

DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551

CAUSES OF WAVE ARTEFACTS APPEARANCES ON THE SEABED DIGITAL TERRAIN MODELS

P. I. Barashok

ROMONA Inc., Yuzhno-Sakhalinsk, Russian Federation

All over the world, there are many areas where multibeam echosounder systems data are extremely important and circumstances require the high-resolution data. The modern hydroacoustic equipment develops every day and it is necessary to design and test new methods and software of data acquisition. Nowadays, in the century of high expensive engineering works the preferences are paid to the complete environment explorations. Such researches include data acquire by different sensors simultaneously, for example, analog surveys of the pipeline construction areas require data collecting from sides-can sonar, multi-beam echosounder, number of sub-bottom profilers with various resolution and penetration, system of magnetometers and etc. Therefore, every data type is strongly regulated by quality requirements. However, unexpected situations have a place and it seems the single way is to provide the data re-acquisition, what is not favorably for most of the companies. In this article, some causes of artefacts emergence in bathymetric data, the artefacts forms and premises for this mistakes compensation are described. The influence of such parameters as pivot point location, time delay in motion reference unit data, data synchronization, zero surface for motion reference unit installation, offsets measurement is analyzed. This article represents the dynamic model creation of the vessel with variable center of rotation, data examples which have been influenced by factors of quality regression. In addition, the formula of appropriate data transmission by RS 232 are derived in special subchapter. Moreover, this article contains the results of proper tests and the direction of further explorations has been determined due to improvement of acquiring data.

Keywords: high-resolution shallow water survey, multi-beam echo sounder, Motion Reference Unit, offset measurement, pivot point location, artifacts on bathymetry data, angular errors.

For citations:

Barashok, Pavel I. "Causes of wave artefacts appearances on the seabed digital terrain models." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova* 9.3 (2017): 537–551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551.

УДК 528.47

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АРТЕФАКТОВ В ФОРМЕ «ВОЛН» НА ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЯХ РЕЛЬЕФА ДНА

П. И. Барашок

ЗАО «РОМОНА», Южно-Сахалинск, Российская Федерация

Существует много областей применения данных батиметрии, но в последнее время все большее внимание уделяется данным высокого разрешения. Современная гидроакустическая аппаратура быстро развивается, предоставляя широкий спектр возможностей, а, значит, необходимо одновременно развивать и методы, контролирующие сбор данных высокого разрешения. Ввиду высоких затрат на проведение инженерных изысканий, сегодня для экономии средств все большее внимание уделяется комплексным исследованиям. Такие исследования подразумевают сбор данных различными сенсорами одновременно, например, аналоговые изыскания на трассе строительства трубопровода, когда одновременно ведется запись данных гидролокатора бокового обзора, многолучевого эхолота, нескольких профилографов с разным разрешением и проникающей способностью (penetration), системой магнитометров и др. Следовательно, на каждый тип данных априорно накладываются жесткие требования относительно качества. Работа посвящается поиску причин возникновения артефактов в виде волн на данных батиметрии, губительно влияющих на их качество. Найдены и рассмотрены основные предпосылки возникновения этих волн на данных батиметрии. Предложены пути компенсации вышеуказанных ошибок. Анализируется влияние на данные таких параметров, как положение центра вращения судна, появление ненулевых временных задержек,

синхронизация данных программными средствами, установка нулевых плоскостей датчиков перемещения судна и измерения смещений. Подняты вопросы создания динамической модели судна с изменяющимся центром вращения, представлены примеры данных, на которые оказывают влияние различные ухудшающие качество факторы. Представлена формула для расчета оптимальной скорости передачи данных протоколом RS 232. Изложены результаты проводимых тестирований, определены области дальнейших исследований, направленных на улучшение качества получаемых данных.

Ключевые слова: съемка рельефа дна высокого разрешения, многолучевой эхолот, датчик перемещения судна, измерение смещений, положение центра вращения судна, артефакты на данных батиметрии, угловые ошибки.

Для цитирования:

Барашок П. И. Причины возникновения артефактов в форме «волн» на цифровых моделях рельефа дна / П. И. Барашок // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2017. — Т. 9. — № 3. — С. 537–551. DOI: 10.21821/2309-5180-2017-9-3-537-551.

Введение (Introduction)

При выполнении детальных мелководных съемок при помощи комплексов на базе многолучевых эхолотов, когда создается цифровая модель рельефа дна (ЦМРД) с гридом 0,1 – 0,3 м, существенное значение приобретают характеристики судна-носителя аппаратуры, взаимное положение антенн многолучевого эхолота (МЛЭ) и датчиков динамических перемещений судна (ДПС) [1], [2]. Также некоторые положения теории судна, например, расположение центра вращения судна (Pivot Point), которые ранее были актуальны для судоводителей теперь становятся важными и для гидрографов, так как неверно определенные параметры будут вносить погрешности в данные гидрографических съемок и способствовать появлению артефактов. В настоящее время в связи с тем, что многие суда проходят модернизацию с целью проведения каких-либо специфических работ или для определенных районов плавания, зачастую вносятся изменения в конструктивную часть судов и распределение масс. Также иногда, ввиду определенных финансовых ситуаций, гидрографам бывает необходимо собрать качественные данные в плохую погоду, когда высота волн достигает двух метров. В таких случаях многие ошибки, особенно угловые, становятся наиболее заметными [3], [4]. Таким образом, в настоящее время необходимо уметь быстро и с малыми финансовыми вложениями проводить калибровку положения центра вращения судна, так как эта проблема в настоящее время является актуальной как для гидрографов, так и для судоводителей.

В настоящее время не вся работа, которую выполняют гидрографы, относится к обеспечению безопасности судоходства. Сегодня выполняются многие задачи, требующие следующих решений:

- высокоточного позиционирования (укладка трубопроводов и кабелей, определение газовых плюмов, постановка нефтегазовых платформ, позиционирование автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА и АПА), взятие проб, морская сейсмическая разведка и т. д.) [5];
- измерения глубин с высокой точностью и дискретностью (контроль дноуглубления, инспекция трубопроводов, поиски взрывоопасных предметов, отслеживание изменения морского дна) [6];
- процесс постобработки и визуализации данных [7].

Часто такие работы нельзя отнести к классической гидрографии, поэтому многие руководящие документы теряют свою силу.

Как видно из примера, приведенного на рис. 1, современные МЛЭ способны детектировать сильно расчлененную поверхность морского дна и объектов на нем.

Точность позиционирования и корректность пересчета наклонных дальностей, измеренных многолучевым эхолотом (МЛЭ) зависит от множества факторов. Одним из наиболее важных моментов пересчета является компенсация позиции и высоты прибора за углы крена, дифферента и движение судна вдоль оси Z .

