

УДК 551.46.077

АСПЕКТЫ ТЕХНОЛОГИИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БУКСИРУЕМЫХ АППАРАТОВ

^{1,2}Римский-Корсаков Н.А., ¹Лискин В.А., ¹Зарецкий А.В.

¹Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва;

²Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
Москва, e-mail: nrk@ocean.ru

Придонная область Мирового океана, несмотря на интенсивное изучение, является пробелом в системе наших знаний о процессах, протекающих на больших глубинах в пограничной зоне вода – дно. Состав, строение и динамическая структура придонных процессов определяются сочетанием физических, химических, биологических, геологических и геофизических явлений и требуют комплексного подхода при ее изучении. Самое общее представление обо всем многообразии явлений и процессов в придонной области дает изучение гидрофизических и гидрохимических характеристик в широком диапазоне спектра масштабов пространственно-временной изменчивости. Многообразие процессов и явлений требует постановки ширококомасштабных и комплексных исследований с использованием современной измерительной и вычислительной техники, разработки и создания глубоководных средств доставки и установки аппаратуры в придонной зоне и на дне, обладающей высокой надежностью, автономностью и эффективностью. Новые задачи и проблемы придонной океанологии требуют пересмотра сложившейся методики натуральных наблюдений с целью удовлетворения условий оптимальности научного эксперимента по заданным вероятностным критериям эффективности исследований. В статье рассмотрены принципы построения технических средств и организации наблюдений с помощью буксируемых носителей аппаратуры, особенности измерения гидрологических параметров в режиме набегающего потока водной среды. Обсуждаются вопросы методики буксировки аппаратов в придонной области при фото- и видеообследовании донной поверхности. Особое внимание уделено выбору режимов работы буксируемых комплексов аппаратуры при исследовании поверхности дна и подводных объектов с помощью гидроакустической аппаратуры, в том числе гидролокаторами бокового обзора.

Ключевые слова: донный пограничный слой, гидрология, рельеф, режимы движения, буксируемый комплекс, гидролокатор, эхолот, профилограф, видеосистема, фотосистема

ASPECTS OF OCEANOLOGY RESEARCH TECHNOLOGY USING TOWED VEHICLES

^{1,2}Rimskiy-Korsakov N.A., ¹Liskin V.A., ¹Zaretskiy A.V.

¹Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Science, Moscow;

²Bauman Moscow State Technical University, Moscow, e-mail: nrk@ocean.ru

The bottom area of the World Ocean, despite intensive study, is a gap in our knowledge of the processes taking place at great depths in the water-bottom boundary zone. The composition, structure and dynamic structure of the bottom processes is determined by a combination of physical, chemical, biological, geological and geophysical phenomena and require a comprehensive approach to its study. The variety of processes and phenomena require the setting up of large-scale and complex studies using modern measuring and computing equipment, the development and creation of deep-sea delivery systems and installation of equipment in the bottom zone and on the bottom, which has high reliability, autonomy and efficiency. New problems and problems of bottom oceanology require a revision of the existing method of field observations in order to satisfy the conditions for the optimality of the scientific experiment for given probabilistic criteria of research effectiveness. The principles of organization of observations with the help of towed equipment carriers, the features of measuring hydrological parameters in the regime of the oncoming flow of the aquatic environment are considered in the article. The questions of the towing vehicles technique in the near-bottom area with photo and video survey of the bottom surface are discussed. Particular attention is paid to the choice of operating modes for towed equipment complexes with sonar systems, including side-scan sonar.

Keywords: bottom boundary layer, hydrology, relief, towing modes, towed complex, sonar, echo sounder, profiler, video system, photosystem

Измерения в океане имеют общее свойство – практически все они производятся движущимися приборами. Это движение может быть вызвано тактикой исследования – буксировка или зондирование, либо оно связано с течением или дрейфом. Кроме того, важным преимуществом буксируемых приборов (аппаратов) является возможность оперативного обследования обширных акваторий с одновременным использованием целого комплекса измерительных устройств. Скорость движения буксируе-

мых аппаратов относительно среды может лежать в пределах от единиц до сотен сантиметров в секунду. В условиях сложной структуры распределения гидрологических параметров среды и морфологии рельефа дна по пространству, при движении аппаратов могут возникать ошибки и искажения получаемых изображений поверхности дна и подводных объектов.

