

П.А. Будко, А.М. Винограденко, А.И. Литвинов

### РЕКОНФИГУРАЦИЯ КАНАЛОВ СВЯЗИ ПРИ УПРАВЛЕНИИ СМЕШАННЫМИ ГРУППИРОВКАМИ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ\*

*Рассмотрены вопросы выбора методов и каналов управления робототехническими комплексами морского базирования, как связующего звена единого информационно-управляющего пространства различных физических сред. Предложена реконфигурация радиолиний разных диапазонов волн, позволяющая обеспечить устойчивое доведение команд управления до робототехнических комплексов, находящихся как в надводном, так и в подводном положении. Проанализированы возможности каналов космической, оптической и гидроакустической, а также дана сравнительная оценка каналов радиосвязи декаметровых и сверхдлинных волн по доведению информации до робототехнического комплекса, находящегося на глобальном удалении от пункта управления. Рассмотрены возможные методы информационного взаимодействия между подводными аппаратами и дана оценка максимальной дальности при обмене данными между глубоководными объектами по гидроакустическому каналу. Выявлены возникающие трудности в обосновании вариантов построения распределенных систем управления смешанными группами робототехнических комплексов, заключающиеся в невозможности обеспечения необходимой устойчивости каналов управления и взаимодействия в группе на границах физических сред, а также малыми дальностями в обеспечении гидроакустической связи. Приведены расчеты рационального числа робототехнических комплексов, действующих в группе. Сделан вывод о том, что существенное повышение эффективности действий смешанной робототехнической группировки достигается наряду с комплексным использованием разнородных каналов управления при нахождении робототехнических комплексов в различных средах, применением методов, основанных на современных технологиях программируемого радио с элементами когнитивных радиосистем и искусственного интеллекта при обработке принимаемой информации в ходе информационного взаимодействия на основе общих баз данных распределенных систем.*

*Робототехнический комплекс; канал космической связи; декаметровая радиолиния; гидроакустическая связь; эффект Доплера.*

P.A. Budko, A.M. Vinogradenko, A.I. Litvinov

### RECONFIGURATION OF COMMUNICATION CHANNELS AT MANAGEMENT OF MIXED GROUPS OF ROBOTIC COMPLEXES

*Questions of the choice of methods and control paths by robotic complexes of sea basing as link of uniform management information space of various physical environments are considered. The reconfiguration of radio lines of different wave bands allowing to provide steady bringing teams of management to the robotic complexes which are both in surface and in an underwater state is offered. Possibilities of channels of space, optical (laser) and hydroacoustic communication are analysed, and also a comparative assessment of channels of a radio communication of decameter and superlong waves on bringing information to the robotic complex which is on global removal from control center is given. Possible methods of information exchange between submersibles are considered and an assessment of the maximum range at data exchange between the deep-shipped objects on the hydroacoustic channel is given. The arising difficulties in justification of options of creation of distributed control systems by the mixed groups of robotic complexes, the ensuring necessary stability of control paths consisting in impossibility and interaction in group on borders of physical environments, and also small ranges in ensuring hydroacoustic communi-*

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-29-04326 офи\_м.

ation are revealed. Calculations of a rational number of the robotic complexes operating in group are given. The conclusion is drawn that essential increase in efficiency of actions of the mixed robotic group is reached along with complex use of diverse control paths when finding robotic complexes in various environments, application of the methods based on modern technologies of programmable radio with elements of cognitive radio systems, artificial intelligence when handling of the accepted information during intensive information interaction on the basis of general databases of the distributed systems.

*Robotic complex; channel of space communication; decameter radio line; hydroacoustic communication; Dopler's effect.*

**Введение.** Значительный технологический прогресс в области создания новых сверхпрочных материалов, малогабаритных энергоёмких источников электропитания, нейрокompьютеров, базовых элементов искусственного интеллекта позволяют в настоящее время создать автономные робототехнические комплексы (РТК) широкого спектра применения [1]. При этом задачи, возлагаемые на РТК, с каждым годом все более усложняются. И если на заре зарождения робототехники РТК был ориентирован на решение конкретной задачи (операции) в офисе, в цеху, на транспорте, в непосредственной близости от оператора, то сегодня на РТК возлагаются распределенные миссии, решаемые на глобальном удалении от объекта управления. Причем важность выполнения возлагаемых на РТК миссий зачастую требует от проектировщика обеспечить универсальность его функционирования в различных средах (на земле, в воздухе, под водой и в космосе), что само по себе является сложнейшей задачей, либо разработки смешанной робототехнической группировки, взаимодействующей в едином информационно-управляющем пространстве (поле) (ЕИУП), что вполне достижимо уже сегодня, опираясь на принципы сетецентрического управления [2].

*Цель статьи:* выбор и реконфигурация каналов управления смешанными робототехническими группировками, обеспечивающих увеличение дальности взаимодействия внутри группы, в различных средах функционирования.

**1. Морские РТК как связующее звено ЕИУП всех физических сред.** Анализ доступных библиографических источников в данной предметной области показывает, что на фоне бурного развития беспилотных космических (БПКА), воздушных (БПЛА) и наземных аппаратов и роботов наименее освещёнными являются смежные приложения РТК морского базирования (МБ) [1–4]. При этом именно на море могут быть в полной мере применимы смешанные робототехнические группировки с задачами освещения обстановки во всех средах (под водой, над водой, в воздухе, в космосе и на берегу) в рамках единого информационно-управляющего поля. Но именно морская среда обладает еще не до конца изученными переменными параметрами, затрудняющими устойчивый обмен данными как на больших глубинах, так и на разделе двух сред [5].

Расширение территориальных зон применения и усложнение задач, решаемых РТК в интересах различных ведомств, потребовало разработки автономных интеллектуальных систем управления РТК МБ [6–8]. Так в работе [7] представлены результаты моделирования и экспериментальной проверки метода нейросетевого управления искусственным интеллектом, применительно к РТК. Реализация метода обеспечила возможность автоматического обхода автономным аппаратом препятствий с последующим возвращением на заданный маршрут.