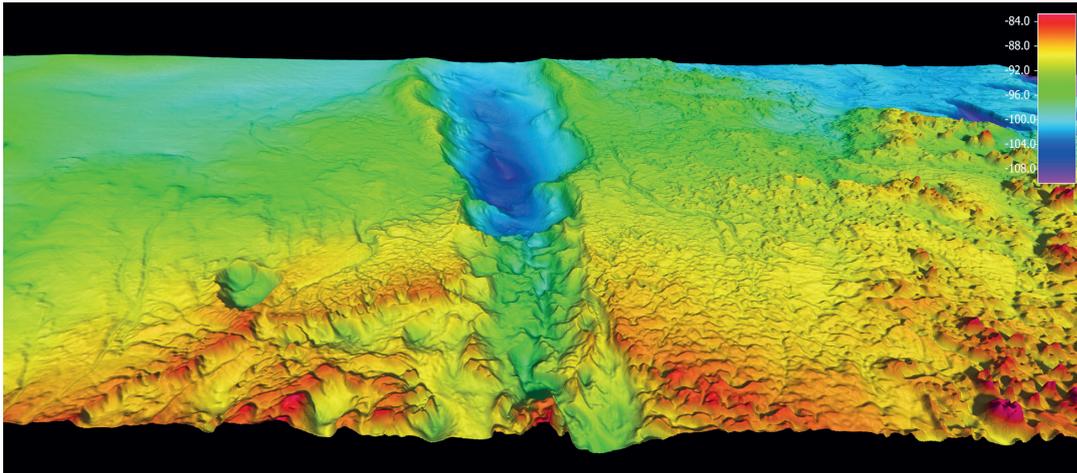


Рис. 1. Пример данных площадной съемки рельефа дна со сложной геологией, полученных при помощи многолучевого эхолота

Отдельно следует остановиться на вертикальном перемещении. В настоящее время существует множество приборов (MRU — Measurement Reference Unit), позволяющих вычислять углы крена, дифферента и движение судна вдоль осей x , y , z . Ключевым является слово *вычислять*, так как датчик перемещений не способен измерять эти значения, а только пересчитывать их из измеренных ускорений.

Современные датчики перемещений судна (ДПС) в основном состоят из трех акселерометров и трех гироскопов, расположенных вдоль трех основных осей [8], [9]. Ввиду конструкции, на датчики такого типа оказывают существенное влияние изменения курса и скорости судна носителя. При изменении этих показателей на акселерометры и гироскопы будут действовать силы инерции, поэтому необходимо правильно компенсировать подобные изменения. В большинстве современных ДПС реализован прием NMEA сообщений (GPVTG — строка скорости и GRHDT — строка курса) и разработаны специальные алгоритмы, автоматически учитывающие изменения курса и скорости [10], [11].

Основная информация, которую может предоставить ДПС:

- *Roll* — угол бортовой качки;
- *Pitch* — угол килевой качки;
- *Heave* — движение точки вазового центра прибора вдоль вертикальной оси;
- *Surge* — движение точки фазового центра прибора вдоль оси, направленной вперед и перпендикулярной диаметральной плоскости судна;
- *Sway* — движение точки фазового центра прибора вдоль оси, направленной в борт и перпендикулярной диаметральной плоскости судна.

На рис. 2 показаны параметры, которые можно получить при использовании вышеуказанного датчика, установленного на судне.

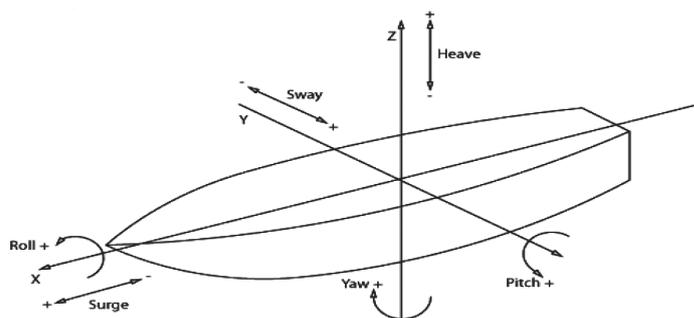


Рис. 2. Углы бортовой качки (*Roll*), килевой (*Pitch*), вертикального перемещения (*Heave*), движение судна в направлении нос – корма (*Surge*), движение в направлении правый – левый борт (*Sway*)

При вычислении положения пятен облучения в пространстве используются данные *Heave* (вертикальное перемещение), *Pitch* (килевая качка), *Roll* (бортовая качка) [12]. Показания движения судна по оси *Z* (*Heave*), как правило, поступают из прибора в метрах и являются относительной величиной, которая не привязана ни к какой плоскости отсчета. Если из прибора поступило значение 0,5 м, то это означает, что за строго определенный период, заданный пользователем, конкретная точка на судне поднялась на 0,5 м. Для выявления ошибок, связанных с работой датчика перемещения судна, необходимо поэтапно разобрать процесс компенсации данных за *Roll*, *Pitch*, *Heave* от начала их вычисления до момента поступления в программу сбора данных. На рис. 3 изображены данные съемки рельефа дна, полученные при плохих погодных условиях, когда высота волн достигала 2,5 м, при сильном ветре и течении в борт судна. Невооруженным взглядом видно, насколько сильно данные искажаются при неправильном учете углов крена, дифферента и вертикального перемещения судна (см. рис. 3, *а* — неправильно скомпенсированные данные; рис. 3, *б* — скомпенсированные данные).

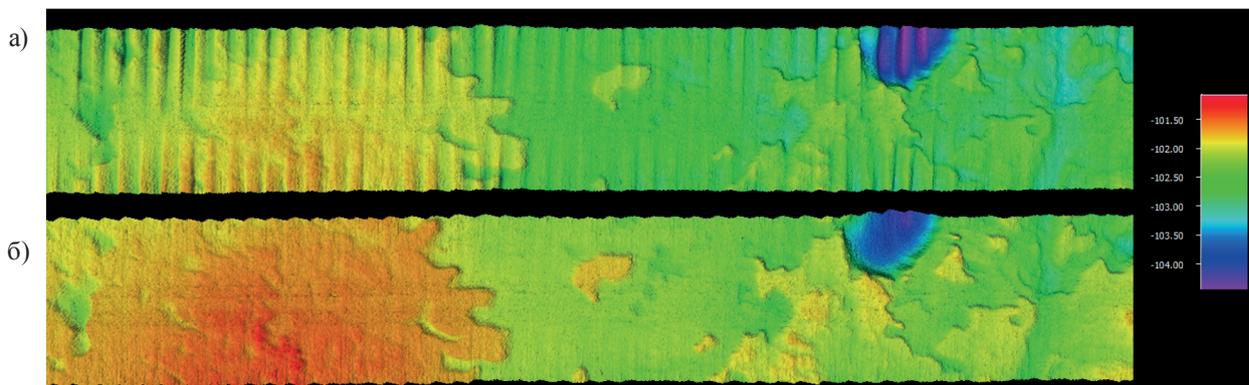


Рис. 3. Цифровая модель рельефа дна при неправильной (*а*) и правильной компенсации (*б*)

Как видно из рис. 3, неправильная компенсация данных может вызывать сильное искажение рельефа дна, что критично для современной гидрографии, например, при проведении инспекций трубопроводов или при контроле дноуглубительных работ. Существует много причин появления «волн» на данных. В статье рассмотрены некоторые из них и предложены методы контроля и компенсации ошибок. Основными причинами являются:

- появление временной задержки данных;
- ошибка, возникающая из-за неправильно определенного центра вращения судна;
- ошибка из-за неправильно измеренных плеч между МЛЭ и ДПС и некорректной установки нулевых плоскостей ДПС.