В этой связи актуальной проблемой является разработка и исследование основных критериев выбора оптимальной скорости

буксировки подводных аппаратов, предназначенных для обследования поверхности дна и придонного пограничного слоя [1], исходя из требований, налагаемых условиями работы всего аппаратного комплекса, и технических возможностей входящих в него систем.

Цель работы: повышение эффективности, в том числе производительности и безопасности использования подводных буксируемых аппаратов для исследования поверхности дна придонной области акваторий.

Для достижения цели работы необходимо решить круг задач, связанных с исследованием влияния следующих факторов на величину максимально допустимой скорости движения (буксировки) подводных аппаратов:

- 1) допустимая длина кабель-троса, необходимая для обеспечения буксировки аппарата на заданной глубине;
- 2) возможность обнаружения поисковыми средствами подводных объектов заданного минимального размера;
- 3) возможность получения требуемой четкости телевизионного изображения;
- 4) допустимая частота поступления телевизионной информации к оператору;
- 5) возможность проведения маршрутной видео(фото)съемки донной поверхности;
- 6) безопасность буксировки аппарата над пересеченным рельефом.

Решение этих задач позволит получить значения и расчетные соотношения для предельно допустимых скоростей движения при исследовании поверхности дна придонной области акваторий.

Материалы и методы исследования

Для решения перечисленных задач в работе применены методы анализа и синтеза технологий визуальных и дистанционных средств подводных исследований с использованием: положений механики подводных буксируемых систем, основ гидроакустики и оптики, теории представления и обработки видео и гидролокационной информации, а также геоморфологии рельефа океанского дна.

Рассмотрим факторы, определяющие величину скорости буксировки, являющуюся главным методическим аспектом повышения производительности исследований с использованием подводных буксируемых аппаратов.

Допустимая длина кабель-троса. Из-за лобового сопротивления аппарата и кабеля угол отклонения кабеля от вертикали увеличивается с возрастанием скорости буксировки. Поэтому для достижения аппаратом некоторой глубины H_a необходима длина кабеля $L_k > H_a$. При работе на больших глубинах это ограничивает скорость буксировки: во-первых, из-за технических ограничений предельной длины кабелей, изготавливаемых на заводах, во-вторых, из-за ухудшения динамики управления аппаратом при больших длинах кабеля.

В Институте океанологии [2, 3] методами численного интегрирования рассчитаны длины кабеля, необходимые для достижения заданных глубин при различных скоростях буксировки. Диаметр кабель-троса был принят равным 24 мм, диапазон расчетных скоростей буксировки – $0,5 \div 2,0$ м/с, диапазон отрицательной плавучести аппарата – 700–1400 кг. Обобщенная расчетная зависимость $L_k/H_a = f(v)$ представлена на рис. 1. Она нелинейная, и крутизна ее резко увеличивается при скоростях, превышающих 0,75 м/с. Из этого следует, что оптимальной с точки зрения минимизации длины кабеля является скорость, не превышающая 0,5–0,75 м/с. При этом требуемая длина кабеля превышает величину заглупления аппарата не более чем на 20%.

Возможность обнаружения подводных объектов заданного размера с помощью гидроакустических устройств. Одним из основных гидроакустических устройств буксируемых аппаратов являются гидролокаторы бокового обзора (ГБО). Применительно к ним оценены допустимые скорости буксировки носителя ГБО.

Для ГБО различают разрешающую способность по дальности l и – по углу l_1 . Разрешающая способность по дальности характеризует минимальное расстояние между двумя точечными объектами по направлению нулевого луча, при котором эти объекты регистрируются отдельно. $l = ct/2$, где c – скорость распространения звука в воде, а t – длительность излучаемого акустического импульса.

Масштаб записи эхо-сигнала в направлении нулевого луча $M_l = L/a$, где L – выбранный диапазон дальности регистратора, сигнала на регистраторе, a – ширина записи эхо-сигнала на регистраторе,

$$L = ct/2, \quad (1)$$

причем T – период следования зондирующих импульсов.

Как следует из определения величины l , эта величина зависит только от длительности акустических посылок и не связана со скоростью движения антенны относительно дна.

Разрешающая способность по углу l_1 является параметром, характеризующим минимальное расстояние между двумя точечными объектами в направлении нормального нулевого луча, при котором эти объекты регистрируются отдельно.