**2. Повышение эффективности выполнения миссии в группе РКТ.** Дальнейшее повышение эффективности РТК МБ может быть достигнуто за счет их группового использования, а также взаимодействия в смешанной группе (по различным средам функционирования: подводные, надводные, воздушные, космические). Например, это позволит при проведении аварийно-спасательных работ или поиске затонувших объектов, представляющих опасность химического или радио-

активного заражения окружающей среды, резко сократить время указанных операций, а в случае охраны протяженного периметра водной границы или поиска движущегося подводного объекта задействование группы РТК МБ становится полностью оправданным [6–9].

При проведении как одиночных, так и групповых миссий РТК МБ независимо от наличия заложенной в них жесткой или интеллектуальной программы функционирования, необходимо обеспечение устойчивого взаимодействия комплекса с базовым пунктом управления (БПУ), а при групповой миссии также гарантированную надежность обмена данными между РТК группы. Потеря возможности управления РТК МБ с БПУ, или обмена информацией внутри группы РТК, особенно при выполнении специальных задач, может привести как минимум, к потере РТК, а как максимум, к непредсказуемым последствиям.

Существенное повышение эффективности действий такой смешанной робототехнической группировки достигается наряду с комплексным использованием разнородных каналов управления при нахождении РТК в различных средах, применением методов, основанных на современных CRS и SDR-технологиях с элементами искусственного интеллекта и нейробионики при обработке принимаемой информации в ходе интенсивного информационного взаимодействия на основе общих баз данных и знаний распределенных систем.

### **3. Реконфигурация каналов управления РТК в надводном положении.**

В настоящее время взаимодействие с РТК в надводном положении обеспечивается в основном, с использованием спутниковой системы связи, Wi-Fi и гидроакустической связи, а между РТК по гидроакустическому каналу (ГАК). Однако при этом задача по реализации устойчивого обмена данными с глобально удаленными РТК от БПУ не решена в полной мере [3]. Рассмотрим возможные методы повышения вероятностно-временных характеристик информационного обмена с РТК МБ, находящимися в надводном положении. Этот режим относится к автономным управляемым кораблям (катерам) и к РТК в надводном положении.

*Канал спутниковой связи.* Безусловно, в этом случае основным видом связи следует считать спутниковый канал обмена данными. В настоящее время в рамках федеральной космической программы РФ до 2015 г. разработана и развертывается многофункциональная система персональной спутниковой связи (МСПСС) «Гонец-ДМ». Анализируя основные технические характеристики абонентского терминала этой системы [10] и особенно малые массогабаритные показатели МСПСС «Гонец-ДМ1» и низкое энергопотребление, а также его возможности по организации связи с абонентами, находящимися на глобальных расстояниях от БПУ, можно сделать вывод о его применимости в составе РТК на радиолиниях (РЛ) «берег-море-берег». Вместе с тем, в условиях сильного волнения моря (заливание водой антенны), при нахождении РТК в подледном положении, а также выхода из строя элементов в тракте спутниковой связи, эффективность её применения представляется проблематичной.

*Каналы радиосвязи декаметровых и сверхдлинных волн.* Учитывая возможность глобального перемещения РТК (в 2009 г. экспериментальный глайдер США за 7,5 мес. пересек Атлантический океан, преодолев около 11,7 тыс. км [7]) в качестве резервной связи целесообразно использовать РЛ декаметровых (ДКМ) и сверхдлинных волн (СДВ), обеспечивающие возможность доведения информации в дальнюю морскую и океанскую зоны. При этом для выбора энергетики РЛ, помимо параметров антенно-фидерных подсистем (АФПС) передатчика (и приемника) и эффективности сигнально-кодовых конструкций передаваемых сообщений, необходимо учитывать как характеристики среды РРВ, так и воздействие атмосферных шумов и помех естественного и искусственного характера.

На рис. 1 представлена в графическом виде область, в которой с вероятностью  $P > 0,99$  находятся коэффициенты внешнего шума  $F_a$ , для СДВ–ДКМ диапазонов частот. При этом среднеквадратичное значение напряженности поля шумов в децибелах (относительно мкВ/м) определяется выражением [11]:

$$E_n = F_a + 20 \log f_c + 10 \log \Delta f_c - 95,5, \quad (1)$$

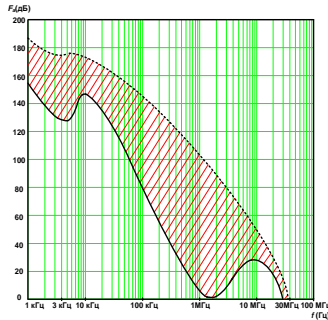


Рис. 1. Значения коэффициентов внешнего шума [11]

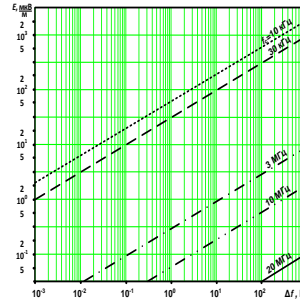


Рис. 2. Зависимость напряженности поля шумов от частотной полосы приема

где  $F_a = 10 \log(P_a^{ш} / kT_o)$ ;  $P_a^{ш}$  – мощность атмосферных шумов в полосе сигнала (Ватт);  $\Delta f_c$  – ширина полосы принимаемого сигнала (Гц);  $f_c$  – «несущая» частота сигнала (МГц);  $k$  – постоянная Больцмана;  $T_o$  – эталонная температура (290° К).

На рис. 2 приведены графики зависимости уровня  $E_n$  для различных значений  $\Delta f_c$  и  $f_c$ , рассчитанные с использованием формулы (1) для верхней границы коэффициента внешнего шума  $F_a$  (см. рис. 1, пунктирная кривая).

Из анализа графиков рис. 2 и формулы (1) следует, что для повышения надежности связи в условиях естественных помех необходимо увеличивать мощность передачи сообщения или уменьшать полосу излучаемого сигнала.

Оценку значений необходимой мощности излучения для обеспечения устойчивого приема на радиотрассах протяженностью до 1 тыс. км для ближней морской зоны можно провести с использованием графиков, представленных в [12]. На рис. 3 приведен график значений напряженности поля для нескольких номиналов частот СДВ–ДКМ диапазонов волн, характеризующих ближнюю морскую зону (заштрихованные области соответствуют уровням напряженности поля атмосферных шумов, ожидаемых с вероятностью  $P > 0,99$ ). На рис. 4 приведены аналогичные графики для трасс протяженностью более 1 тыс. км (ионосферное распространение радиоволн – РРВ).