Основная часть (Main Part)

Появление временной задержки данных. Процесс компенсации положения глубин за углы крена, дифферента и проседания судна можно разделить на четыре этапа: 1-й этап — измерение и пересчет показаний внутри датчика перемещения судна; 2-й этап — передача данных через каналы связи; 3-й этап — поступление и распределение данных в ПК; 4-й этап — компенсация положения через пересчет в программном обеспечении.

1-й этап — *измерение ускорений прибором (ДПС) и процесс вычисления внутри прибора*. Следует отметить, что ДПС разных производителей имеют разную точность, которая зависит, в том числе, от качества математических алгоритмов, скорости пересчета, методов фильтрации и уравнивания данных. После необходимых вычислений данные формируются в строку для передачи и поступают в буфер прибора. После прихода данных в буфер следует процесс передачи, большинство приборов оснащены протоколом передачи RS232 (com-port), либо LAN-выходом. Зачастую для передачи данных от ДПС к ПК используют усовершенствованные преобразователи

последовательных интерфейсов Ethernet серии NPort. Системы связи на базе NPort очень удобны при работах, так как нет необходимости протягивать лишние кабели по судну или катеру, что значительно сокращает время мобилизации, но при неправильно настроенной локальной сети могут возникать потери данных или временные задержки [13].

2-й этап — *передача данных по каналам связи*. На данном этапе могут возникать потери и задержки данных. Рассмотрим два основных типа передачи: *com-port* (протокол RS-232) и *internet-соединение*. Отличием RS232 от параллельных портов, которые содержат до восьми информационных линий и способны передавать байт за один такт, является способность передачи данных по одной линии, однако ввиду последовательной передачи данных (бит за битом) значительно уменьшается скорость передачи [14], [15]. В момент, когда данные не передаются, на линии устанавливается уровень логической единицы — *режим ожидания*. В момент активации режима передачи данных передается стартовый бит (логический ноль) длительностью в одну элементарную посылку. Далее все биты данных посылаются последовательно: младший бит — первым, затем бит проверки четности, если требуется, и стоповый бит длительностью стоповой посылки — 1, 1,5 или 2 бита (рис. 4). Эти параметры, наряду со скоростью передачи, являются базовыми и должны быть четко выбраны при настройках систем.



Рис. 4. Схема последовательности передачи данных

Скорость передачи информации измеряется в бодах (количество битов за 1 с). Зная скорость в бодах можно вычислить количество передаваемых символов в секунду. При передаче на скорости 9600 бод/с, 8 бит данных, один стоповый бит и стартовый бит общая длина посылки равна 10 битам, т. е. $9600/10 = 960$ символов в секунду. Выведем необходимые формулы для расчета скорости передачи символов: $K = V/N$, где K — количество символов, передаваемых за 1 с; V — скорость передачи, бод/с; N — длина последовательности, бит, $N = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4)$; n_1 — стартовый бит; n_2 — количество бит данных; n_3 — бит проверки на четность; n_4 — стоповая посылка (1, 1,5 или 2 бита). Таким образом, минимальная скорость передачи рассчитывается по формуле:

$$V = K \cdot N.$$

Перед написанием статьи, во время сбора материалов, были произведены различные тестирования. Одним из тестов являлась запись данных датчика перемещения судна, установленного на специальной площадке, имеющей одну точку вращения. При записи использовались разные настройки соединения (скорость передачи). Тестируемый прибор способен экспортировать множество форматов строк, во время тестирования ДПС генерировал сообщение \$PSMCS. Строка имеет вид: \$PSMCS, \pm уу.ууу, \pm хх.ххх, \pm hh.hh, пример строки — \$PSMCS,+00.089,-00.888,-00.04. Расшифровка строки приведена в следующей таблице.

Расшифровка строки \$PSMCS

уу.ууу	Бортовая качка, град.	$\pm 30^\circ$ — разрешение 0,001°
хх.ххх	Килевая качка, град.	$\pm 30^\circ$ — разрешение 0,001°
hh.hh	Вертикальное перемещение, м	± 10 м — разрешение 0,01м

Во время тестов ДПС был настроен на выдачу сообщений с частотой 90 Гц. В результате выяснилось, что при стандартных скоростях передачи ниже 38400 бод/с некоторые сообщения приходили не целиком или вовсе терялись. Данный тест подтверждает формулу на с. 541. Количество передаваемых символов в одном сообщении равно 29 и, соответственно, в секунду передавалось $29 \cdot 90 = 2610$ символов. Определим минимальную скорость передачи: $2610 \cdot 10 = 26100$ бод/с. Скорость передачи данных также оказывает влияние на целостность передаваемых пакетов [16]. При большой длине кабеля и маленькой скорости передачи в строках могут появляться посторонние символы. При возникновении таких ситуаций программные средства не будут корректно воспринимать данные. Зависимость скорости передачи от длины кабеля производители приборов обычно указывают в инструкциях, но на практике скорость нужно контролировать и при необходимости корректировать.

Еще одной возможной причиной задержек могут являться программные задержки. В настоящее время профессиональные программные средства сбора данных быстро развиваются, но при неправильной настройке могут возникать задержки. Наиболее распространенной ошибкой при настройке синхронизации является выдача строки ZDA (точного GPS времени) с одного спутникового приемника, а сигнала 1PPS — с другого. При таких настройках возникают ошибки синхронизации, что приводит в том числе к неправильной компенсации данных многолучевого эхолота. Однако в процессе постобработки многие современные программные средства позволяют изменять временную задержку, отображая при этом изменения данных. Поэтому, если «волны» на данных вызваны временной задержкой, то такие данные можно довольно быстро исправить.

Ошибка, вызванная несовпадением осей вращения судна и установленного ДПС. Ошибка, вызванная неучтенным несовпадением осей вращения судна и установленного ДПС, весьма сильно влияет на правильность компенсации данных многолучевого эхолота. Как отмечалось ранее, все современные ДПС вычисляют углы крена, дифферента и вертикальные перемещения судна из измеренных ускорений и углов. Как правило акселерометры, измеряющие ускорения, и гироскопы, измеряющие угловые значение, внутри прибора располагаются вдоль трех основных осей: вдоль ДПС, поперек ДПС и вертикально вверх, измеряя ускорения и углы каждый относительно соответствующей оси. Рис. 5 демонстрирует несовпадение осей судовой системы координат и осей установленного прибора.