Объект продолжает оставаться видимым, если находится в зоне диаграммы направленности ГБО и при этом выполняется соотношение

$$\Phi^2(\alpha) = 0,5\Phi^2(\alpha_{0,5}), \quad (2)$$

где $\Phi(\alpha)$ – характеристика направленности антенны, $\alpha_{0,5}$ – половинный угол раскрытия характеристики направленности антенны по уровню половинной мощности акустической посылки.

Из условия (4.4) следует выражение для разрешающей способности по углу

$$l_1 = 2L \operatorname{tg} \alpha_{0,5}. \quad (3)$$

В течение периода акустических посылок (T) буксируемый аппарат проходит расстояние $l = VT$, где V – скорость поступательного движения аппарата.

Считая, что условием надежной регистрации объекта является наличие с ним менее десяти акустических контактов, получим

$$l_1 = 10l_T = \delta = VT, \quad (4)$$

где δ – линейный размер регистрируемого объекта.

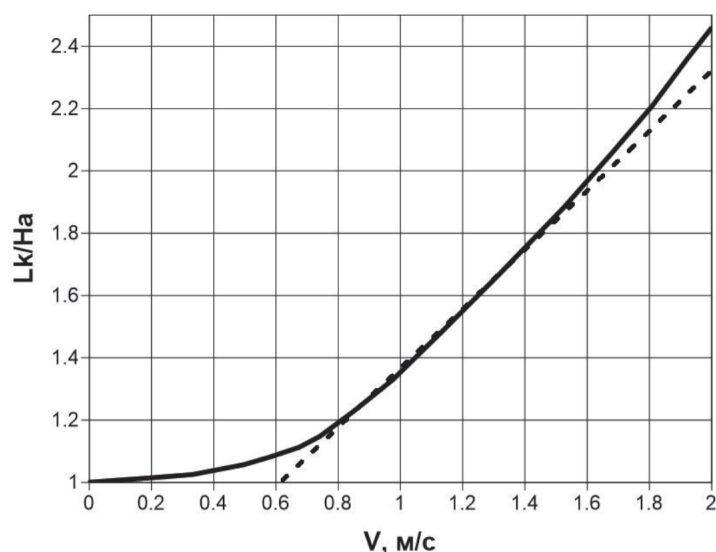


Рис. 1. Зависимость относительной длины буксирной линии от скорости буксировки аппарата

Из (1), (3) и (4) получаем выражение для определения максимально допустимой скорости буксировки:

$$V = \delta C / 20 L. \quad (5)$$

Из (5) следует, что величина предельной скорости движения аппарата пропорциональна размеру регистрируемого объекта и обратно пропорциональна диапазону дальности ГБО.

При проведении геофизических исследований наиболее широко используются ГБО с $L \approx 600$ м. Расчеты по формуле (5) показывают, что с помощью таких ГБО при скорости буксировки до 1,5 м/с можно регистрировать объекты с минимальными размерами около 12 м, а при скорости 0,5 м/с – 4 м.

Допустимая частота поступления видеoinформации к оператору (влияние скорости буксировки на субъективное восприятие оператора). Управление аппаратом в режиме буксировки при визуальном контакте с дном связано с поступлением к оператору от видеомонитора непрерывно изменяющейся информации [4]. Частота обновления информации зависит от характера рельефа, скорости движения аппарата и горизонта буксировки. При чрезмерно высоких скоростях движения и малых расстояниях аппарата до дна оператор не справляется с потоком видеoinформации, что приводит к ее частичной потере. При малых скоростях движения информация поступает медленнее, чем скорость восприятия оператора, в результате чего непроизводительно затрачивается время, отведенное на буксировку. Для определения оптимальных скоростей буксировки были выполнены натурные исследования [5]. Передающая телевизионная камера, снабженная объективом с фокусным расстоянием 10 мм, была укреплена на тележке, перемещаемой на дне по рельсам. Расстояние камеры до грунта изменялось в диапазоне 0,5–1,1 м, скорость тележки – от 0,1 м/с до 0,7 м/с. В опытах участвовали три оператора, дававшие независимые оценки скорости перемещения изображения дна на экране видеомонитора. Наиболее благоприятным для оператора оказался такой режим движения аппарата, при котором скорость перемещения изобра-

жения по матрице передающей камеры составляет $V_{\phi} = 3$ мм/с. Оптимальные скорости аппарата при движении на расстояниях 15 и 10 м вычисляются из уравнения $V_{\phi} = V(F/H)$, где F – фокусное расстояние объектива. Например, при объективе с фокусным расстоянием 20 мм значения V соответственно равны 0,15; 0,75; 1,50 м/с.

