КОМБИНИРОВАННАЯ СИСТЕМА СВЯЗИ И НАВИГАЦИИ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА С ПОПЛАВКОВЫМ МОДУЛЕМ

В.В. Костенко, О.Ю. Львов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем морских технологий ДВО РАН¹

Наличие высокоскоростного канала информационного обмена с обеспечивающим судном (постом управления) в реальном времени существенно расширяет возможности выполнения работ автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА). Кроме того, для периодической компенсации ошибки местоположения аппарата, накопленной бортовой навигационной системой, требуются данные от приемника спутниковой навигационной системы (СНС). Для увеличения эффективности выполнения подводно-технических работ целесообразно использование поплавкового модуля связи и навигации (ПМСН), буксируемого АНПА в подводном положении. В статье проведен обзор существующих технических решений описанного подхода, предложены альтернативные варианты его исполнения, приведены результаты расчета силовых воздействий кабеля связи, а также представлены практические результаты разработки комбинированной системы связи и навигации АНПА через поплавковый модуль.

введение

При выполнении поисково-обследовательских работ актуальной является оперативность получения больших объемов информации, накопленных в результате работы поискового оборудования АНПА. Малая полоса пропускания гидроакустического канала связи не обеспечивает требуемой скорости информационного обмена [1]. Связь АНПА с обеспечивающим судном (береговым постом управления), а также определение географических координат аппарата в реальном масштабе времени возможны при использовании поплавкового модуля связи и навигации (ПМСН, рис. 1) [2-6].

Эффективность такого технического решения особенно очевидна при обследовании протяженных объектов (подводных трубопроводов), когда для навигационного обеспечения АНПА требуется многократная перестановка и координирование донных маяков-ответчиков гидроакустической навигационной системы (ГАНС ДБ). Реализация мобильной «одномаяковой» гидроакустической системы [7, 8] или системы пеленгования с ультракороткой базой (УКБ) требует дополнительных расходов на дорогостоящую буксировку гидроакустической антенны обеспечивающим судном или необитаемым поверхностным аппаратом. Использование буксируемого ПМСН, оснащенного приемником спутниковой навигационной системы (СНС), позволяет получить существенную экономию в определении координат АНПА в реальном масштабе времени без дополнительных затрат на суднобуксировщик. При этом координаты АНПА относительно поплавка можно уточнять в ходе расчета параметров привязной системы «ПМСН – кабель связи – АНПА» в стационарном потоке известной скорости.

Всплывающий модуль с навигационными и радиоантеннами (GPS, Wi-Fi, UHF) разработан фирмой Brooke Ocean Technology (США) и успешно прошел испытания в составе АНПА Bluefin-12 [2, 3]. Конструктивную и информационную интеграцию ПМСН в состав АНПА иллюстрирует рис. 2 [5]. Обработка данных приемника GPS, а также информационный обмен обеспечиваются бортовым компьютером



Рис. 1. АНПА с буксируемым поплавковым модулем системы связи

¹ 690091, г. Владивосток, ул. Суханова, 5а. E-mail: kostenko@marine.febras.ru



Puc. 2. Интеграция выпускаемого антенного модуля в состав АНПА Bluefin-12

и преобразователем интерфейса. При этом для информационного обмена и питания применяется коаксиальный кабель.

Штатный состав АНПА был дополнен отсеком с бортовой лебедкой, которая обеспечивает автоматический выпуск и прием ПМСН (рис. 3). Используемый в данном комплексе грузонесущий коаксиальный кабель связи имеет длину 30 м и диаметр 2 мм.

Фирма КСГ Technologies, Inc. (США) провела разработку выпускаемого антенного модуля с приемником GPS для АНПА, выполняющего охрану водного района и противоминные действия (рис. 4–6) [4].

Целесообразность применения буксируемого ПМСН специалисты фирмы КСF Technologies оценили в ходе анализа энергетических затрат АНПА на выполнение типовых миссии. При этом для расчетов был принят АНПА диаметром 1,2 м, который выполняет в течение 60 дней набор стандартных для его модели использования миссий, отличающихся частотой сеансов выхода на поверхность (табл. 1) [4].