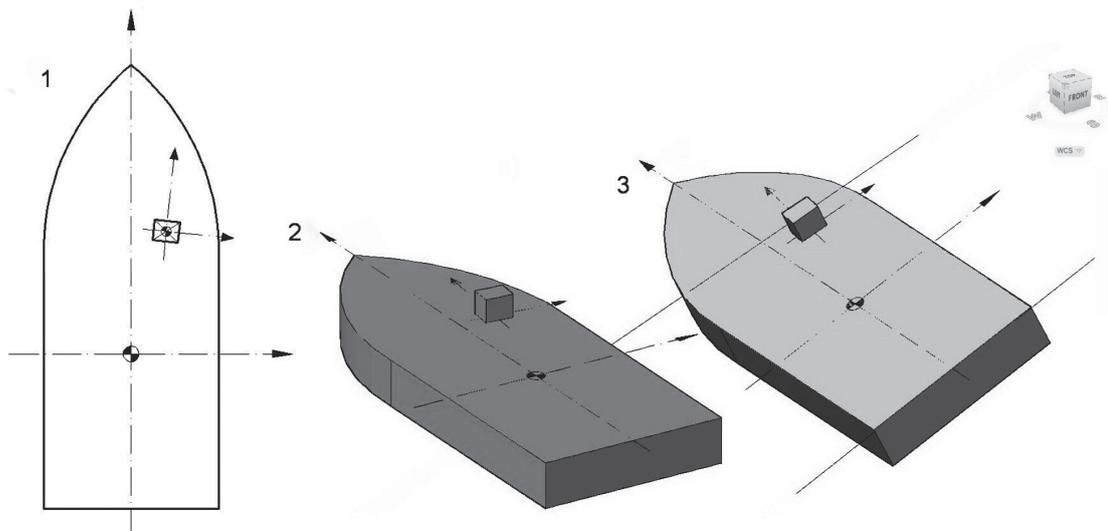


Рис. 5. Несовпадение осей судна и ДПС:

1 — вид в плане; 2 — судно в начальном положении; 3 — судно имеет крен на левый борт

Рассмотрим три случая, которые изображены на рис. 6. Оси XI , YI , ZI имеют начальное положение, причем ось XI направлена в борт судна, ось YI направлена в нос судна, а ось ZI направлена вверх.

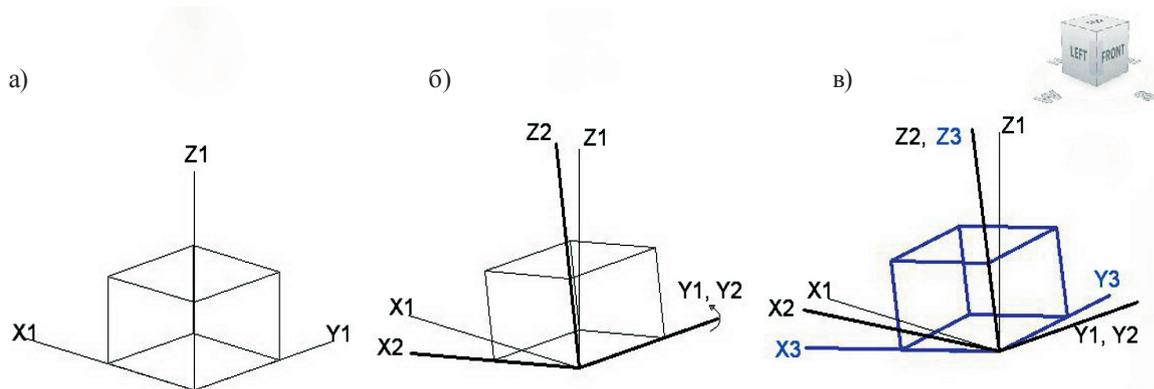


Рис. 6. Три положения датчика перемещения судна

1-й случай. На рис. 3, *a* изображен ДПС, находящийся в равновесии (в нулевой плоскости по всем осям), причем все оси прибора и судовые оси — коллинеарные, а на акселерометры и гироскопы датчика перемещения судна оказывают влияние только постоянные силы, объект — в состоянии покоя.

2-й случай. Оси ДПС и судовые оси на рис. 6, *б* по-прежнему сонаправлены. У судна появился крен α на левый борт (судно повернулось вокруг продольной оси Y на угол α). В результате вертикальная ось прибора $Z1$ и поперечная ось прибора $X1$ отклонятся в положения $Z2$ и $X2$ соответственно, что приведет к появлению дополнительных сил, действующих на акселерометры и гироскопы, расположенные в этих плоскостях. Движение вдоль оси Z будет равно проекции на ось $Z1$, а движение вдоль оси X равно проекции на ось $X1$. Угол крена будет рассчитан из показаний акселерометров и гироскопов правильно, так как оси прибора совпадают с основными осями судна.

3-й случай. Как и во втором случае, у судна на рис. 6, *в* возник угол крена α , только оси прибора и оси судна неколлинеарные (продольная ось прибора и продольная ось судна не параллельны). В результате возникнут силы, действующие на все акселерометры и гироскопы вдоль осей X, Y, Z , что приведет к следующим ошибкам в вычислениях: неправильному определению угла крена и ложному углу дифферента. В итоге для судна определятся неправильные углы бортовой качки — *Roll*, килевой качки — *Pith* и данные многолучевого эхолота будут скомпенсированы неправильно.

Таким образом, правильность установки ДПС значительно влияет на компенсацию данных многолучевого эхолота. Однако в настоящее время многие производители навигационного оборудования нашли несколько способов для полной или частичной компенсации ошибки неправильной установки прибора. Так, производители инерциальных навигационных систем пятого поколения создали алгоритмы, учитывающие данные акселерометров для расчета курса судна (в отличие от систем четвертого поколения, где решающее значение имели GNSS-измерения), и при калибровке курсовых коэффициентов инерциальной системы автоматически вводятся поправки в датчик перемещения судна. Другой способ — это совмещение гироскопа, работающего на основе использования эффекта Саньяка и датчика перемещения судна в один прибор. В таких системах угловая поправка, полученная при стандартной калибровке гироскопа, будет равна углу несоответствия осей ДПС и судна.

Ошибка, возникающая из-за неправильно определенного центра вращения судна. Рассмотрим проблемы, возникающие при ошибочном определении центра вращения судна (ЦВС). На рис. 7 показано, что при ошибке в определении ЦВС, равной 2,5 м (в плоскости *нос – корма*) и амплитуде дифферента судна в 5° возникает ошибка определения высоты в 0,22 м. Следует иметь в виду, что в реальных условиях будет возникать дополнительная ошибка в плоскости, перпендикулярной диаметральной, следовательно, результирующая ошибка (получаемая при сложении бортовой и килевой качки) может стать еще больше.

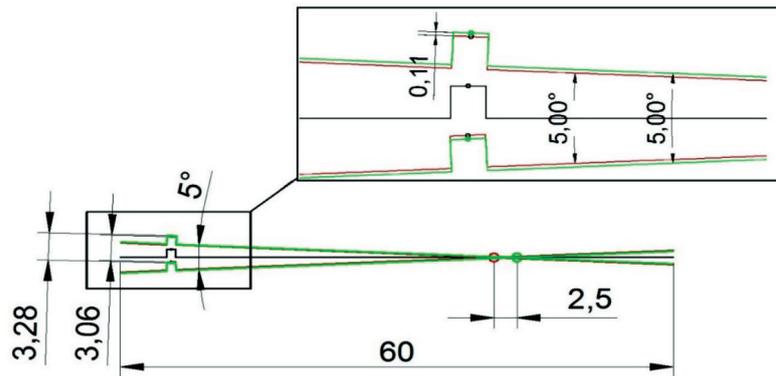


Рис. 7. Вращение плоскости вокруг разных точек

Одной из возможных причин появления «волн» на данных может являться неправильно определенное положение ЦВС. В настоящее время эта проблема весьма актуальна в инженерной гидрографии и смежных направлениях науки, чаще всего из-за изменения конструктивной части судов. Ввиду активного развития поисковой техники и модернизации способов проведения изысканий предъявляются определенные требования к судам, участвующим в работах. После постройки судна и его спуска на воду центр вращения судна указан в судовой документации. При проведении специфических работ необходима доработка судна, изменение его конструктивной части, а при подготовке к проекту судно загружают оборудованием (ТНПА, сейсмическая коса, акустические пушки и т. д.), провизией, топливом, водой и т. д. и все это оказывает влияние на положение ЦВС. Для точного проведения работ необходимо компенсировать вызванные ошибки путем введения поправок.