Возможность проведения маршрутной фотосъемки донной поверхности. Фотосистемы на буксирных аппаратах могут работать в двух режимах: автоматическом, обеспечивающим непрерывное фотографирование с заданной частотой кадров в секунду (минуту), и целенаправленном под управлением оператора.

Работа фотосистемы в первом режиме целесообразна в тех случаях, когда необходимо получить изображение достаточно протяженного участка рельефа с четкостью большей, чем это обеспечивается видеозаписью. Очевидно, что такой режим работы оправдан, если характер исследуемого участка дна непрерывно изменяется. Работа в этом режиме характеризуется большими потребностями электроэнергии импульсными источниками света, возрастающими с увеличением частоты съемки, а также требует применения емких накопителей информации (флеш-память, HDD).

Работа системы во втором режиме фотографирования обладает тем преимуществом, что ввиду малого потребления электроэнергии позволяет ограничиваться бортовыми источниками небольшой емкости, либо, при передаче электропитания с судна, существенно упростить систему энергопередачи. Использование фотосистемы в таком режиме целесообразно при фотографировании отдельных небольших (соизмеримых с зоной видимости фотообъектива) наиболее характерных участков дна.

Определим допустимую скорость буксировки, позволяющую в режиме маршрутной съемки выполнять фотографирование донной поверхности с требуемым перекрытием β соседних кадров. При расстоянии аппарата до дна, равном H , ширина участка дна, попадающего в поле зрения фотообъектива, со-

ствяет $A = (H / F_{\text{ф}}) \times h_{\text{фк}}$, где $F_{\text{ф}}$ – фокусное расстояние объектива и $h_{\text{фк}}$ – высота фотокадра. По определению $(1 - \beta) = (V \times \tau_{\text{фк}}) / H = (F_{\text{ф}} \times \tau_{\text{фк}}) / (H \times h_{\text{фк}})$, где $\tau_{\text{фк}}$ – период фотосъемки. Тогда искомая величина $V \leq ((1 - \beta) \times H \times h_{\text{фк}}) / (F_{\text{ф}} \times \tau_{\text{фк}})$.

Эта зависимость приведена на рис. 2 для типичных параметров фотоустановки: $F_{\text{ф}} = 16$ мм, $h_{\text{фк}} = 18$ мм при условии обеспечения 20% перекрытия фотокадров.

Если буксируемый аппарат имеет отрицательную плавучесть, а буксировка осуществляется без углубителя, то качка кормы судна (точки схода кабель-троса с буксирного рола) передается на аппарат практически без демпфирования. Поэтому для предохранения аппарата от столкновения с дном необходимо пилотировать его на расстоянии порядка 5–10 м от дна. На рис. 2 представлена расчетная зависимость периода фотосъемки от скорости буксировки на расстоянии до дна 5 м при условии получения 20% перекрытия соседних кадров.

Обеспечение безопасности буксировки аппарата над пересеченным рельефом. Для обеспечения безопасности буксировки аппараты оснащаются акустическими средствами, позволяющими определять наличие препятствий по курсу [6]. Одним из таких средств является вперед направленный гидролокатор.

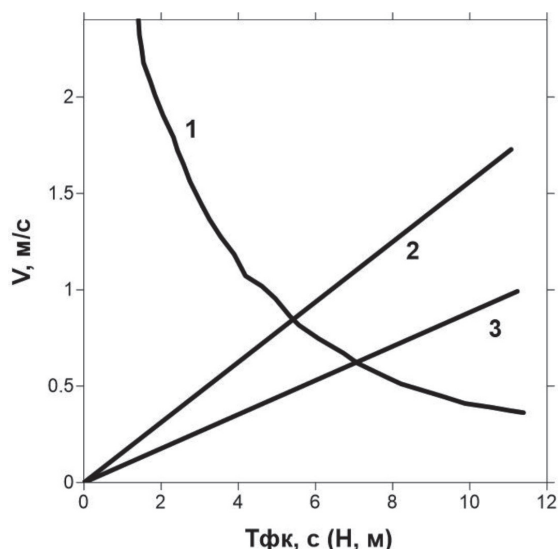


Рис. 2. Зависимость скорости буксировки от требуемого периода фотосъемки при маршрутном фотографировании дна с расстояния 5 м (кривая 1). Зависимость предельно допустимой скорости буксировки от расстояния до дна при периоде фотосъемки, равном: 2–5 с (кривая 2); 3–10 с (кривая 3)