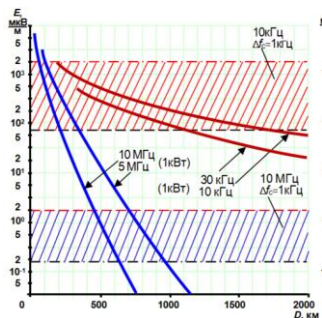


Рис. 3. Значения напряженности поля сигнала для ближней морской зоны

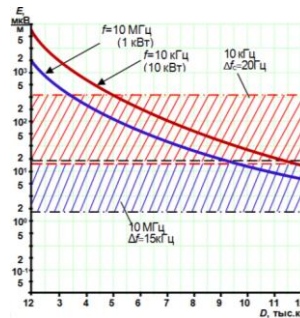


Рис. 4. Значения напряженности поля сигнала при ионосферном РРВ (СДВ–ДКМ)

Для ДКМ диапазона расчет проведен с использованием полуэмпирической формулы Неволлина-Щепотина, полученной на основе усреднения медианных значений напряженности поля для морских трасс на оптимальных частотах [13]:

$$E = \frac{122}{r_T} \sqrt{\frac{PD}{0,0021 + \sin \theta}} \exp\left(-\frac{3,8 \cdot 10^{-2}}{\lambda^{0,2}} r_T\right), \quad (2)$$

где  $P$  – мощность излучения сигнала (кВт);  $D$  – коэффициент усиления антенны;  $r_T$  – дальность трассы (тыс. км);  $\theta^\circ$  – угловое расстояние между пунктами приема и передачи;  $\lambda$  – длина излучаемой волны (м).

Расчеты для частот СДВ диапазона проводились по модифицированной формуле Остина, [12, 14]

$$E = 120 \sqrt{\frac{PD}{r_T \sin \theta}} \exp(-0,0457 f^{0,6} r_T), \quad (3)$$

где  $f$  – частота излучения сигнала в кГц.

Отметим, что необходимую мощность излучения для достижения требуемой напряженности поля  $E_{\text{тр}}$  можно определить из соотношения  $P_{\text{н}} = (E_{\text{тр}}/E)^2$ , кВт, где значение  $E$ , соответствующее заданной протяженности трассы, берется из графиков рис. 3 (4) или определяется по формулам 2 (3) при  $D = 1$  и  $P = 1$  кВт.

Красной пунктирной линией на графике рис. 4 приведено максимально ожидаемое значение напряженности поля атмосферных шумов, соответствующее величине  $\Delta f_c \approx 15$  кГц ( $f_c = 10$  МГц), а штрихпунктирной черной – минимально ожидаемое значение  $E_{\text{н}}$  для тех же значений  $\Delta f_c$  и  $f_c$ .

Из анализа графика следует, что в отсутствии случайных (преднамеренных) помех в ДКМ диапазоне, даже на радиотрассах с глобальной протяженностью может быть достигнута значительная скорость передачи информации. Так для трассы с  $r \approx 6$  тыс. км и мощности излучения сигнала  $P_c \approx 1$  кВт, исходя из соотношения [15], где  $V$  – скорость передачи,  $N_o$  – спектральная плотность шума:

$$V = \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{\Delta f_c N_o} \right)^{\Delta f_c}, \quad (4)$$

получим следующий диапазон возможных скоростей передачи для рассматриваемого случая:  $V_{\text{min-max}} \approx 10 \div 150$  кбит/с, что позволяет обеспечить доведение формуляра по коррекции программы миссии РТК в реальном масштабе времени.

Оперативность управления РТК по СДВ каналу существенно ниже. Например, даже при минимально ожидаемом уровне атмосферных помех (рис. 4, черная пунктирная линия) скорость передачи для достоверного доведения команды до РТК для  $r \approx 6$  тыс. км и  $P_c \approx 10$  кВт составит около  $V \approx 80 \div 90$  бит/с. Из анализа, проведенного в [16], а также приведенных формул и графиков видно, что достоверное доведение информации до удаленных РТК в СДВ диапазоне при скорости передачи до 10 бит/с ( $\Delta f_c \approx 10$  Гц) может быть обеспечено только при  $P_c \geq 100$  кВт, а в ДКМ даже при  $V \approx 300 \div 500$  бит/с потребуется  $P_c > 500$  Вт.

Таким образом, при использовании ДКМ РЛ обеспечивается возможность доведения информации до удаленных РТК при мощности излучения меньшей, чем при использовании СДВ радиолиний при этом реализуется более высокая скорость передачи. Однако, преимуществом СДВ РЛ является относительная стабильность РРВ при возмущениях ионосферы, а также существенно меньший коэффициент ослабления напряженности поля при распространении в водной среде, что позволяет обеспечивать прием информации при залипании антенны водой, а также в подледном и подводном положении (до  $15 \div 20$  м) в случае использовании плоскостных ферритов-

вых активных антенн. Исходя из этого, в качестве резервной связи целесообразно использовать передачу данных по СДВ и ДКМ радиолиниям, особенно в случае неполной информации о координатах и техническом состоянии РТК.

**4. Методы доведения информации до глубоководных объектов.** При нахождении РТК МБ в подводном положении на глубине более 15–20 м связь с ним без выпускного антенного устройства или буя-ретранслятора даже по СДВ радиоканалу, как было показано выше, не обеспечивается. В то же время, установка таких устройств на РТК МБ проблематична.

Для решения задачи по доведению информации до глубоководных объектов специалистами предлагается использование различных видов и методов связи, в том числе: оптической, гидроакустической, параметрической, электромагнитной связи, а также теневых методов приема гидроакустических волн.