Динамическая модель центра вращения судна. Существуют формулы для расчета положения центра масс. Для определения трехмерного положения центра масс необходимо составить уравнения статистических моментов относительно основных координатных плоскостей: X , Y , Z . Отдельные области судна и грузы на нем разделить на части, учитывая при расчетах координаты и массы всех составляющих.

Статический момент относительно диаметральной плоскости судна (ось X): $DX_G = P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n$; статический момент относительно плоскости мидель-шпангоута: $DY_G = P_1y_1 + P_2y_2 + \dots + P_ny_n$; статический момент относительно оси Z : $DZ_G = P_1z_1 + P_2z_2 + \dots + P_nz_n$ (теорема статического момента). Масса судна $D = P_1 + P_2 + \dots + P_n$. Тогда формулы для расчета координат будут иметь вид [17]:

$$X_G = \frac{P_1x_1 + P_2x_2 + \dots + P_nx_n}{D}; \quad Y_G = \frac{P_1y_1 + P_2y_2 + \dots + P_ny_n}{D}; \quad Z_G = \frac{P_1z_1 + P_2z_2 + \dots + P_nz_n}{D}.$$

Таким образом, в результате вычислений будут получены координаты центра масс судна относительно изначально выбранной точки. Во время проведения работ необходимо вносить поправки за перераспределение масс (перекачка воды, топлива и т. д.), таким образом создавая изменяющуюся модель. Такой способ имеет свои недостатки, такие, например, как отсутствие поправок, компенсирующих гидродинамические свойства судна [18] и необходимость измерения массы всех элементов носителя аппаратуры, что не всегда возможно. Если судно претерпело конструктивные изменения, а добавленные детали не были должным образом измерены или занесены в судовую спецификацию, то вычисление массы в условиях мобилизации будет весьма проблематично. Вычислить центр вращения судна можно по показаниям GNSS-приемников (описание алгоритма вычислений выходит за рамки этой статьи).

При возникновении «волн» на данных можно проверить, вызваны ли они неправильно определенным центром вращения судна. Для этого в настоящее время производится подробный анализ

всех возможных способов компенсации данной проблемы и поиск новых решений, включающих использование данных GNSS-аппаратуры в режиме RTK, датчиков перемещения судна, тахеометров и т. д. В итоге планируется определить наиболее точный алгоритм поиска центра вращения судна и протестировать его на практике. Если результат окажется положительным, то следующим этапом станет разработка и написание программы, которая в режиме реального времени будет рассчитывать положение центра вращения и вносить коррекции в измеренные «плечи».

Ошибка из-за неправильно вычисленных координат сенсоров в судовой системе и некорректной установки нулевых плоскостей ДПС. Процесс мобилизации судна включает в себя множество этапов, одним из которых является определение координат сенсоров в судовой системе координат, или *измерение смещений* (Lever Arm Measurement / Offsets Measurement). После установки оборудования на плавсредство необходимо выбрать точку отсчета (в англоязычных источниках CRP (Central Reference Point), которая будет являться началом судовой системы координат. Логичнее всего совместить точку отсчета (далее — CRP) с центром вращения судна. Также необходимо определить направление осей. Во избежание путаницы следует задавать такое же направление, как в программе сбора информации и навигации.

Наиболее распространенным является следующий порядок направления осей: ось Y направлена в нос судна, ось X — в правый борт, ось Z — вверх. Однако некоторые производители ПО могут изменять этот порядок, что необходимо обязательно учитывать. После определения точки отсчета, если судно стоит в доке, необходимо задать нулевые плоскости для ДПС. Установка нулевых плоскостей — один из наиболее важных этапов при измерении смещений, так как эта плоскость будет считаться плоскостью отсчета для углов крена и дифферента. Для экономии средств желательно при установке нулевых плоскостей использовать два ДПС. Оба прибора поставить на ровном месте, максимально близко друг к другу, в качестве плоскости отсчета для одного прибора задать плоскость, в которой стоит судно, а второму прибору в качестве плоскости отсчета установить горизонталь. Горизонталь устанавливается на берегу при помощи штатива и триггера. Таким образом, в результате можно будет узнать разность плоскостей судовой системы координат и нормальной горизонтальной плоскости. Эти данные необходимо вносить в отчет о калибровке.

После выбора точки отсчета координат и подготовки оборудования выполняется измерение смещений. Существует два самых распространенных способа таких измерений: первый — при помощи тахеометра, второй — при помощи измерительной рулетки [19]. Первый способ гораздо точнее и продуктивнее, но бывают случаи, когда приходится выполнять измерения рулеткой. Для сохранения установленной плоскости в комплексе с рулеткой необходимо применять уровень, так как измерения без поправок за наклон элементов катера будут содержать дополнительные ошибки.

Для удобства на некоторых судах используют систему специальных марок. На судне, в доке, физически создается система специальных точек, которые имеют точные координаты в судовой системе. Затем производят контрольные измерения этих точек и для надежности создают дополнительный набор, при помощи которого будет производиться контроль созданных марок (контроль необходим ввиду деформации судна льдами, изгибов палубы и т. д.). В отчет по созданию точек необходимо внести информацию об отклонении плоскости судовой системы от горизонтальной плоскости (горизонтальная плоскость в данном случае — нормальный горизонтальный уровень, или плоскость, перпендикулярная вектору силы тяжести). Зная эти углы, датчику перемещения судна можно задать установочные углы и тем самым привести его в судовую систему координат.

На рис. 8 показана схема судна, где положение 1 указано красным цветом, а положение 2 — синим. Установочный угол между плоскостями равен одному градусу. Видно, что угол значительно влияет на длину плеч между сенсорами. Рисунок наглядно демонстрирует важность правильной установки начальной плоскости судна при измерении смещений. Также если измерить угол между плоскостью 2 и 3, то можно менять датчики перемещения судна, задавая им правильную плоскость отсчета. Например, на судно прибыл новый ДПС, который имеет старые установочные

углы. Сначала прибор необходимо установить на геодезический трегер и отгоризонтировать, после чего записать небольшую сессию данных, включающую в себя значения углов, затем обработать данные и определить углы относительно отгоризонтированной плоскости трегера. Для установки прибора в плоскость судовой системы координат необходимо полученные углы скомпенсировать углом между плоскостью 2 и 3.