Таким образом, оснащение АНПА периодически выпускаемым до поверхности ПМСН обеспечивает следующие преимущества проведения подводно-технических работ:

• непрерывная скоростная связь и отслеживание активности;

 сбор данных в реальном времени и принятие решения;

• увеличение времени выполнения миссии за счет экономии затрат энергии, расходуемой на периодическое всплытие АНПА;

 коррекция времени и ошибки, накопленной бортовой навигационной системой, без использования средств гидроакустической навигации;

• скрытность выполнения сеанса радиосвязи и навигации.



Рис. 3. Бортовая лебедка буксировочного кабель-троса АНПА Bluefin-12 разработки фирмы Brooke Ocean Technology

ПРОЕКТЫ И ЭКСПЕРИМЕНТЫ



Рис. 4. Тестирование ПМСН в составе АНПА Bluefin-12



Рис. 5. Прототип ПМСН Smart Buoy (KCF Technologies, Inc.)



Рис. 6. Прототип Smart Buoy, интегрированный в АНПА (слева) и демонстрационный запуск АНПА (справа) (Images Copyright KCF Technologies, Inc., 2011)

Таблица 1. Оценка энергетической эффективности использования выпускаемого антенного модуля в составе АНПА (диаметр 1,2 м) за 60 дней работы

Тип миссии	Частота всплытий/	Частота Время всплытий/ огругиений поверх- глуби		Энергозатраты на погружение/ всплытие, кВт·ч		Энергозатраты на погружение/ всплытие, кВт·ч		Экономия энергии АНПА,	
	погружении	ности		АНПА	ПМСН	кВт∙ч			
Стандарт	Каждые 12 часов	< 1 мин	100 м	64	1,1	62,9			
Прецизионная навигация	Каждые 6 часов	2 мин	100 м	140	2,2	138			
Активный поиск и доклад	Каждый час	5 мин	30 м	948	4	944			
Критический поиск и доклад	Дважды в час	5 мин	30 м	1716	8	1708			

Целью настоящей статьи является исследование особенностей функционирования и практической реализации комбинированной системы спутниковой навигации и связи АНПА с буксируемым по поверхности поплавковым модулем связи. Достижение поставленной цели требует последовательного решения следующих задач:

 анализ возможного состава и вариантов технической реализации ПМСН;

• расчет силового воздействия кабеля связи на АНПА и ПМСН;

• расчет координат АНПА по данным приемника СНС поплав-кового модуля;

 практическая реализация и испытание комбинированной системы навигации и связи АНПА на базе ПМСН.

Варианты технической реализации ПМСН

Решаемые с помощью ПМСН задачи определяют следующий состав необходимого оборудования:

 аппаратура скоростной Wi-Fi радиосвязи, обеспечивающая двухсторонний информационный обмен с судном-носителем на дистанциях до 500 м со скоростью 150–200 Мбит/с (ненаправленная судовая радиоантенна);

 аппаратура УКВ радиосвязи, обеспечивающая двухсторонний информационный обмен с судномносителем на дистанциях до 7 км со скоростью 115 кбит/с (ненаправленная судовая радиоантенна);

• аппаратура сотовой радиосвязи GSM;

 аппаратура спутниковой системы связи (ССС) «Гонец», «Иридиум», обеспечивающая пакетную передачу сообщений в управляющий центр из любой точки океана;

 приемник СНС GPS/ГЛО-НАСС, обеспечивающий определение абсолютного времени, географических координат, скорости и путевого угла поплавкового модуля и навигационную коррекцию АНПА;

 видеокамера, позволяющая организовать режим виртуального перископа;

• проблесковый светомаяк.

Комбинация вышеперечисленной аппаратуры в составе буксируемого ПМСН позволяет АНПА решать задачи, свойственные буксируемым и телеуправляемым аппаратам:

 функции буксируемого аппарата (получение фото, видео, гидролокационных изображений в реальном времени на борту обеспечивающего судна);

• функции телеуправляемого аппарата (детальное обследование объектов с помощью гидролокатора секторного обзора и видеокамер, а также проведение несложных манипуляционных работ). Варианты технической реализации ПМСН отличаются составом бортового оборудования, типом используемого грузонесущего кабеля (электрический, волоконно-оптический, табл. 2) и методом энергоснабжения модуля. Базовым ядром модуля является блок управления и связи, в состав которого входят:

• микроконтроллер, координирующий информационное взаимодействие аппаратуры ПМСН;

• приемник СНС GPS/ГЛО-НАСС;

 комплекс угловых датчиков, обеспечивающий измерение углового положения ПМСН;

 датчик глубины, позволяющий контролировать вертикальное перемещение модуля;

• средства радиосвязи;

• датчик затекания герметичного контейнера ПМСН;

 датчик «поверхность–вода», фиксирующий факт выхода модуля на поверхность;

• проблесковый светомаяк.

