

Автоматизация движения противоминного телеуправляемого подводного аппарата

© С.А. Егоров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрен подход к построению системы управления движением противоминного телеуправляемого подводного аппарата, основанный на выделении отдельных режимов работы данной системы и позволяющий автоматизировать схему проведения противоминных действий.

Ключевые слова: телеуправляемый подводный аппарат, противоминные действия, метод наведения, система управления, информационно-измерительный комплекс.

Технология проведения противоминных действий с использованием телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) проиллюстрирована на рис. 1.

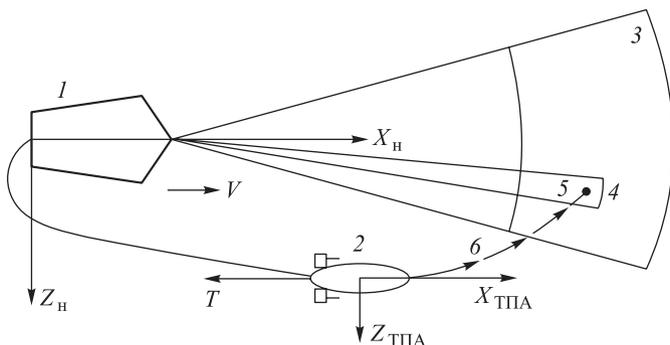


Рис. 1. Схема выполнения противоминных действий с использованием ТПА (горизонтальная плоскость)

Базовое судно (тральщик) 1 и ТПА 2 в режиме совместного движения синхронно перемещаются со скоростью V по обследуемой акватории. Относительно тральщика ТПА находится впереди по курсу судна в точке с заданными координатами (система координат $X_H Z_H$). При обнаружении корабельной гидроакустической станцией миноискания (ГАСМ) объекта 5 (объект попал в поле зрения сектора 3 тракта обнаружения ГАСМ) и его классификации как миноподобного (сектор 4 тракта классификации) ТПА направляется к объекту (траектория 6) и с помощью собственных гидроакустических и телевизионных средств проводит допоиск и идентификацию объекта. Если объект оказался

миной, он уничтожается средствами ТПА и тральщика. После этого, а также в случае ложной цели, система судно—ТПА продолжает совместное движение, выполняя поиск следующего миноподобного объекта. Данная схема проведения работ может иметь частные случаи. Например, одним из частных случаев является схема, когда в процессе поиска миноподобных объектов корабельной ГАСМ ТПА находится на судне. При нахождении объекта тральщик стопорит ход, переходит в режим динамического позиционирования и далее осуществляется спуск ТПА. Другой частный случай — вариант использования ТПА в качестве носителя гидроакустических средств поиска и классификации объектов (ГАСМ). В данном случае ТПА, находясь в режиме совместного движения впереди по курсу судна, выполняет все операции по обнаружению и при наличии на его борту соответствующих средств уничтожению объектов.

В качестве примеров противоминных ТПА можно привести такие аппараты, как PAP-104, Double Eagle и др. Следует отметить, что в доступных источниках практически отсутствует информация о функциональности и особенностях работы систем управления (СУ) противоминных ТПА.

Далее предлагается подход к построению СУ ТПА, позволяющей реализовать описанную схему действий.

Обобщенная структурная схема СУ показана на рис. 2.

Режимы работы и алгоритмы СУ требуют определенного набора измерений параметров движения аппарата, формируемых ИИК. В соответствии с работой [1] в состав ИИК противоминного ТПА целесообразно включать следующий состав измерителей:

- бесплатформенная система ориентации (БСО) на базе инерциального измерительного модуля (три датчика угловых скоростей, три ли-

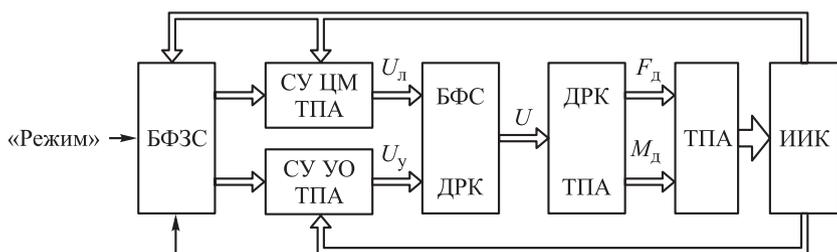


Рис. 2. Обобщенная структурная схема СУ движением ТПА:

БФЗС — блок формирования задающих сигналов на контуры СУ угловой ориентацией (СУ УО) и положением центра масс (СУ ЦМ) ТПА; **ДРК ТПА** — движительно-рулевой комплекс ТПА; **БФС ДРК** — блок формирования сигналов на ДРК; **ИИК** — информационно-измерительный комплекс; F_d и M_d — силы тяги и момента ДРК ТПА, U — напряжение на ДРК ТПА

нейных акселерометра) и трехосного магнитометра, используемого для реализации в БСО режима измерения гироманнитного курса;

- датчики глубины и отстояния ТПА от дна (эхолот);
- система видеостабилизации (СВС), обеспечивающая высокоточное измерение по сигналам штатной телекамеры ТПА, нормированных на величину отстояния аппарата от дна приращений координат аппарата вдоль осей связанной с ним системы координат $X_{\text{ТПА}}Z_{\text{ТПА}}$ (см. рис. 1, маршевая и лаговая координаты);

- гидроакустическая навигационная система (ГАНС) с ультракороткой базой, приемная антенна которой размещена на судне, а маяк-ответчик — на ТПА, позволяющая определить координаты аппарата относительно судна;

- гидроакустический доплеровский лаг (ГДЛ), измеряющий маршевую и лаговую скорости ТПА относительно дна или воды.

Дополнительно в ИИК необходимо вводить данные с навигационного комплекса судна — курс, дифферент, крен, географические широту и долготу судна.

В зависимости от режима работы СУ в ее алгоритмах используют измерения параметров движения ТПА, сформированные необходимой комбинацией измерителей с соответствующими алгоритмами совместной обработки (комплексирование).

В СУ УО входят контуры управления углами курса, дифферента, крена ТПА, в СУ ЦМ — контур управления вертикальной координатой (глубина, отстояние от дна), маршевый и лаговый контуры. В качестве основных приемов следующие режимы работы СУ:

- от выносного пульта управления (режим ВПУ), позволяющий реализовать движение ТПА только с ВПУ путем прямой подачи сигналов от задающих органов ВПУ на приводы движителей ТПА. Все контуры управления движением работают в разомкнутом режиме. Данный режим используется при выполнении спуско-подъемных операций;

- ручной, позволяющий реализовать движение ТПА со штатного пульта управления путем прямой подачи сигналов от задающих органов пульта на приводы движителей аппарата. Все контуры управления движением работают в разомкнутом режиме. Данный режим используется при возникновении аварийных ситуаций;

- автоматизированный, позволяющий реализовать движение ТПА в толще воды или при работе у дна путем управления скоростью ТПА относительно воды вдоль осей $X_{\text{ТПА}}, Z_{\text{ТПА}}$ связанной с аппаратом системы координат, глубиной погружения или отстоянием ТПА от дна, курсом, дифферентом и креном. Контуры маршевой и лаговой скоростей работают в разомкнутом режиме, контур глубины (отстояния от дна), контуры управления углами ориентации — в замкнутом. Данный режим является основным режимом управления ТПА вблизи судна, объекта

работ (мина), а также в моменты анализа ситуации о дальнейших действиях (анализ гидроакустических картин с гидролокатора ТПА и т.д.);

- динамическое позиционирование ТПА, осуществляемое по данным СВС или ГДЛ путем выдачи оператором соответствующей команды с пульта управления ТПА. При этом проводится стабилизация нулевых значений координат $X_{\text{ТПА}}$, $Z_{\text{ТПА}}$ в связанной с аппаратом системе координат на момент введения данного режима и текущих на момент введения режима значений глубины погружения или отстояния ТПА от дна, углов курса, дифферента, крена аппарата. В данном режиме также реализуется управление смещениями ТПА относительно исходной точки позиционирования. Все контуры СУ работают в замкнутом режиме — позиционные маршевый и лаговый контуры, контур глубины (отстояния от дна), контуры управления углами ориентации ТПА. Режим используется при управлении ТПА вблизи объекта работ как непосредственно у дна (по СВС и ГДЛ), так и в толще воды (по ГДЛ);