*Каналы оптической (лазерной) связи.* Значительно меньшим коэффициентом затухания в водной среде, чем радиоволны СДВ диапазона, обладают волны оптического (сине-зеленый спектр) диапазона частот, что позволяет использовать лазерную связь (ЛС) в этом спектре для взаимодействия с подводными объектами при задействовании в группе БПКА или БПЛА-ретрансляторов, в том числе с использованием теневых приборов [17, 18]. Однако применение ЛС с глобально перемещающимися РТК технически и экономически на сегодня недостаточно оправдано. Это объясняется сравнительно большими габаритами входного модуля оптического приемника и необходимостью точной ориентации его диаграммы направленности (ДН) на источник лазерного излучения. В то же время, автономные малогабаритные навигационные устройства, предназначенные для определения координат РТК в процессе его подводного перемещения, не обеспечивают приемлемую точность определения местоположения в течение выполнения длительной миссии, вследствие чего подводному аппарату периодически необходимо осуществлять определение реальных координат путем всплытия и реализации взаимодействия с системой ГЛОНАСС (GPS).

Очевидно, что в этом случае обмен данными с базовой станцией может быть организован по основному (спутниковому) каналу обмена данными без задействования оптического канала связи. Кроме того, для надежной ЛС с использованием БПКА (БПЛА-ретрансляторов) при доведении информации до погруженных РТК необходимо выполнение ряда условий, таких как низкая мутность воды, высокая прозрачность льда, отсутствие экстремальных погодных условий (снегопад, «густой» туман, сильный дождь), что реально не может быть обеспечено при длительной миссии РТК.

*Канал гидроакустической связи.* Обмен данными с глубоководными (до 100 м и более) аппаратами при их удалении от надводного (подводного) пункта базирования на расстояние до 10 км обеспечивается, как правило, путем использования гидроакустической связи (ГАС). Для звуковых частот в диапазоне  $f_3 \approx 10 \div 50$  кГц (характерных для ГАС), в зависимости от солености, температуры воды и гидрологии морского района коэффициент ослабления гидроакустической волны  $\alpha$  составляет до 10 дБ/км и более. Поэтому на значительных удалениях от БПУ при организации подводной ГАС, ввиду ограниченной мощности гидроакустических излучателей на РТК, необходимо обеспечить кроме оптимальной сигнално-кодовой конструкции передаваемой информации, высокую чувствительность приемника акустического сигнала.

Необходимо отметить, что в современных и перспективных проектах РТК МБ для решения задачи по их взаимодействию с другими подводными аппаратами (буями-ретрансляторами) в состав интегрированной системы управления (ИСУ) подводного аппарата в обязательном порядке входит подсистема ГАС. Это обусловлено широким внедрением технологии цифровой обработки сигналов, позво-

лившей реализовать гидроакустические модемы, обеспечивающие функционирование при многолучевом распространении акустического сигнала и при воздействии помех от посторонних излучателей.

Гидроакустические приемные и передающие антенны обеспечиваются системой цифрового синтеза адаптивных ДН, а при формировании сигнально-кодовых конструкций передаваемого сообщения используются широкополосные сигналы и помехоустойчивые коды, что позволяет в реальных условиях достичь высоких скоростей передачи данных и требуемой вероятности доведения информации при значительных расстояниях между взаимодействующими объектами под водой [19]. Гидроакустические модемы предыдущего поколения (аналоговые) при тех же мощностях излучения на заданных дальностях до  $1,5 \div 2$  км и скоростях передачи  $200 \div 400$  бит/с, имеют в  $2 \div 4$  раза большие массогабариты.

##### 5. Управление миссией смешанных РТГ на глобальных расстояниях.

При оценке вероятности выполнения миссии, требующей глобального удаления РТГ от места базирования (т. е. многосуточного подводного похода), необходимо учесть возможность деградации основных элементов РТК, несовместимой с успешным завершением миссии, обусловленной параметрами надежности элементов аппарата, случайными его повреждениями, в том числе вследствие столкновений с крупными объектами или представителями морской фауны, айсбергами, рыболовными сетями и т. п., не исключая умышленных повреждений или уничтожения. Причем вероятность выполнения миссии  $P_{\text{вм}}$  будет уменьшаться в зависимости от увеличения количества всплытий для уточнения координат и проведения сеансов связи с БПУ. Отсюда с очевидностью следует необходимость реализации искусственного интеллекта в интегрированной системе управления РТК, позволяющей обеспечить оптимальную трассу перемещения, и её коррекцию в случае наличия незапланированных (случайных) препятствий или угроз. Тем не менее, вследствие указанных факторов при одиночном выполнении миссии, особенно конфиденциальной,  $P_{\text{вм}}$  может оказаться неприемлемо низкой. Вместе с тем, при групповом использовании РТК для достижения требуемого значения  $P_{\text{вм}}$  достаточно задействовать количество аппаратов  $N$ , определяемое из неравенства:  $N \geq \left\lceil \frac{\log(1 - P_{\text{вм}})}{\log(1 - P_1)} \right\rceil$ , где

$P_1$  – вероятность выполнения миссии одним РТК. То есть, даже при  $P_1 \approx 0,9$  для достижения  $P_{\text{вм}} \geq 0,999$  ориентировочно потребуются не более трех-четырёх идентично оснащенных и имеющих одинаковую целевую функцию РТК. При этом возможно два варианта их перемещения в заданный удаленный район мирового океана: I вариант – независимое прохождение маршрута каждым РТК; II вариант – групповое выполнение миссии с реализацией «интеллектуального» взаимодействия РТК в процессе совместного перехода в заданный район, в т.ч. и в других средах.

В ряде работ [2, 3, 7, 15] для обеспечения живучести подводных объектов (РТК, глайдеров и пр.) предлагается создавать сети подводной интегрированной связи (СПИС) с реализацией составного радио-гидроакустического канала в направлении пункт управления – подводный объект. Так предлагаемый АО «НИИ Гидросвязи «Штиль» вариант построения СПИС реализуется на базе нескольких автономных донных линий связи, каждая из которых состоит из промежуточных пунктов доступа и концевых гидроакустических модемов, объединенных оптоволоконной линией связи. Взаимодействие сети связи с БПУ осуществляется по радиоканалу через автономный гидроакустический буй-ретранслятор, входящий в её состав. Вместе с тем, при необходимости развёртывания такой СПИС в отдалённых районах ограничивающими факторами могут оказаться сложность, безопасность и стоимость её развёртывания, а также ограниченность дальности взаимодействия с РТК. Одним из решений при реализации миссии РТК по мониторингу удаленных районов мирового океана может служить

создание международной сети малогабаритных буев-ретрансляторов. Однако, решение этой задачи в ближайшее время маловероятно из-за экономических и военно-политических причин. Таким образом, целесообразно возложить функции обмена данными с БПУ на сами РТК.