Информационно-энергетическое взаимодействие аппарата с ПМСН определяется типом используемого кабеля связи. Основные характеристики грузонесущих микрокабелей отечественного и импортного производства приведены в табл. 2.

В варианте системы с электрическим кабелем (рис. 7) аппаратную поддержку информационного обмена обеспечивают промышленные PLC-модемы (например, адаптеры Power Line), использующие две токоведущие линии питания ПМСН.

В случае использования волоконно-оптического кабеля связи (рис. 8) АНПА и ПМСН комплектуются оптомодемами, объединяющими локальные вычислительные сети (ЛВС) Ethernet аппарата и модуля. Кроме того, в состав ПМСН добавлен автономный источник питания. Достоинствами этого варианта являются более высокая скорость и помехоустойчивость канала связи,

Наименование	Параметры	Вес в морской воде, кг/км
Волоконно-оптический кабель Linden-SPE-7052 (Linden Photonics, Inc., США)	Одно одномодовое волокно Наружный диаметр Ø 1,9 мм Разрывное усилие не менее 1 кН	0,7
Волоконно-оптический кабель Linden-SPE-7050 (Linden Photonics, Inc., США)	Одно одномодовое волокно Наружный диаметр Ø 2,4 мм Разрывное усилие не менее 1 кН	2,2
Волоконно-оптический кабель ОК-4Е-5 (ОАО «Псковгеокабель)	Четыре одномодовых волокна Наружный диаметр Ø 4,5 мм Разрывное усилие не менее 5 кН	6,7
Коаксиальный грузонесущий кабель КГГМ 1К-50-1,0-1 (ОАО «Псковгеокабель»)	Токоведущий коаксиал Наружный диаметр Ø 4,2 мм Разрывное усилие не менее 1 кН	4,5

Таблица 2. Варианты грузонесущих микрокабелей связи АНПА – ПМСН

позволяющие использовать кабель много большей длины в сравнении с электрическим вариантом. Помимо этого отсутствие токоведущих жил в кабеле связи исключает выход из строя аппаратуры АНПА в случае его обрыва или затекания.

Недостатком «волоконно-оптического» варианта можно считать необходимость дополнительного обслуживания модуля аккумуляторной батареи (АБ) ПМСН. Однако использование системы бесконтактного заряда (СБЗ) может обеспечить достаточно быстрый автоматический заряд и мониторинг состояния



Рис. 7. Структура ПМСН с электрическим кабелем связи







Рис. 9. Внешний вид трансформаторов СБЗ (слева) и пример расположения трансформатора-приемника в составе АНПА (справа)

модуля АБ после стыковки ПМСН и АНПА. При этом массогабаритные размеры элементов СБЗ не вносят существенных изменений в конструктивный облик поплавкового модуля. Составные узлы примера СБЗ разработки ИПМТ [13] показаны на фотографиях (рис. 9).

Перечень доступных вариантов комплектующих для блока управления и связи, имеющих наилучшие характеристики, сведен в табл. 3.

К практической реализации предложено два варианта ПМСН. Состав первого варианта (ПМСН-1) определялся использованием волоконно-оптического кабеля связи с электроснабжением от встроенного модуля АБ. Требуемая энергоемкость АБ определяется продолжительностью нахождения ПМСН на поверхности и потребляемой модулем мощностью. Расчет мощности потребления ПМСН-1 приведен в табл. 4. Исходя из возможности постоянной буксировки ПМСН в ходе суточной работы АНПА и к.п.д. преобразования вторичного источника питания 80% потребуется источник энергии 200–260 Вт·ч. Этим требованиям удовлетворяет литий-ионная АБ на базе элементов 18650, которая может обеспечить работу ПМСН-1 в течение 35–40 ч.