В общем случае траектория движения аппарата может изменяться путем перемены курса и хода судна, либо изменением длины буксирной линии. Первый способ является весьма инерционным. Реакция аппарата, буксируемого на кабель-тросе длиной несколько тысяч метров, запаздывает по отношению к изменению параметров движения судна-буксировщика на время от десятков минут до нескольких часов. Таким образом, данный способ управления малоэффективен, если необходимо оперативно изменить траекторию аппарата с целью обхода препятствия.

Более оперативным (с задержкой в секунды) является управление путем изменения длины буксирной линии. Именно этот способ следует признать наиболее действенным для предотвращения столкновения буксируемого аппарата с препятствием. Определим взаимосвязь скорости буксировки с предельной высотой препятствия $H_{\text{п}}$, которое может преодолеть аппарат. Предполагаем, что аппарат имеет отрицательную плавучесть и равномерно движется в горизонтальной плоскости. Аппарат огибает препятствие, если

$$V_z \times t_{\text{п}} > H_{\text{п}}$$

где V_z – максимальная скорость вертикального перемещения аппарата под действием тянущего усилия лебедки, $t_{\text{п}}$ – время вертикального перемещения аппарата.

Интервал времени t_3 от момента фиксации эхолотом препятствия до начала подъема аппарата определяет запаздывание реакции системы «пилот – лебедка – кабель» и составляет

$$t_3 = t_{\text{рп}} + t_{\text{рс}}$$

где $t_{\text{рп}}$ – время реакции пилота от момента опознавания препятствия до включения лебедки на подъем аппарата, $t_{\text{рс}}$ – время реакции лебедки и кабеля от момента включения лебедки на подъем до начала перемещения аппарата. Результаты натурных испытаний буксируемых комплексов показали, что время запаздывания может изменяться в пределах 7–12 с.

Расстояние Lx , проходимое аппаратом в горизонтальной плоскости за время с момента обнаружения препятствия до момента окончания подъема, составляет

$$Lx = V \times (t_3 + t_{\text{п}}). \quad (6)$$

Из (4.13) и (4.14) определяем максимальную скорость буксировки, при которой можно избежать столкновения аппарата с препятствием высотой $H_{\text{п}}$, расположенным на его курсе:

$$V < (Lx \times V_z) / (V_z \times t_3 + H_{\text{п}}),$$

где Lx – требуемая величина дальности действия вперднпрямом направлении эхолота.

На рис. 3 представлена зависимость величины V от величины $H_{\text{п}}/Lx$, при условии, когда максимальная дальность действия эхолота составляет $Lx = 100$ м, а максимальная скорость вращения лебедки обеспечивает намотку кабеля со скоростью $V_z = 1$ м/с.

Режимы работы буксируемого аппарата при обследовании донной поверхности гидролокаторами бокового обзора. Зоной обзора ГБО назовем участок дна, облучаемый антенной гидролокатора. В процессе буксировки носителя движение последнего может отличаться от прямолинейного и равномерного. Ориентация носителя в пространстве тоже может изменяться. Неравномерность движения и непостоянство ориентации антенны приводят к тому, что на границе зоны обзора могут возникать неопределенности зоны обзора – те участки дна, обзор которых не гарантируется. При обследовании полигона путем буксировки аппарата на параллельных галсах расстояние между галсами следует выбирать из условия, чтобы зоны обзора гидролокатора на соседних галсах перекрывались как раз на величину неопределенности зоны обзора. Ошибка $\Delta X_{\text{н}}$ привязки гидроакустических профилей в географической системе координат накладывает требование еще большего перекрытия этих профилей и таким образом косвенно влияет на величину неопределенности зоны обзора ГБО.

Ориентацию антенны гидролокатора относительно дна удобно представить в виде составляющих: ориентации ее относительно вертикальной оси буксируемого необитаемого подводного аппарата (БНПА) и углов колебаний БНПА по крену, рысканию и дифференту.