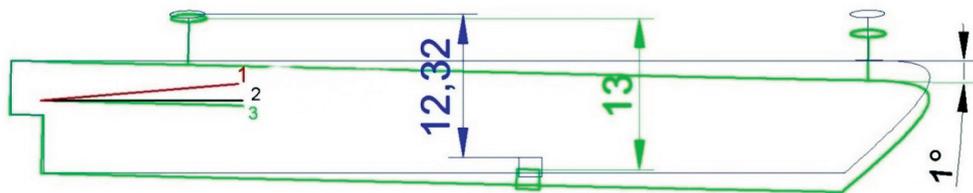


Рис. 8. Схематичное представление судна в двух состояниях:
1 — плоскость, заданная для нового IMU при работе на другом судне;
2 — нулевая плоскость, перпендикулярная силе тяжести;
3 — начальная скорость при измерении смещений

Таким образом, в статье были рассмотрены основные причины возникновения волн на данных батиметрии: из-за влияния задержки, из-за неправильно определенного центра вращения судна, из-за неправильно измеренных смещений и некорректной установки нулевых плоскостей. Рис. 9 наглядно демонстрирует разницу в этих ошибках и состоит из шести сегментов. Сегмент 1 содержит правильно скомпенсированные данные, сегмент 2 — данные, на которые повлияла задержка угловых измерений и вертикального перемещения, сегмент 3 показывает влияние неправильно выбранного центра вращения судна, сегмент 4 содержит данные, полученные при суммарной ошибке в определении центра вращения судна и задержке данных датчика перемещения судна, сегмент 5 представляет результат влияния неправильно установленных нулевых плоскостей для ДПС (как видно из примера, данные сильно исказились — у поверхности морского дна появился уклон, а также возникли небольшие по амплитуде «волны»), сегмент 6 — данные при исправном ДПС.

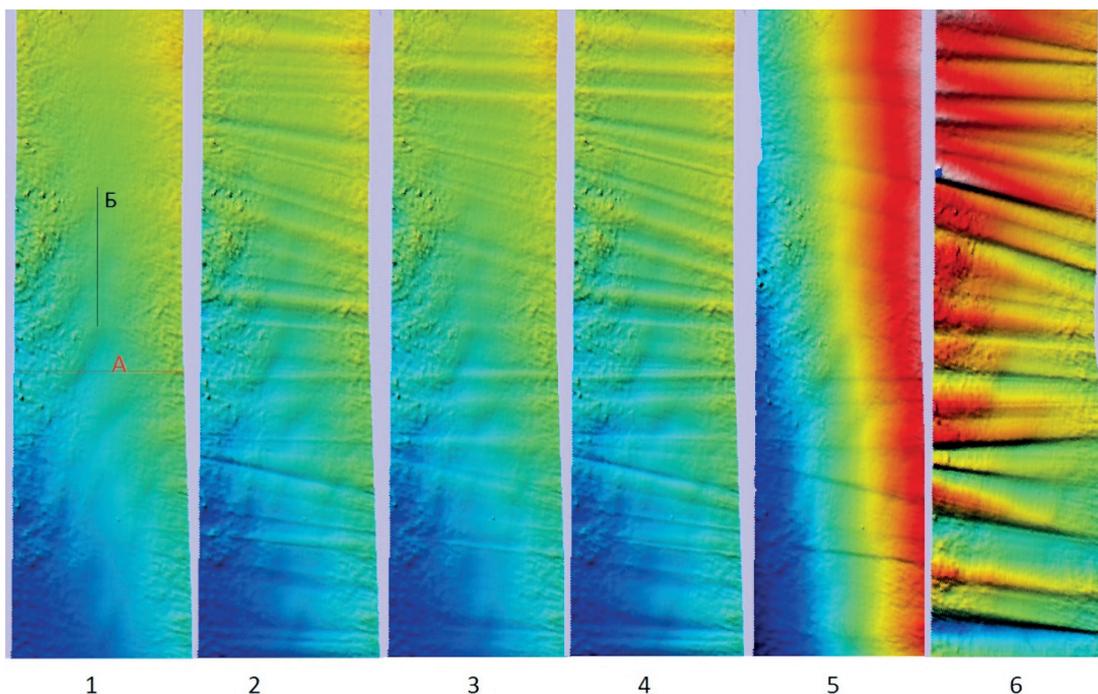


Рис. 9. Изображения участка морского дна при влиянии на данные различных ошибок (буквами «А» и «Б» обозначены разрезы слоев)

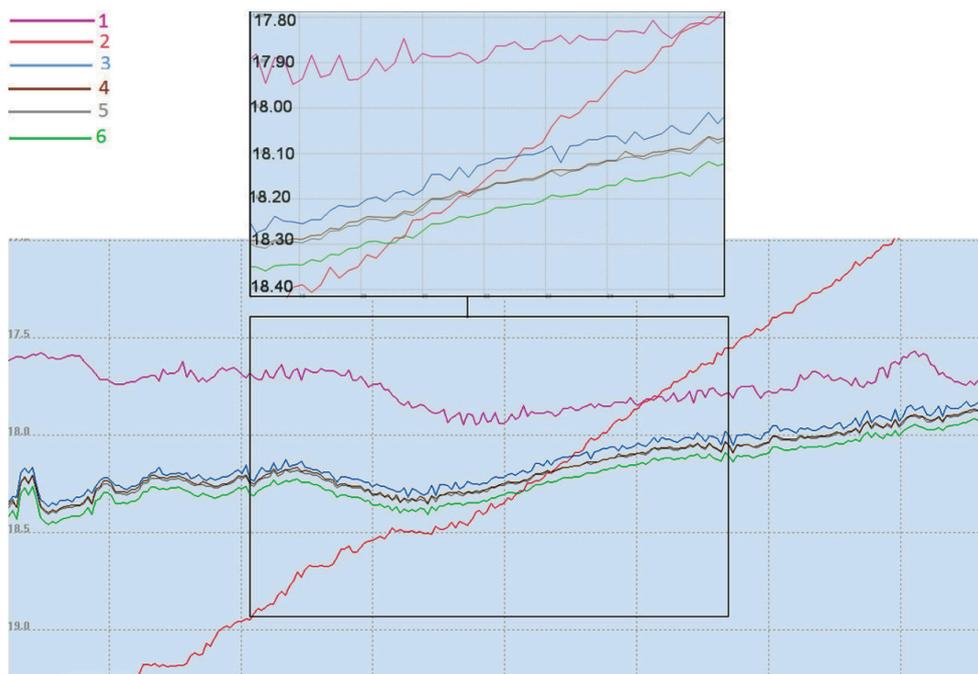


Рис. 10. Изображение разреза, сделанного по профилю «А» (поперек движения судна), где линии разных цветов обозначают влияние ошибок на данные батиметрии