Таблица 3. Основные технические характеристики блока управления и связи ПМСН

Состав аппаратуры	Потребляемая мощность, Вт	Габариты, мм	Масса, кг
Коммутатор 5 портов Ethernet 10/100 Base-TX: DES-1005C (D-Link)	≤0,8/0,4 (5B)	88×48×20	0,043
Микроконтроллер/вычислитель: BeagleBone Black (Embest Info&Tech)	≤2,3 (5B)	87×55×5	0,040
Мультисистемный высокоточный приемник СНС с функцией определения углов ориентации: NV08C-RTK (HBC «Навигационные технологии»)	≤0,3 (5B)	71×46×8	0,018
Антенна СНС: АСНП-2М (НИИ КП)	0,06 (3B)	25×27×10	≤0,02
Радиомодем WiFi: точка доступа PicoStation PICOM2HP «Ubiquiti» с антенной	≤8,0/1,0** (24B)	136×20×39	≤0,1
Радиомодем УКВ (900–920 МГц): модуль MM-2T «FreeWave» с антенной SPDA24918	4,0/0,5** (5B) +2–3 dBi	51×36×10 Ø 11×220	0,014 0,026
Радиомодем ССС «Гонец»: терминал АТ-МН-2.1* Антенна «Гонец» ССА-Д2-1М Антенна GSM (ESC-GSM-05 SMA-M)	60/6** (12B) 3 dBi	130×70×25 ∅ 190×100 115×22×4	0,3 0,3 0,05
Датчик глубины: СДВ (НПК ВИП)	0,1 (24B)	Ø 30×105	0,18
ИТОГО	60/10**	_	<1,2

* Терминалы ССС «Гонец» имеют встроенный приемник ГЛОНАСС/GPS и альтернативный канал GSM, позволяющий использовать наземные сети сотовой связи.
** Передача/прием. К достоинствам варианта ПМСН-2 с электрическим кабелем связи (табл. 5) можно отнести почти в 3 раза меньшие массу и габариты по сравнению с вариантом волоконно-оптического кабеля связи (ПМСН-1).

Моделирование движения привязной системы «АНПА – кабель связи – ПМСН»

Для разработки конструктивных решений обеспечения буксировки поплавкового модуля требуется определение ряда ключевых параметров, к которым относится:

 максимальное натяжение кабеля связи;

• силовые воздействия кабеля связи на буксируемый модуль;

• силовые и моментные воздействия кабеля связи на АНПА. Таблица 4. Основные характеристики ПМСН-1 с волоконно-оптическим кабелем (компонуется в цилиндрический контейнер с водоизмещением 8,8 дм³)

Состав аппаратуры ПМСН	Мощность, Вт	Габариты, мм	Масса, кг	
Блок управления и связи	60/10*	Ø 110×100	<1,2	
Оптомодем: ICP DAS NS-200WDM-A	≤2,9 @24B	99×78×33	0,1	
Аккумуляторная батарея 18650-783Р-2 шт.	250Вт·ч@25В	Ø 70×120	1,1	
Устройство заряда СБЗ	50	Ø 70×120	0,3	
Трансформатор СБЗ		Ø 90×50	0,3	
ВИП МДМ20-1Е05ВП АЕ ИП (к.п.д. 88%)	20 (5B/4A)	47,5×33×10	0,045	
ВИП МДМ80-1Б12ТУВ АЕДон (к.п.д. 86%)	80 (12B/6,7A)	84,5×53×13	0,11	
ИТОГО	≤60/13*	_	<4,3	

* Передача/прием.

Таблица 5. Основные характеристики ПМСН-2 с электрическим кабелем (компонуется в цилиндрический контейнер водоизмещением 3,4 дм³)

Состав аппаратуры ПМСН	Мощность, Вт	Габариты, мм	Масса, кг
Блок управления и связи	60/10*	Ø 110×100	<1,2
Адаптер PowerLine TL-PA4020 (2 порта 10/100BASE-TX Ethernet)	≤2,6@5B	63×47×40	0,1
ВИП МДМ20-1Е05ВП АЕ ИП (к.п.д. 88%)	20 (5B/4A)	47,5×33×10	0,045
ВИП МАА75-1Ц12СД ОА АЕДон (к.п.д. 84%)	75 (12B/6A)	111×61×24	0,29
ИТОГО	≤60/13*	_	<1,5

* Передача/прием.



