторович — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; тел.: +7 (423-2) 311-631, e-mail: vlad_bez@poi.dvo.ru.
3. Войтенко Евгений Анатольевич — научный сотрудник; тел.: +7 (423-2) 311-631, e-mail: evgeni@poi.dvo.ru.
4. Лебедев Михаил Сергеевич — научный сотрудник; тел.: +7 (423-2) 311-631, e-mail: ben-solo@mail.ru.
5. Стробыкин Дмитрий Сергеевич — научный сотрудник; тел.: +7(423-2)311-631, e-mail: doom46@yandex.ru.
6. Тагильцев Александр Анатольевич — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; тел.: +7 (423-2) 311-631, e-mail: atagiltsev@poi.dvo.ru.