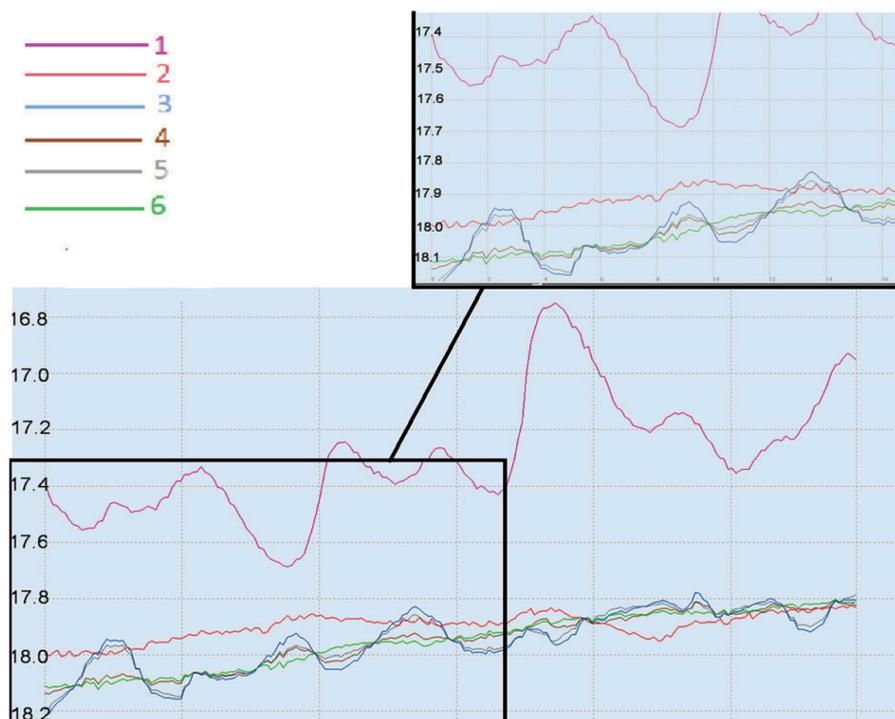


Рис. 11. Изображение разреза, сделанного по профилю «Б» (вдоль движения судна), где линии разных цветов обозначают влияние ошибок на данные батиметрии

Условные обозначения на рис. 10 – 11:

- 1 — изображение морского дна в профиле, полученное при использовании некорректного датчика перемещения судна; 2 — профиль морского дна построенный по данным, включающим ошибку в установке нулевых плоскостей ДПС;
- 3 — профиль, показывающий суммарное влияние ошибки при определении центра вращения судна и задержке данных; 4 — профиль, демонстрирующий ошибку в определении только центра вращения судна;
- 5 — данные при влиянии задержки угловых измерений и вертикального перемещения;
- 6 — правильно скомпенсированные данные, профиль реального морского дна

На рис. 10 и 11 изображены разрезы, сделанные по профилям «А» и «Б». Особенно сильно тестовые данные батиметрии исказились из-за некорректной работы ДПС (см. линии 1 на рис. 10 – 11) и при ошибочной установке нулевых плоскостей. Ошибку, вызванную неправильной установкой нулевых плоскостей, можно частично скомпенсировать проведением калибровки систематических погрешностей установки преобразователей многолучевого эхолота (Patch Test), но такое исправление в данном случае не исправит данные в полной мере. Сбор анализируемых данных выполнялся во время хорошей погоды, поэтому влияние задержки данных (см. линии 3 – 5 на рис. 10 и 11) и неправильно определенного центра вращения судна (см. линии 3 – 5 на рис. 10 и 11) сказываются на цифровой модели рельефа дна не слишком критично. В плохую погоду, при высоте волн более метра или сильном течении в борт судна, во время максимальных значений углов крена и дифферента, данные батиметрии будут искажены настолько, что не будут нести информации о реальном рельефе морского дна.

Исходя из ранее изложенного, ошибки, возникающие при неправильно скомпенсированных данных, существенны и иногда достигают 15 см и более, что критично при проведении ежегодных инспекций трубопроводов, мониторинге состояния отсыпки нефтегазовых платформ гравитационного и полупогружного типа, а также дноуглубительных работах при подсчете объема. Поэтому проблема требует более тщательного исследования. В настоящее время автором статьи проводятся различные тестирования с целью поиска алгоритмов для решения данной проблемы, а также разрабатываются способы автоматизации процесса устранения ошибок, создаются математические решения и выполняется анализ множества данных, полученных с различных судов, чтобы подтвердить полученные формулы. Итоги всех работ будут представлены в следующих статьях, продолжающих тему этой работы.

Обсуждение (Discussion)

Ввиду постоянно повышающихся требований к данным батиметрии, современные МЛЭ быстро развиваются, что накладывает некоторые требования на используемые с ними сенсоры, а также разработку поправок для основных способов проведения работ. В процессе поиска причин возникновения волн на данных батиметрии выяснилось, что на данные могут оказать влияние следующие факторы:

- задержки информации с датчиков перемещения судна;
- ошибка в определении центра вращения судна;
- ошибка при измерении оффсетов;
- ошибка в установке нулевых плоскостей датчиков перемещения судна.

Все указанные ранее факторы были подробно проанализированы в статье. Был подготовлен материал для дальнейшего исследования данной проблемы. Во избежание временных задержек при мобилизации судна необходимо правильно рассчитывать длину кабеля, скорость и объем передачи данных. Перед началом проведения мобилизации необходимо тщательно изучить судовую документацию и составить точный план работ. На судах с большим водоизмещением и сложной формой рекомендуется использовать динамическое положение центра вращения судна, которое будет изменяться ввиду перекачки воды и топлива, при подъеме и спуске больших грузов.

Для датчиков перемещения судна рекомендуется выполнять определение углов наклона судовой системы координат от плоскости, перпендикулярной направлению силы тяжести, что поможет при установке нового прибора на судне. Для удобства проведения мобилизации на судне необходимо разработать систему специальных марок. После измерения смещений необходимо проводить процедуру верификации, которая позволит исключить множество ошибок.

Выводы

1. При выполнении детальных мелководных съемок при помощи комплексов на базе многолучевых эхолотов необходимо уделять особое внимание взаимному расположению приборов, а также характеристикам судна-носителя.

2. При использовании датчиков перемещения судна необходимо правильно реализовывать компенсацию данных внутренних акселерометров и гироскопов за изменения скорости и курса судна.
3. Необходимо правильно определять скорость передачи данных по последовательным и параллельным соединениям.
4. Важно проводить тесты на предмет выявления программных задержек и проверять целостность приходящих пакетов.
5. Во время мобилизации необходимо:
 - продумать процесс обнуления плоскостей ДПС;
 - протестировать комплекс на предмет временных задержек;
 - постараться найти в судовой документации положение центра вращения судна;
 - для удобства разработать специальную судовую систему координат и совместить нуль системы с центром вращения судна;
 - разрабатывать дополнительные методы контроля измерения смещений.
6. Во время сбора данных необходимо периодически проводить тщательную проверку появления артефактов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Calder B. R.* Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data / B. R. Calder, L. A. Mayer // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. — 2003. — Vol. 4. — Is. 6. DOI: 10.1029/2002GC000486.
2. *Roberts J. M.* Acoustic mapping using a multibeam echosounder reveals cold-water coral reefs and surrounding habitats / J. M. Roberts, C. J. Brown, D. Long, C. R. Bates // *Coral Reefs*. — 2005. — Vol. 24. — Is. 4. — Pp. 654–669.
3. *Yang F.* A post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data / F. Yang, J. Li, Z. Wu, X. Jin, F. Chu, Z. Kang // *Marine Geodesy*. — 2007. — Vol. 30. — Is. 3. — Pp. 235–247. DOI: 10.1080/01490410701438380.
4. *Sacchetti F.* Geomorphology of the Irish Rockall Trough, North Atlantic Ocean, mapped from multibeam bathymetric and backscatter data / F. Sacchetti, S. Benetti, A. Georgiopoulou [etc.] // *Journal of Maps*. — 2011. — Vol. 7. — Is. 1. — Pp. 60–81. DOI: 10.4113/jom.2011.1157.
5. *Колосков Е. Н.* Применение современных гидрографических технологий для изучения рельефа и донного газопроявления в северных морях России / Е. Н. Колосков, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2015. — № 3 (31). — С. 54–62.
6. *Барашок П. И.* Современные способы обследования морского дна для обнаружения и устранения взрывоопасных объектов до строительства трубопровода / П. И. Барашок, Ю. Г. Фирсов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2016. — № 1 (35). — С. 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
7. *Фирсов Ю. Г.* Новые методы пространственной визуализации результатов инженерной батиметрической съемки / Ю. Г. Фирсов, И. В. Кожухов // *Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова*. — 2014. — № 2 (24). — С. 17–23.
8. *Farrell J.* Aided navigation: GPS with high rate sensors / J. Farrell. — McGraw-Hill Education, 2008. — 530 p.
9. *Nassar S.* Improving the inertial navigation system (INS) error model for INS and INS/DGPS applications: Dr. Diss. / S. Nassar. — National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, 2003. — 155 p.
10. *Meijer G. A. L.* Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers / G. A. L. Meijer, K. R. Westerterp, F [etc.] // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. — 1991. — Vol. 38. — Is. 3. — Pp. 221–229. DOI: 10.1109/10.133202.
11. *Godhaven J. M.* Adaptive tuning of heave filter in motion sensor/ J. M. Godhaven // *OCEANS'98 Conference Proceedings*. — IEEE, 1998. — Vol. 1. — Pp. 174–178. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.725731
12. *Фирсов Ю. Г.* Основы гидроакустики и использования гидрографических сонаров: учеб. пособие / Ю. Г. Фирсов. — СПб.: Нестор-история, 2010. — 348 с.