Рис. 10. Расчетная схема привязной системы «АНПА – кабель – ПМСН»

Разработанная в ИПМТ прикладная программа ZONA [9, 10] позволяет в результате решения численными методами уравнения гибкой нерастяжимой нити в установившемся потоке определить перечисленные параметры. Расчетная схема привязной системы приведена на рис. 10, где приняты следующие обозначения: Х, Ү, А – связанная система координат АНПА, $X_{2}Y_{2}\Pi$ – связанная система координат ПМСН; T_{xya} , T_{xa} , T_{ya} – соответственно результирующая, вертикальная и горизонтальная реакции кабеля связи на АНПА; T_{xyn} , T_{xn} , *Т*_{*vn*} – результирующая, вертикальная и горизонтальная реакции кабеля связи на ПМСН; Q_{μ} – остаточная плавучесть ПМСН; $M_{zx} = T_{ya} \cdot h_{x}$ – возмущающий момент, обусловленный реакцией кабеля связи Т и вертикальным смещением точки его крепления относительно центра масс АНПА; L-длина кабеля связи; dY, dX – соответственно вертикальная и горизонтальная координаты ПМСН относительно АНПА; dF_{y} , dF_{y} – дополнительные тяги движительно-рулевого комплекса АНПА, необходимые для компенсации реакций кабеля T_{xa} и T_{ya} соответственно; R_{xn} – гидродинамическое сопротивление ПМСН, которое определяется соотношением [12] по заданному водоизмещению

$$R_{x\Pi} = C_{x\Pi} \cdot \frac{\rho \cdot V_x^2}{2} \cdot U_{\Pi}^{2/3},$$

где: C_{xn} – коэффициент гидродинамического сопротивления поплавка, ρ – плотность воды, U_n – водоизмещение ПМСН, V_x – установившаяся скорость движения АНПА.

Для моделирования были приняты следующие исходные данные:

• кабель связи – оптоволоконный грузонесущий ОК-4Е-5 (диаметр – 4,5 мм, вес в воде – 6,7 г/м, разрывное усилие – 5 кН);



Рис. 11. Форма кабеля связи при движении АНПА со скоростью 1,0 м/с (dY = 10 м, L = 20 м)



Рис. 12. Зависимость максимального натяжения кабеля связи от скорости и глубины хода АНПА (*L/H* = 2)



Рис. 13. Зависимость дополнительной тяги ДРК, необходимой для буксировки ПМСН, от скорости и глубины хода АНПА

 поплавковый модуль системы связи: U_n = 0,0088 м³, C_{xn} = 0,2;

• скорости движения АНПА V_x, м/с: 0,25; 0,50; 0,75; 1,00; 1,25; 1,50;

глубины погружения АНПА
 при буксировке *dY*, м: 10; 20; 30;
 40; 50;

• длины кабеля связи (*L* = 2 * *dY*), м: 20; 40; 60; 80; 100;

• плечо возмущающего момента $h_{\kappa} = D_{\kappa}/2 = 0,4$ м (АНПА типа Клавесин-1Р с диаметром корпуса $D_{\kappa} = 0,8$ м).

Вычислительный алгоритм программы ZONA обеспечивает итерационный поиск натяжения корневого (со стороны АНПА) и ходового (со стороны ПМСН) концов кабеля связи для заданных значений скорости хода и заглубления АНПА. При этом вертикальная реакция кабеля связи на ПМСН T_{yn} определялась по условию его нулевой глубины dY = 0 м. Результаты проведенных расчетов приведены на рис. 11–14 и в табл. 6.

Расчет координат АНПА по данным приемника СНС, буксируемого ПМСН

Для определения географических координат АНПА необходимо рассчитать координаты смещения аппарата относительно буксируемого по поверхности ПМСН с приемником СНС. Величина этого смещения будет зависеть от скорости и направления стационарного потока, набегающего на привязную систему «АНПА – кабель связи – ПМСН», глубины погружения аппарата, а также параметров кабеля связи (длина, диаметр, плавучесть). Рис. 15 иллюстрирует формирование результирующего потока V_{нпа}, обусловленного только движением АНПА относительно донной поверхности. При этом были приняты следующие обозначения [1]: OXZнеподвижная относительно Земли