Расстояние БНПА до дна также удобно представить как сумму величины расстояния при стационарном режиме буксировки (равномерное прямолинейное движение) и величины амплитуды колебаний БА относительно этого уровня [7, 8]. Таким образом, в общем случае на величину реальной зоны видимости ГБО влияют следующие параметры (рис. 4):

- ориентация антенн ГБО на носителе – Q ;
- расстояние БНПА до дна – H ;
- величина максимальной наклонной дальности ГБО – L м;
- угол раскрытия характеристики направленности антенны ГБО – α ;
- колебание БНПА по углам крена, курса и дифферента;

- непостоянство расстояния БНПА до дна – ΔH ;
- рефракция звукового луча;
- неопределенность местоположения БНПА – ΔX_H .

Ввиду малости расстояния БНПА до дна можно считать, что звуковые лучи распространяются прямолинейно, то есть явление рефракции пренебрежимо мало.

Очевидным представляется факт преобладающего влияния на величину реальной зоны обзора колебаний носителя по углу крена по сравнению с колебаниями по курсу и дифферента.

При таких предположениях величина реальной зоны обзора ГБО зависит лишь от следующих факторов: ориентации антенн на аппарате, расстояния БНПА до дна, величины максимальной наклонной дальности действия ГБО, ширины диаграммы направленности действия ГБО, колебаний БНПА по углу крена $\alpha_{кр}$, непостоянства расстояния БНПА до дна, погрешности привязки места носителя к географической системе координат. Последние три фактора назовем возмущающими.

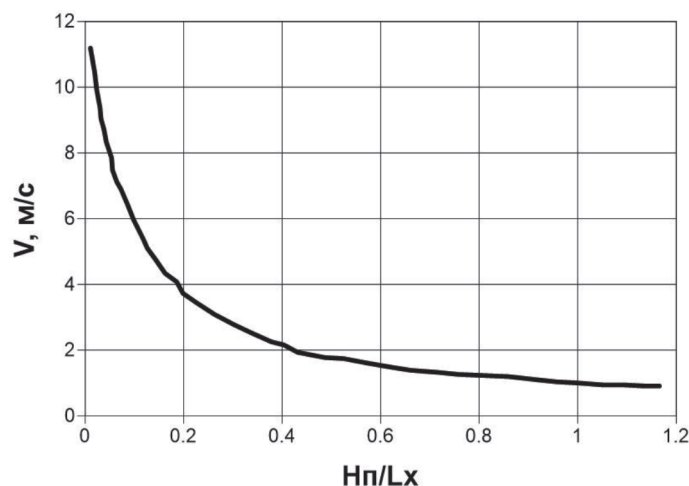


Рис. 3. Зависимость предельно допустимой скорости буксировки от относительной высоты препятствия для условия безопасности пилотирования аппарата

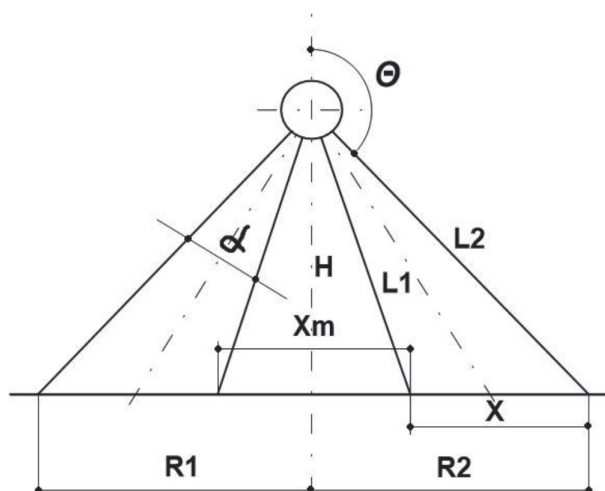


Рис. 4. Ориентация характеристики направленности антенн и зоны обзора ГБО

Поставим перед буксируемой гидроакустической системой задачу полного обследования полигона шириной A_{Π} за наименьшее время. Если допустить, что характеристики ГБО и значения возмущающих факторов заданы, то остаются два фактора, меняя которые мы можем влиять на величину реальной зоны видимости системы – ориентация антенн на носителе (Q) и расстояние БНПА до дна (H). Таким образом, задача сводится к отысканию алгоритма выбора оптимальных ориентаций антенн ГБО, расстояния БНПА до дна и маршрута буксировки.