Исходя из этого, в случае выполнения групповой миссии РТК по варианту I суммарное число взаимодействий с БПУ (количество всплытий) за время миссии составит  $M_I = N \cdot k$ , где  $k$  – число заданных сеансов связи с РТК, а по варианту II,  $M_{II} = k < M_I$ , что в ряде случаев, может оказаться определяющим фактором его использования. В соответствии с одним из возможных алгоритмов миссии РТК в составе  $N$  идентичных аппаратов, на начальном этапе назначается РТК-«Лидер» (РТК-Л), осуществляющий координацию функционирования остальных РТК. При этом программы текущих действий группы хранятся параллельно в базах данных каждого РТК и периодически взаимно обновляются по каналу ГАС.

РТК-Л при необходимости взаимодействия с БПУ или для уточнения координат группы реализует «назначение» буюм радио-гидро-ретранслятором одного РТК из группы по расписанию либо по оценке их основных параметров. Для проведения следующего сеанса связи, по ряду показателей ретранслятором может быть определен другой РТК (аналогично, по ряду показателей в процессе выполнения миссии автоматически может быть переназначен РТК-Л).

В зависимости от решаемых группировкой РТК задач, рельефа донной поверхности, наличия внешней угрозы и т. п. РТК-Л может также «принять» решение на реализацию максимального удаления от аппарата, выполняющего функцию буя-ретранслятора; при этом максимальное удаление от него до РТК-Л составит  $L_{\max} = (n-1) l_{\max}$ , где  $l_{\max}$  – максимальная дальность связи, реализуемая по каналу ГАС. То есть при заданном  $N$  для получения максимального значения  $L_{\max}$  требуется обеспечить возможно больший показатель для  $l_{\max}$ .

Для современных модемов заявляемая максимальная дальность гидроакустической связи составляет до 30 км [19]. Однако, в настоящее время к подсистеме ГАС, в значительной степени определяющей успешность выполняемых РТК специальных заданий, предъявляются более высокие требования по максимально достижимым значениям  $l_{\max}$ .

**6. Оценка максимальной дальности при обмене данными между РТК.** Для оценки энергетической дальности действия гидроакустической системы в различных режимах её функционирования (эхо-локации, шумопеленгования, телеметрии), как правило, используется общее уравнение, которое применительно к ГАС можно представить в виде [19, 20]

$$\frac{p_o^2 r_o^2 D_1^2(\varphi) D_2^2(\varphi)}{R^2} \cdot 10^{-0,1 \beta R} \cdot A_\Phi = h^2 p_n^2(f_{pч}, \Delta f_p), \quad (5)$$

где  $p_n(f_{pч}, \Delta f_p)$  – давление помехи в рабочей полосе частот  $\Delta f_p$ ;  $p_o$  – давление, развиваемое передающей антенной с излучаемой мощностью  $P_{изл}$  на условном расстоянии  $r_o$ ;  $D_1(\varphi)$  и  $D_2(\varphi)$  – характеристики направленности передающей и приемной антенн соответственно;  $p_o$  – давление, создаваемое источником излучения на удалении  $r_o$ ;  $h^2$  – отношение энергии сигнала к спектральной плотности помех;  $R$  – расстояние между гидроакустическими передатчиком и приемником;  $f_{pч}$  – рабочая частота передаваемого сигнала;  $\beta$  – пространственный коэффициент затухания звуковых волн в воде;  $A_\Phi = 10 \lg \Phi$  – фактор аномалии распространения звука, учитывающий фокусировку ( $\Phi < 1$ ) и дефокусировку ( $\Phi > 1$ ) акустического поля.



В [20] показано, что с учетом частотных зависимостей уровня шумов моря и затухания сигнала для трансцендентного уравнения (5) существует оптимальное значение рабочей частоты  $f_3$ , для которой при фиксированных параметрах гидроакустического тракта связи (передающий и приемный комплекты) обеспечивается максимальная дальность связи. Так для антенн плоскостного типа при спектральной плотности помех вида  $G(f) \sim f^{-n}$ , где  $n = 1 \div 2$ , значение оптимальной частоты составит:  $f_{\text{опт}} \approx n'R^{-2/3}10^3$  кГц, где  $n' \approx 1,9 \div 3$ , т. е. для  $R \approx 50 \div 100$  км значения оптимальной частоты будут находиться в диапазоне  $f_{\text{опт}} \approx 0,9 \div 2,2$  кГц. Близкие значения  $f_{\text{опт}}$  получаются и при использовании антенны линейного типа, для которых в этом случае габаритные размеры составят более  $1,5 \div 3$  м, что может создать значительные конструктивные трудности, а в ряде случаев и отказ от установки таких гидроакустических антенн на мало- и среднегабаритных РТК.

Переход на более высокие частоты излучения, в силу уменьшения габаритов антенных элементов, позволит устанавливать на РТК фазированные адаптивные решетки (ФАР), обеспечивающие подавление помех от посторонних излучателей (уменьшая значения  $p_n$ ) и увеличение коэффициента  $D_2(\varphi)$  в направлении на полезный сигнал, реализуя возможность увеличения дальности связи.

В предположении отсутствия (подавления) помех от посторонних излучателей проведем расчеты для минимальных (пунктирная линия на рис. 5) и максимальных значений (штрихпунктирная линия на рис. 5) шумов моря.

Учитывая разброс численных значений величин формулы (5), для наглядности соответствующих расчетов в графической форме, приведем её к виду:

$$lgh = lgp_0 + \lg D_1(\varphi) + \lg D_2(\varphi) + \frac{1}{2} \lg A_\Phi - \lg R - \frac{1}{20} \beta R - \lg p_n(f_{pч}, \Delta f_p). \quad (6)$$

На рис. 6 представлены результаты расчетов по формуле (6) значений  $lgh$  в зависимости от расстояния между АНПА для исходных данных:  $D_1(\varphi) = 1$ ,  $A_\Phi = 1$ ,  $\beta = 0,036 f_3^{3/2}$  дБ/км,  $\Delta f_p = 1$  Гц,  $P_{\text{изл}} = 100$  Вт,  $r_0 = 1$  м.  $p_n(f_{pч}, \Delta f_p)$  вычисляется в соответствии с графиками рис. 5, в предположении использования четырехэлементной адаптивной ФАР, реализованной на базе гидроакустической приемной антенны цилиндрического типа, обеспечивающей подавление помех от посторонних излучателей и формирование максимума ДН в направлении на полезный сигнал.