			Реакция кабеля						
Глубина	Длина кабеля	Снос ПМСН		АНПА				ПМСН	
хода а1, м	<i>L</i> , м	ил, м	<i>T_{xa}</i> , H	<i>Т_{уа}</i> , Н	T _{xya} , H	<i>М_z</i> , Н·м	<i>T_{xn}</i> , H	<i>T_{yn}</i> , H	<i>Т_{хуй}</i> , Н
10	20	-16,3	-21,8	5,2	22,4	8,7	4,3	-21,9	22,3
20	40	-32,2	-40,9	9,2	41,9	16,4	4,3	-41,5	41,7
30	60	-48,1	-60,0	13,3	61,5	24,0	4,3	-60,9	61,1
40	80	-60,3	-79,2	17,4	81,7	31,7	4,3	-80,5	81,1
50	100	-79,8	-98,3	21,5	100,7	39,3	4,3	-99,9	100,1

Таблица 6. Результаты расчета реакции кабеля связи для Vx = 1,0 м/с

система координат (СК); $AX_{I}Z_{I}$ – связанная с АНПА СК; АХ-продольная ось поточной СК АНПА; V_{xo}, V_{xo}, V_{xzo} – соответственно продольная, поперечная и результирующая скорости движения относительно дна; φ, β, γ – соответственно угол курса, дрейфа и траектории движения АНПА; ПХ, Z, - связанная с ПМСН СК; dX, dZ, D_r – соответственно продольное, поперечное и горизонтальное смещения АНПА относительно ПМСС; x_{n} , z_{n} – географические координаты ПМСН по приемнику СНС; x_a, z_a – искомые координаты АНПА; φ_n – угол курса ПМСН.

Направление и скорость движения привязной системы «АНПА – кабель – ПМСН» в инерциальной системе координат определяются очевидными соотношениями:

$$\chi = \varphi - \beta,$$

$$\beta = \operatorname{arctg} \frac{V_{zo}}{V_{xo}},$$

$$V_{xzo} = \sqrt{V_{xo}^2 + V_{zo}^2}.$$

При этом кабель связи будет располагаться в вертикальной плоскости, проходящей через продольную ось поточной системы координат АНПА АХ. С учетом сказанного, а также полагая известным горизонтальное смещение Dr, можно определить координаты АНПА:

$$\begin{aligned} x_{\rm a} &= x_{\rm m} + D_{\rm r} \cdot \cos \chi, \\ z_{\rm a} &= z_{\rm m} + D_{\rm r} \cdot \sin \chi. \end{aligned}$$



Рис. 14. Зависимость требуемого запаса плавучести ПМСН от скорости и глубины хода АНПА

Оценить горизонтальное смещение ПМСН относительно АНПА позволяет использованная ранее прикладная программа ZONA. Графики рис. 16 иллюстрируют зависимость смещения D_r от длины кабеля связи, скорости и глубины хода АНПА. Исходные данные расчета соответствовали значениям, принятым ранее для моделирования движения привязной системы.

Анализ полученных графиков показывает, что для скоростей хода АНПА $V_{_{xzo}} > 0,10$ м/с горизонтальное смещение ПМСН, определенное программой ZONA, незначительно отличается от смещения, рассчитанного по соотношению

$$D_{\rm r} = \left(1,63 - \frac{0,028}{V_{\rm xzo}}\right) \cdot H.$$

Наличие течения в районе работ существенно изменит направление и скорость потока, набегающего на привязную систему «АНПА – кабель – ПМСН». Очевидно, что это приведет к ошибке определения координат АНПА, вызванной погрешностью определения продольной и поперечной координат горизонтального смещения ПМСН от аппарата. Рис. 17 иллюстрирует формирование результирующего набегающего потока, обусловленного не только движением АНПА относительно донной поверхности, но и подводным течением известной скорости $V_{\rm m}$ и направления $\varphi_{\rm m}$.