13. Лисецкий С. Ю. Стек TCP/IP в технологических сетях / С. Ю. Лисецкий, Д. П. Медведенко // Программные продукты и системы. — 2005. — № 3. — С. 2.
14. Олссон Г. Цифровые системы автоматизации и управления / Г. Олссон, Д. Пиани. — СПб.: Nevskiy Dialekt, 2001. — 557 с.
15. Агуров П. В. Последовательные интерфейсы ПК. Практика программирования / П. В. Агуров. — СПб.: БХВ-Петербург, 2004. — 496 с.
16. Игнатъев А. С. Создание распределенных систем управления на базе высокоскоростного последовательного интерфейса / А. С. Игнатъев // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2008. — № 12. — С. 5–6.
17. Nachman M. Moored ship motion determination system: pat. № 5089972 / M. Nachman, R. H. Overton. — США, 1992.
18. Seo S. G. The use of pivot point in ship handling for safer and more accurate ship manoeuvring / S. G. Seo // Proceedings of IMLA. — 2011. — Vol. 1. — № 29. — Pp. 271–280.
19. Bound J. Measurement error in survey data / J. Bound, C. Brown, N. Mathiowetz // Handbook of econometrics. — 2001. — Vol. 5. — Pp. 3705–3843. DOI: 10.1016/S1573-4412(01)05012-7.

REFERENCES

1. Calder, B. R., and Larry A. Mayer. “Automatic processing of high-rate, high-density multibeam echosounder data.” *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4.6 (2003). DOI: 10.1029/2002GC000486.
2. Roberts, J. M., C. J. Brown, D. Long, and C. R. Bates. “Acoustic mapping using a multibeam echosounder reveals cold-water coral reefs and surrounding habitats.” *Coral Reefs* 24.4 (2005): 654–669.
3. Yang, Fanlin, J. Li, Z. Wu, X. Jin, F. Chu, and Z. Kang. “A post-processing method for the removal of refraction artifacts in multibeam bathymetry data.” *Marine Geodesy* 30.3 (2007): 235–247. DOI: 10.1080/01490410701438380.
4. Sacchetti, Fabio, S. Benetti, A. Georgiopolou, P. Dunlop, and R. Quinn. “Geomorphology of the Irish Rockall Trough, North Atlantic Ocean, mapped from multibeam bathymetric and backscatter data.” *Journal of Maps* 7.1 (2011): 60–81. DOI: 10.4113/jom.2011.1157.
5. Koloskov, E. N., and Yu. G. Firsov. “Implementation of the new hydrographic technologies for bottom topography and seafloor gas venting investigations in the Russian northern seas.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 3(31) (2015): 54–62.
6. Barashok, Pavel Ivanovich, and Yury Georgievich Firsov. “Modern methods of the seafloor investigations for the explosive objects detection before the pipeline construction.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(35) (2016): 47–59. DOI: 10.21821/2309-5180-2016-8-1-47-59.
7. Firsov, Yu. G., and I. V. Kozhukhov. “The new three dimensional visualization techniques for bathymetric engineering survey.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 2(24) (2014): 17–23.
8. Farrell, J. *Aided navigation: GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill Education, 2008.
9. Nassar, S. Improving the inertial navigation system (INS) error model for INS and INS/DGPS applications. Dr. Diss. National Library of Canada= Bibliothèque nationale du Canada, 2003.
10. Meijer, Gerwin A. L., K. R. Westerterp, F. M. H. Verhoeven, H. B. M. Koper, and F. ten Hoor. “Methods to assess physical activity with special reference to motion sensors and accelerometers.” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 38.3 (1991): 221–229. DOI: 10.1109/10.133202.
11. Godhaven, J-M. “Adaptive tuning of heave filter in motion sensor.” *OCEANS’98 Conference Proceedings*. Vol. 1. IEEE, 1998: 174–178. DOI: 10.1109/OCEANS.1998.725731.
12. Firsov, Ju. G. *Osnovy gidroakustiki i ispolzovanija gidroakusticheskikh sonarov*. SPb.: Nestor-Istorija, 2010.
13. Liseckij, S. Ju., and D. P. Medvedenko. “Stek TCP/IP v tehnologicheskikh setjah.” *Programmnye produkty i sistemy* 3 (2005): 2.
14. Olsson, G., and D. Piani. *Cifrovye sistemy avtomatizacii i upravlenija*. SPb.: Nevskij Dialekt, 2001.
15. Agurov, P. V. *Posledovatel’nye interfejsy PK. Praktika programmirovaniya*. SPb.: BHV-Peterburg, 2004.
16. Ignatiev, A. S. “Distributed control systems development based on high-speed serial interface.” *Industrial Automatic Control Systems and Controllers* 12 (2008): 5–6.
17. Nachman, M., and R. H. Overton. Moored ship motion determination system: pat. № 5089972. USA, 1992.

18. Seo, Seong-Gi. "The use of pivot point in ship handling for safer and more accurate ship manoeuvring." *Proceedings of IMLA* 1.29 (2011): 271–280.

19. Bound, John, Charles Brown, and Nancy Mathiowetz. "Measurement error in survey data." *Handbook of econometrics* 5 (2001): 3705–3843. DOI: 10.1016/S1573-4412(01)05012-7.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРЕ

Барашок Павел Иванович —
геодезист ГПП
ЗАО «РОМОНА»
693004, Российская Федерация,
г. Южно-Сахалинск, пр. Мира, 426
e-mail: pbarashok@mail.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Barashok, Pavel I. —
Surveyor
ROMONA Inc.
426 prospekt Mira, Yuzhno-Sakhalinsk,
693004, Russian Federation
e-mail: pbarashok@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16 апреля 2017 г.

Received: April 16, 2017.