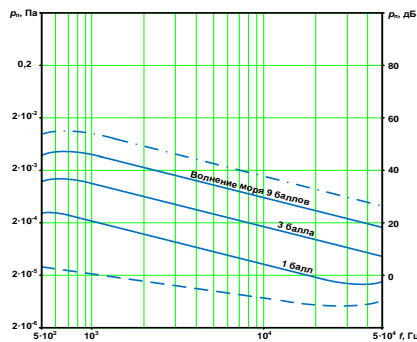


Рис. 5. Спектральные характеристики шумов моря

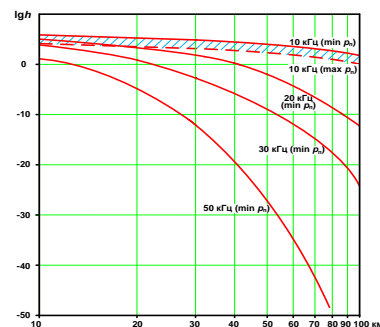


Рис. 6. Зависимость значений  $lgh$  от дальности взаимодействия между РТК в группе

Из анализа графиков следует, что на частотах свыше 10 кГц реализовать устойчивую связь при  $R \geq 100$  км достаточно проблематично, поскольку даже при передаче рассматриваемого узкополосного сигнала, с полосой  $\Delta f_p = 1$  Гц и  $f_p = 10$  кГц, в условиях наличия только естественных шумов моря значение отношения сигнал/шум будет находиться в пределах  $h \approx 0,06 \div 5$ , т.е. при реализации в гидроакустическом модеме некогерентного приема, удовлетворительная вероятность доведения информации может быть обеспечена только в условиях минимальной шумности моря (штрихпунктирная линия на рис. 6).

Для дальнейшего увеличения радиуса взаимодействия РТК в зависимости от миссий применимы поля буев-ретрансляторов и донных станций, рис. 7.

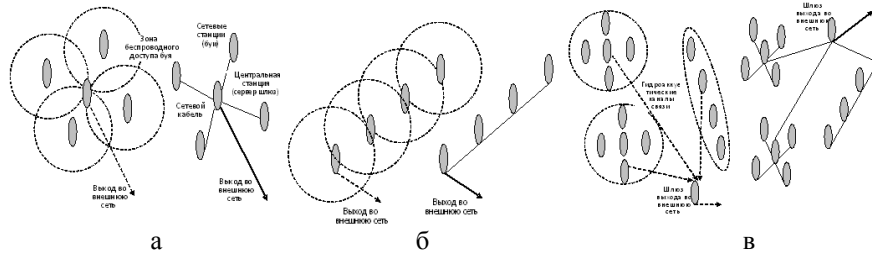


Рис. 7. Варианты топологии размещения поля буев при проведении миссии РТК:  
 а) централизованная топология сети (для применения на морских буровых платформах); б) многопроектная (для применения в морских проходах узостей и на протяженных объектах); в) распределенная (для портов, заливов, гаваней)

**Заключение.** На сегодня отсутствуют обоснованные варианты построения распределенных систем управления смешанными группами РТК, компоненты которых будучи рассредоточенными на борту БПКА (БПЛА), а также надводных и подводных РТК, сохраняют информационное взаимодействие, обеспечивая необходимый уровень координации управления всеми участниками смешанной РТГ. Причинами этого являются, как трудности в обеспечении устойчивости каналов управления и взаимодействия с робототехнической группировкой на границах физических сред, так и малые дальности в обеспечении ГАС.

Хотя расчеты в представленных материалах велись для «благоприятных» условий связи в предположении наличия минимального уровня шумов и подавления помех от посторонних излучателей, а также без учета возможного попадания принимающего информацию РТК в область «тени» (или значительного ослабления) гидроакустической волны, характерных как для приповерхностного так и для подводного и мелководного звуковых каналов [20], тем не менее, показано наличие принципиальных путей реализации взаимодействия РТК, удаленных друг от друга на расстояния свыше 50 км, особенно РТК с искусственным интеллектом, позволяющим учитывать гидрологию района выполнения миссии.