Направление γ и скорость $V_{{\rm нn}\Sigma}$ движения привязной системы «АНПА – кабель – ПМСН» в инерциальной системе координат с уче-



Рис. 15. Системы координат и составляющие скорости движения привязной системы «АНПА – кабель – ПМСН» в горизонтальной плоскости без течения



Рис. 16. Зависимость горизонтального смещения ПМСН от скорости и глубины хода АНПА при условии *L* = 2 * *H*

том течения определяются соотношениями:

$$V_{\text{HN}\Sigma} = \left[(V_{\text{T}} \cdot \cos(\varphi_{\text{T}} - 90^{\circ}) - V_{\text{HN}a} \cdot \sin\chi)^2 + (V_{\text{T}} \cdot \sin(\varphi_{\text{T}} - 90^{\circ}) + V_{\text{HN}a} \cdot \cos\chi)^2 \right]^{1/2},$$
$$\gamma = \arctan \frac{V_{\text{T}} \cdot \cos(\varphi_{\text{T}} - 90^{\circ}) - V_{\text{HN}a} \cdot \sin\chi}{V_{\text{HN}\Sigma}}.$$

При этом для известных значений координат ПМСН и горизонтального смещения D_r можно определить координаты АНПА с учетом течения:

$$x_{a} = x_{\pi} + D_{r} \cdot \cos \gamma,$$
$$z_{a} = z_{\pi} + D_{r} \cdot \sin \gamma.$$

40 ПОДВОДНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И РОБОТОТЕХНИКА. 2017. № 1(23)



Рис. 17. Системы координат и составляющие скорости движения привязной системы «АНПА – кабель – ПМСН» в горизонтальной плоскости с учетом течения

Расчет значения направления движения привязной системы у требует точного знания направления и скорости течения, которые не поддаются прямому измерению, а приводятся в Атласах течений, в лоциях соответствующих морей, в таблицах приливных течений и на морских навигационных картах. Однако приводимые сведения в этих пособиях нужно оценивать критически, так как они могут существенно отличаться от действительности. В качестве дополнительной оценки направления движения привязной системы можно использовать траекторию движения ПМСН или угол его курса φ_{Π} . В особо ответственных подводнотехнических работах возможно использование методов пеленгования маяка-ответчика, размещенного на ПМСН, аппаратурой УКБ ГАНС АНПА.

Таблица 7. Основные характеристики макета ПМСН

Наименование характеристики	Значение
Масса на воздухе, кг	24
Габаритные размеры, м: диаметр х высота	0,70×1,21
Энергоемкость аккумуляторной батареи, Вт·ч	259
Максимальная мощность потребления РЭА, А	10,2
Длина оптического кабеля связи, м	250
Длина волны приемника Rx / передатчика Tx, nm	1550/1310
Частота передатчика Wi-Fi, ГГц	2,2
Максимальная скорость беспроводного соединения, Мбит/с	150







Рис. 19. Структура информационного обмена комплекса «АНПА – ПМСН – судно»



Рис. 20. Конструктивный облик макета ПМСН

Практическая реализация управления АНПА через ПМСН

Основные технические решения реализации дистанционного управления АНПА через буксируемый ПМСН были опробованы в ИПМТ в ходе макетирования. При этом была реализована модель использования комплекса, показанная на рис. 18.

С учетом выбранной структуры комплекса, показанной на рис. 19,



Puc. 21. Натурные испытания НПА в режиме телеуправления через макет ПМСН



Puc. 22. Маневрирование НПА в режиме телеуправления через макет ПМСН

был определен конструктивный облик ПМСН, обеспечивающий размещение необходимого состава оборудования, требуемую ориентацию антенной системы, размещение запаса оптоволоконного кабеля связи с АНПА и необходимые запасы плавучести и остойчивости. Принятые при этом технические решения иллюстрируются рис. 19–22.

В ходе натурных испытаний была подтверждена возможность буксировки ПМСН подводным аппаратом со скоростью 0,5 м/с на глубине погружения 5 м с длиной грузонесущего оптоволоконного кабеля 10 м. На рис. 20 приведен планшет оператора АНПА с траекторией движения ПМСН. При этом подтвержден устойчивый информационный обмен с передачей видеоизображений между НПА и обеспечивающим судном по каналу Wi-Fi на дальности до 600 м. Основные характеристики макета ПМСН приведены в табл. 7.

выводы

• Буксируемый по поверхности модуль в составе АНПА значительно расширяет функциональные возможности подводного робототехнического комплекса, повышает точность навигации и эффективность поисково-обследовательских работ в мелководных районах.

• Увеличение глубины хода АНПА с сохранением оптимальной длины кабеля $L = 2 \cdot dY$ приводит к пропорциональному увеличению реакции кабеля и горизонтального сноса ПМСН относительно АНПА.