Для получения максимальной величины зоны видимости ГБО выберем расстояние до дна таким образом, чтобы расстояние до дна по крайнему лучу L_1 , равнялось L_M , то есть

$$H = L_M \times \cos [(2\pi - \alpha - 2Q) / 2]. \quad (7)$$

Найдем выражение для величины зоны обзора при принятых выше допущениях. Горизонтальные проекции крайних лучей L_1 и L_2 (рис. 4) определяют как

$$R_1 = H \times \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M)], \quad (8)$$

$$R_2 = H \times \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M) - \alpha]. \quad (9)$$

С учетом (4.16) и (4.17) зона видимости локатора определится как

$$X = R_1 - R_2 = H \times \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M)] - H \times \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M) - \alpha].$$

Вследствие независимости воздействия возмущающих факторов, величины неопределенностей зон видимости по крайним лучам L_1 и L_2 могут быть вычислены, исходя из соотношения

$$\begin{aligned} (\Delta X_1)^2 &= H^2 \{ \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M)] - \operatorname{tg} \arccos (H / L_M) - \alpha_K \}^2 + \\ &+ \Delta H^2 \times \operatorname{tg}^2 [\arccos (H / L_M)] + (\Delta X_H)^2, \\ (\Delta X_2)^2 &= H^2 \{ \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M) - \alpha] - \operatorname{tg} [\arccos (H / L_M) - \alpha - \alpha_K] \}^2 + \\ &+ \Delta H^2 \times \operatorname{tg}^2 [\arccos (H / L_M) - \alpha] + (\Delta X_H)^2. \end{aligned}$$

Величины реальной зоны видимости (\ddot{x}) и мертвой зоны (\ddot{x}_M) определяются соотношениями: $\ddot{x} = X - \Delta X_1 - \Delta X_2$ и $\ddot{x}_M = 2R_2 + 2\Delta X_2$. Представим величину мертвой зоны:

$$\ddot{x}_M = n\ddot{x} + X'_M \quad (10)$$

где $n = \ddot{x}_M / \ddot{x}$ – целое число, округляемое в меньшую сторону, а X'_M – остаток.

Для полного обследования участка дна между крайними лучами ГБО необходимо проложить $(n + 2)$ галсов. При этом будет обследована площадь по ширине большая, чем $2(X + R_2)$, а именно: $S = 2(n + 1) \times \ddot{x} + X'_M$.

На последнем галсе при осмотре мертвой зоны используется не вся величина реальной зоны обзора ГБО \ddot{x} , а только ее часть $X'_M < \ddot{x}$, т.е. эффективность ГБО снижается. Этот недостаток можно устранить, если выбирать ориентацию антенны локатора и отстояние аппарата от дна (увеличивая Q и H) таким образом, чтобы выполнялось условие

$$\ddot{x}_M = n \ddot{x}. \quad (11)$$

В этом случае для осмотра указанного участка дна потребуется проложить $(n + 1)$ галсов. Соответственно, ширина полигона составит $S = 2(n + 1) \times \ddot{x}$. Однако при увеличении Q уменьшается X . Поэтому для выбора оптимальной ориентации антенн необходимо сравнивать эффективные площади, обследуемые БА за один галс при различных Q .

Полным циклом галсов назовем число $(n + 2)$, соответствующее минимальному количеству галсов, необходимому для полного обследования участка дна между крайними лучами L_1 , ГБО при ориентации антенн в соответствии с соотношением (10). Для условия (11) полному циклу соответствует $(n + 1)$ галс.

Определим число галсов, необходимое для полного обследования полигона при выбранной ориентации антенн и, следовательно, при известных значениях \ddot{x} и \ddot{x}_M . Представим ширину полигона A_{Π} в виде $A_{\Pi} = M S + m \ddot{x}$, где M – целое число полных циклов галсов; m – дополнительное число галсов необходимое для обследования оставшейся части полигона, (то есть, не охваченной полными циклами галсов).

Тогда при режиме, соответствующем условию (10), полное число галсов, необходимое для обследования полигона шириной A_{Π} , составит $N = M(n + 2) + m$. Для режима буксировки, соответствующему условию (11) $N = M(n + 1) + m$.