Дальнейшее увеличение дальностей обмена данными при взаимодействии глубоководных РТК на удаленностях 50÷100 км достигается подсистемой ГАС за счет снижения скорости передачи до 1 бит/с и менее при условии подавления помех от посторонних излучателей и автоматического учета эффекта Доплера. Повышение скорости передачи в этом случае может быть обеспечено путем применения гидроакустических модемов «параллельного типа». Глобальные дальности и распределенный характер динамики выполнения миссий смешанными группировками РТК может обеспечиваться за счет использования каналов спутниковой связи в качестве основных. При неполной информации о координатах группировки и техническом состоянии РТК, в качестве резервной связи целесообразно использовать передачу данных по радиолиниям СДВ и ДКМ диапазона частот на основе внедрения распределенных когнитивных радиосистем [16].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бочаров Л.* Необитаемые подводных аппараты: состояние и общие тенденции развития // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес.* – 2009. – № 7.
2. *Будко П.А., Чихачев А.В., Баринов М.А. и др.* Принципы организации и планирования сильносвязной телекоммуникационной среды сил специального назначения // *Т-Сомм – Телекоммуникации и транспорт.* – 2013. – № 6. – С. 8-12.
3. *Белусов И.* Современные и перспективные необитаемые подводные аппараты ВМС США // *Зарубежное военное обозрение.* – 2013. – № 5. – С. 79-88.
4. *Автономные подводные роботы. Системы и технологии / под ред. М.Д. Агеева.* – С.: Наука, 2005. – 398 с.
5. *Стопцов Н.А., Бойцов В.И., Шелемин В.Н.* Связь под водой. – Л.: Судостроение, 1990. – 248 с.
6. *Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В.* Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // *Подводные исследования и робототехника.* – 2013. – № 1 (15). – С. 4-16.
7. *Пишиханов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А. и др.* Системы управления автономного подводного аппарата // *Известия ЮФУ. Технические науки.* – 2014. – № 3 (152). – С. 87-101.
8. *Мартьянов Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.Л.* Система управления – наиболее сложная часть автономных необитаемых подводных аппаратов // *Морская радиоэлектроника.* – 2015. – № 4. – С. 27-33.
9. *Бычков И.В., Кензин М.Ю., Максимкин Н.Н., Киселев Л.В.* Эволюционные модели маршрутизации группового движения подводных роботов при многоцелевом динамическом мониторинге морских акваторий // *Подводные исследования и робототехника.* – 2014. – № 2. (18). – С. 4-13.
10. *Баканов Д.В., Мороз Н.В., Пухов Г.Г. и др.* Применение многофункциональной системы персональной спутниковой связи «Гонец-Д1М» для обеспечения информационного взаимодействия между удаленными абонентами // *Техника средств связи.* – 2014. – Вып. 3 (142). – С. 63-67.
11. МСЭ-R P. 372-10.
12. *Долуханов М.П.* Распространение радиоволн. – М.: Связь, 1972. – 336 с.
13. *Неволин Т.Н., Щепотин В.И.* Организация и планирование радиосвязи на морском флоте. – М.: Транспорт, 1977. – 262 с.
14. *Акулов В.С., Салюк Д.В., Узрик Л.Н.* Учет точности прогнозирования электромагнитных полей при расчете радиотехнических систем // *Техника средств связи.* – 2014. – Вып. 3 (142). – С. 53-56.
15. *Финк Л.М.* Теория передачи дискретных сообщений. – М.: Сов.радио, 1970. – 728 с.
16. *Николашин Ю.Л., Мирошников В.И., Будко П.А., Жуков Г.А.* Когнитивная система связи и влияние использования данных мониторинга на помехоустойчивость сверхзвукосредных декаметровых радиолоний // *Морская радиоэлектроника.* – 2015. – № 2 (52). – С. 16-22.
17. *Алешин О.В., Катанович А.А.* Принципы построения автоматизированных систем спутниковой открытой оптической связи с подводными лодками // *Морская радиоэлектроника.* – 2016. – № 1. – С. 32-35.
18. *Яковлев В.А., Журенков А.Г., Шульженко П.К. и др.* Оптико-акустическое устройство наведения для системы подводной бес-проводной оптической связи // *Оптический журнал.* – 2012. – Т. 79, № 10. – С. 91-92.
19. *Вершинин А.С.* Сравнительный анализ гидроакустических модемов // *Молодой ученый.* – 2015. – № 12. – С. 156-161.
20. *Свердлов Г.М.* Прикладная гидроакустика: учеб. пособие. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.

## REFERENCES

1. *Bocharov L.* Neobitaemye podvodnykh apparaty: sostoyanie i obshchie tendentsii razvitiya [Unmanned underwater vehicles: current status and General trends of development], *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2009, No. 7.
2. *Budko P.A., Chikhachev A.V., Barinov M.A. i dr.* Printsipy organizatsii i planirovaniya sil'nosvyaznoy telekommunikatsionnoy sredy sil spetsial'nogo naznacheniya [The principles of organization and planning, full-chaining the telecommunications environment of the special forces], *T-Somm – Telekommunikatsii i transport* [T-Somme – telecommunications and transport], 2013, No. 6, pp. 8-12.

3. Sovremennyye i perspektivnyye neobitaemye podvodnyye apparaty VMS SShA [Modern and perspective unmanned underwater vehicles, the US Navy], *Zarubezhnoe voennoe obozrenie* [Foreign military review], 2013, No. 5, pp. 79-88.
4. Avtonomnyye podvodnyye roboty. Sistemy i tekhnologii [Systems and technology], ed. by M.D. Ageeva. S.: Nauka, 2005, 398 p.
5. *Stoptsov N.A., Boytsov V.I., Shelemin V.N.* Svyaz' pod vodoy [Communication under water]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 248 p.
6. *Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitskiy A.V.* Planirovanie i osushchestvlenie deystviy obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of actions inspection of an underwater robot on the basis of behavioral methods], *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2013, No. 1 (15), pp. 4-16.
7. *Pshikhanov V.Kh., Chernukhin Yu.V., Fedotov A.A. i dr.* Sistemy upravleniya avtonomnogo podvodnogo apparata [Of control system of Autonomous underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, № 3 (152), pp. 87-101.
8. *Martynov L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.L.* Sistema upravleniya – naibolee slozhnaya chast' avtonomnykh neobitaemykh podvodnykh apparatov [Control system – the most difficult part of Autonomous unmanned underwater vehicles], *Morskaya radioelektronika* [Marine electronics], 2015, No. 4, pp. 27-33.
9. *Bychkov I.V., Kenzin M.Yu., Maksimkin N.N., Kiselev L.V.* Evolyutsionnyye modeli marshrutizatsii gruppovogo dvizheniya podvodnykh robotov pri mnogotselevom dinamicheskom monitoringe morskikh akvatoriy [Evolutionary models of routing group motion underwater robots with dynamic multi-purpose Maritime monitoring], *Podvodnyye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater researches and robotics], 2014, No. 2. (18), pp. 4-13.
10. *Bakanov D.V., Moroz N.V., Pukhov G.G. i dr.* Primenenie mnogofunktsional'noy sistemy personal'noy sputnikovoy svyazi «Gonets-D1M» dlya obespecheniya informatsionnogo vzaimodeystviya mezhdudalennymi abonentami [Application многофункциональной of a personal satellite communication system "Gonets-D1M" to ensure communication between remote subscribers], *Tekhnika sredstv svyazi* [Technique of communication], 2014, Issue 3 (142), pp. 63-67.
11. МСЭ-R P. 372-10.
12. *Dolukhanov M.P.* Rasprostranenie radiovoln [The propagation of radio waves]. Moscow: Svyaz', 1972, 336 p.
13. *Nevolin T.N., Shchepotin V.I.* Organizatsiya i planirovanie radiosvyazi na morskoy flote [Organization and planning of radio communication on the Navy]. Moscow: Transport, 1977, 262 p.
14. *Akulov V.S., Salyuk D.V., Ugrik L.N.* Uchet tochnosti prognozirovaniya elektromagnitnykh poley pri raschete radiotekhnicheskikh sistem [Taking into account the accuracy of the prediction of electromagnetic fields in the calculation of radio systems], *Tekhnika sredstv svyazi* [Technique of communication], 2014, Issue 3 (142), pp. 53-56.
15. *Fink L.M.* Teoriya peredachi diskretnykh soobshcheniy [The theory of transmission of discrete messages]. Moscow: Sov.radio, 1970, 728 p.
16. *Nikolashin Yu.L., Miroshnikov V.I., Budko P.A., Zhukov G.A.* Kognitivnaya sistema svyazi i vliyanie ispol'zovaniya dannykh monitoringa na pomekhoustoychivost' sverkhuzkopolosnykh dekametrovykh radioliny [Cognitive communication system and influence the use of monitoring data on the noise immunity sverhskorostey decameter radio links], *Morskaya radioelektronika* [Marine electronics], 2015, No. 2 (52), pp. 16-22.
17. *Aleshin O.V., Katanovich A.A.* Printsipy postroeniya avtomatizirovannykh sistem sputnikovoy otkrytoy opticheskoy svyazi s podvodnymi lodkami [Principles of construction of automated systems for open optical communication with submarines], *Morskaya radioelektronika* [Marine electronics], 2016, No. 1, pp. 32-35.
18. *Yakovlev V.A., Zhurenkov A.G., Shul'zhenko P.K. i dr.* Optiko-akusticheskoe ustroystvo navedeniya dlya sistemy podvodnoy besprovodnoy opticheskoy svyazi [Opto-acoustic device guidance system for underwater wireless optical communication], *Opticheskiy zhurnal* [journal of Optical], 2012, Vol. 79, No. 10, pp. 91-92.
19. *Vershinin A.S.* Sravnitel'nyy analiz gidroakusticheskikh modemov [Comparative analysis of hydroacoustic modems], *Molodoy uchenyy* [Young scientist], 2015, No. 12, pp. 156-161.
20. *Sverdlin G.M.* Prikladnaya gidroakustika: ucheb. posobie [Applied underwater acoustics: a tutorial]. Leningrad: Sudostroenie, 1990, 320.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н. С.С. Семёнов.