• Реакция кабеля связи на ПМСН определяется вертикальной составляющей, которая должна компенсироваться плавучестью поверхностного модуля. Недостаток требуемого запаса плавучести поплавкового модуля при буксировке на значительной глубине и скорости хода АНПА можно компенсировать за счет гидродинамической подъемной силы, обеспеченной формой поплавка и набегающим потоком. • Определены требования к ДРК, обеспечивающие возможность буксировки ПМСН для скоростей хода АНПА от 0,25 до 1,5 м/с на глубинах от 10 до 50 м. Выявлено существенное (почти четырехкратное) превышение горизонтальной проекции реакции кабеля связи, действующей на аппарат, над вертикальной составляющей.

• Реализация устойчивого движения АНПА при буксировке ПМСН требует использования в составе ДРК пары вертикальных подруливающих движителей для компенсации не только вертикальной реакции кабеля, но и возмущающего момента по дифференту.

• При выполнении особо ответственных работ, требующих высокоточного навигационного обеспечения без точного знания направления и скорости течения, необходимо дооборудовать ПМСН маяком-ответчиком, а АНПА – аппаратурой УКБ ГАНС.

• Для оценки погрешности расчетного определения координат АНПА относительно ПМСН требуются экспериментальные исследования на полигоне, оборудованном ГАНС ДБ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др. Автономные подводные роботы: Системы и технологии / под общ. ред. М.Д. Агеева. М.: Наука, 2005. 400 с.

2. Roger E.Race. Towed Antenna System Allows Two-Way, Real-Time Communication with UUVs [Электронный ресурс] – http://www.seatechnology. com/features/2011/0511/towed_antenna.php (дата обращения: 16.04.2017).

3. Race R. Tethered Antennas for Unmanned Underwater Vehicles. [Электронный pecypc] – http://www.researchgate.net/publication/235129304_ Tethered_Antennas_for_Unmanned_Underwater_Vehicles (дата обращения: 25.04.2017).

4. Kraige D. Retractable UUV Antenna Buoy with Smart Tether GPS. KCF Technologies, US Naval Sea Systems Command SBIR N04-T020 [Электронный pecypc] – http://auvac.org/uploads/manufacturer_spec_sheet_pdf_nav/KCF2Retractable%20AUV%20Antenna. pdf (дата обращения: 30.04.2017).

5. Rivera D.F., Bansal R. Towed Antenas for US Submarin Communications: A Historical Perspective // IEEE Antenas and Propagation Magazine. 2004. V. 46, N 1. P. 23-36.

6. Patent No US 8,813,669 B2, USA. Towed Antenna System and Method / Roger E. Race, Jacob C. Piscura, David S. Sanford. Заявл. 09.06.2010, опубл. 26.08.2014 [Электронный pecypc] – https://www.google.com/patents/US8813669 (дата обращения: 30.04.2017).

7. Fallon M., Papadopoulos G., Leonard J., Patrikalakis N. Cooperative AUV Navigation using a Single Maneuvering Surface Craft // Journ. of Robotics Research. 2010. N 29(12). P. 1461–1474.

8. Dubrovin F.S., Scherbatyuk A.F. Studying some algorithms for AUV navigation using a single beacon: The results of simulation and sea trials // Gyroscopy and Navigation. 2016. V. 7, Is. 2. P. 189–196.

9. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Исследование влияния кабеля связи на маневренность телеуправляемого подводного аппарата // Подводные исследования и робототехника. 2009. № 1 (7). С. 22–27.

10. Костенко В.В., Мокеева И.Г. Методика определения требований к движительно-рулевому комплексу подводного аппарата привязного типа // Материалы 3-й науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана». Владивосток, 2009. С. 71–77.

11. Егоров В.И. Подводные буксируемые системы: учеб. пособие. Л.: Судостроение, 1981. 304 с.

12. Пантов Е.Н., Махин Н.Н., Шереметов Б.Б. Основы теории движения подводных аппаратов. Л.: Судостроение, 1973. 209 с.

13. Пат. 2602078 Российская Федерация, МПК Н02Ј 7/00. Устройство для зарядки аккумуляторной батареи подводного объекта / Герасимов В.А., Филоженко А.Ю.; заявитель и патентообладатель ИПМТ ДВО РАН. – № 2015146625/07; заявл. 28.10.2015; опубл. 10.11.2016, Бюл. № 31. 17 с.: ил.