Оптимальным следует считать такие значения Q и H , при которых N будет минимальным. Практически выбор ориентации антенн и расстояния БНПА до дна сводится к численному счету N для всех вариантов Q и H , начиная с минимальных с постепенным увеличением этих значений согласно уравнению (7) до того момента, пока не реализуется условие (11). Дальнейшее увеличение Q и H нецелесообразно.

Аналогичный подход можно применять во всех случаях, когда требуется провести сплошное обследование некоторого района с помощью буксируемого или самодвижущегося носителя, оснащенного измерительной аппаратурой с известной зоной чувствительности.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенный анализ механизмов влияния скорости буксировки исследовательских аппаратурных комплексов на качество получаемой ими информации и безопасность проведения подводно-технических работ позволяет получить значения и расчетные соотношения для предельно допустимых скоростей движения при исследовании поверхности дна придонной области акваторий. Так оптимальная скорость глубоководной буксировки подводного аппарата составляет 0,50–0,75 м/с (1,0–1,5 узла). Задача обнаружения подводных объектов и элементов рельефа дна требуемого размера решается при скорости обследования не превышающей значение $\delta C / 20 L$. Требуемая четкость видеоизображения может быть получена на скоростях, не превышающих величину $0,5 \times (h_{\phi} / Z_k \times T_H) \times (H/F)$. При скорости буксировки $< (3\dot{H} / F) \times 10^{-3}$ может быть реализована требуемая (заданная) частота поступления видеоинфор-

мации. Оптимальные условия проведения маршрутной фотосъемки обеспечиваются при скоростях обследования, не превышающих величину $((1 - \beta) \times H \times h_{\text{ФК}}) / (F_{\text{Ф}} \times \tau_{\text{ФК}})$. Для обеспечения безопасности буксировки вблизи дна в районах с пересеченным рельефом следует придерживаться условий, при которых скорость буксировки не должна превышать значение $(Lx \times V_z) / (V_z \times t_3 + H_{\text{П}})$. Оптимальность технологии гидролокационной съемки определяется по условию минимизации числа галсов маршрута обследования полигонов.

Выводы

Таким образом в статье решены главные аспекты проблемы повышения эффективности подводных исследований с использованием подводных буксируемых аппаратов на основе анализа основных критериев выбора оптимальной скорости буксировки подводных аппаратов, предназначенных для обследования поверхности дна и придонного пограничного слоя [1], исходя из требований, налагаемых условиями работы аппарата, и технических возможностей, его приборного оснащения.

Работа выполнена в рамках госзадания ФАНО России (тема № 0149-2018-0010) при частичной поддержке РФФИ (проект P20 а № 17-05-41041) и РНФ (проект 14-50-00095).

Список литературы

1. Войтов Д.В. Телеуправляемые необитаемые подводные аппараты. – М.: Моркнига, 2012. – 506 с.
2. Зарецкий А.В. Усовершенствование пакета прикладных программ «Подводная механика» в части расчета статики тросовых систем // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. XV Всерос. научно-технической конференции. – М., 2017. – Т. 2. – С. 267–270.
3. Зарецкий А.В. Определения статического равновесия подводных объектов типа «гибкая связь + твердое тело» // Современные методы и средства океанологических исследований: матер. XII Международной научно-технической конференции. – М., 2011. – Т.2. – с. 93-95.
4. Кропотов А.Н., Плясунов В.М., Макашев А.А. Исследование системы видеонавигации в составе контуров системы управления движением подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. – 2014. – № 2 (18). – С. 13–19.
5. Бровка В.П. Экспериментальное исследование взаимосвязи параметров движения исследовательского подводного телеуправляемого аппарата и условий работы оператора // Океанологические управляемые аппараты и роботы. – Л.: Судостроение, 1976. – С. 52–57.
6. Алексеев Ю.К., Урываев К.П., Инзарцев А.В., Костенко В.В. Становление и развитие подводной робототехники // Освоение морских глубин. – М.: Издательский дом «Оружие и технологии», 2018. – С. 267–276.
7. Гусев В.К., Онищенко Э.Л. Некоторые вопросы применения буксируемых комплексов при исследовании дна акустическими методами // Технические средства изучения Мирового океана. – М.: ИОАН СССР, 1983. – С. 89–92.
8. Римский-Корсаков Н.А. Технические средства для исследований дна акваторий гидролокационными методами // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2017. – № 10 (2). – С. 205–213.