**Будко Павел Александрович** – Военная академия связи им. Маршала Советского Союза С.М. Буденного; e-mail: budko62@mail.ru; 194064, Санкт-Петербург, пр-т Тихорецкий, 3; тел.: 89110109264; д.т.н.; профессор.

**Винограденко Алексей Михайлович** – e-mail: vinogradenko.a@inbox.ru; тел.: 89818339231; к.т.н.; доцент.

**Литвинов Александр Игоревич** – e-mail: litvinovaleks@mail.ru; тел.: 89111317379; к.т.н.; зам. начальника отдела научной работы и подготовки научно-педагогических кадров.

**Budko Pavel Aleksandrovich** – Military academy of communication of Marshall of the Soviet Union S.M. Budenny; e-mail: budko62@mail.ru; 194064, St. Petersburg, Tikhoretsky Ave, 3; phone: +79110109264; dr. of eng. sc.; professor.

**Vinogradenko Alexey Mikhaylovich** – e-mail: vinogradenko.a@inbox.ru; phone: +79818339231; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Litvinov Alexander Igorevich** – e-mail: litvinovaleks@mail.ru; phone: +79111317379; cand. of eng. sc.; head of scientific work and training of research and educational personnel.

УДК 623.746.-519 + 623.746.174

DOI 10.18522/2311-3103-2017-1-279293

**В.А. Бондаренко, Г.Э. Каплинский, С.Н. Крюков, В.А. Павлова, В.А. Тупиков, П.К. Шульженко**

**АЛГОРИТМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВЫБОРА УЧАСТКОВ  
МЕСТНОСТИ В КАЧЕСТВЕ ПОСАДОЧНЫХ ПЛОЩАДОК,  
И ОСУЩЕСТВЛЕНИЯ ПОСАДКИ ПИЛОТИРУЕМЫХ И БЕСПИЛОТНЫХ  
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ПО ДАННЫМ БОРТОВОЙ  
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОЙ СИСТЕМЫ**

*Рассмотрена задача автоматизации выбора посадочных площадок, подходящих для безопасной посадки пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов. В первой части статьи представлены метод и алгоритм выбора посадочных площадок, основанные на объединении результатов двухэтапного анализа изображений местности, полученных с бортовой оптической системы. Первый этап алгоритма заключается в построении карты высот местности по набору изображений, получаемых бортовой оптической системой, с использованием стереоскопического эффекта в процессе прямолинейного движения носителя. Приводятся теоретическое обоснование используемого подхода к построению карты высот местности и результаты успешного применения соответствующего алгоритма к реальным изображениям местности. На втором этапе алгоритма выбора посадочных площадок производится текстурный анализ изображения данного участка местности с помощью искусственной нейронной сети встречного распространения. В статье дано краткое описание архитектуры используемой для текстурного анализа искусственной нейронной сети, и приведены результаты текстурного анализа изображения участка местности. Во второй части статьи рассматриваются алгоритм поиска и распознавания искусственно созданного ориентира на изображениях, полученных бортовой оптической системой летательного аппарата, и алгоритм автоматической посадки на ориентир. В результате проведённого исследования авторами была разработана технология создания системы технического зрения, решающей задачи автоматического выбора посадочных площадок для посадки летательного аппарата в незнакомой местности, относительно трёхмерного позиционирования ЛА по изображениям искусственно созданного ориентира и автоматической посадки ЛА на искусственно созданный ориентир. На базе беспилотного летательного аппарата вертолётного типа разработана и представлена летающая лаборатория, снабжённая оптико-электронной системой и системой беспроводной связи, реализующая алгоритм автоматического поиска и распознавания искусственно созданного ориентира на изображениях, получаемых бортовой оптической системой БЛА, и алгоритм автомати-*