- автоматический (программный), позволяющий реализовать движение ТПА в автоматическом режиме путем задания соответствующей программы движения. В отличие от предыдущих режимов в нем непосредственное участие оператора в управлении аппаратом существенно меньше. В качестве основных примем следующие программы движения:

а) «Совместное движение» — осуществляет автоматический вывод ТПА в заданную относительно судна точку и удержание в ней при последующем движении системы судно — ТПА;

б) «Выход в точку» — осуществляет автоматический вывод ТПА в зону цели (точки), заданной в неподвижной относительно земли системе координат;

в) «Выход по траектории» — осуществляет автоматический вывод ТПА в зону цели по требуемой траектории, заданной в неподвижной относительно земли системе координат.

Автоматический режим является наиболее сложным и комплексным. Далее будут раскрыты особенности его реализации. Движение ТПА рассматривается в горизонтальной плоскости, поскольку принимается, что в процессе отработки программ углы дифферента и крена аппарата стабилизируются СУ УО в окрестности нуля.

Программа «Совместное движение». Реализация данной программы аналогична описанному в [2] подходу к наведению на точку. При организации движения ТПА в окрестность заданной относительно судна точки движение к ней будем проводить в двух режимах: режим 1 (наведение) — до входа ТПА в зону с радиусом R_{\min} вокруг заданной точки управление осуществляется курсом и маршевой скоростью ТПА, при этом контур лага СУ отключен; режим 2 (стабилизация) — после входа ТПА в зону с радиусом R_{\min} стабилизируется курс аппарата, имев-

ший место на момент входа в зону, а обработка рассогласований по координатам осуществляется маршевым и лаговым контурами. Для исключения автоколебательных переключений режимов СУ на границе зоны переключения дополнительно вводится зона с радиусом $R_{\max} > R_{\min}$. При воздействии на ТПА возмущающих факторов (течение) и работе СУ в режиме 2 возможен снос аппарата от заданной точки. При сносе ТПА за пределы зоны с радиусом R_{\max} снова включается режим 1 до входа аппарата в зону с радиусом R_{\min} .

Наиболее просто режим 1 реализуется на основе классического метода наведения — метода погони [3], в котором продольная ось ТПА в каждый момент времени направляется на заданную движущуюся точку в системе координат судна. При формировании ошибки в контуре курса реализуется алгоритм, обеспечивающий разворот ТПА на заданный курс по кратчайшему угловому расстоянию. Контур марша разомкнут, сигнал на маршевые движители максимален, а знак сигнала определяется косинусом от сигнала ошибки в контуре курса, что позволяет уменьшить радиус циркуляции ТПА. Лаговый движитель в режиме 1 не используется.

В режиме 2 формируются позиционные ошибки в системе координат судна, которые далее перепроектируются на контуры марша и лага ТПА.

В части ИИК для реализации программы показания ГАНС и гидроакустического лага перепроектируются в горизонтную систему координат, связанную с судном и ориентированную по курсу судна (ее оси $X_n Z_n$ показаны на рис. 1). В результате комплексирования их измерений (с учетом скорости движения судна) определяют координаты и скорости ТПА относительно судна, используемые в СУ.

Программа «Выход в точку». Координаты точки (цели) задаются в неподвижной относительно земли системе координат (местной географической), связанной с некоторой точкой (репер). Движение ТПА к заданной точке реализуется аналогично предыдущей программе. В режиме 1 при входе аппарата в зону с радиусом R_{\min} вокруг заданной точки включается режим 2, в котором стабилизируется курс и координаты аппарата, имевшие место на момент входа в зону с радиусом R_{\min} . В случае сноса ТПА за пределы зоны с радиусом $R_{\max} > R_{\min}$ снова включается режим 1 до входа аппарата в зону с радиусом R_{\min} .

В части ИИК показания ГАНС и гидроакустического лага перепроектируются в местную географическую систему координат, причем координаты ТПА относительно репера рассчитываются по данным ГАНС с учетом координат судна относительно репера. Используемые в СУ координаты и скорости ТПА в неподвижной системе координат определяют путем комплексирования пересчитанных координат ТПА и его скоростей по данным ГДЛ.

Программа «Выход по траектории». С учетом знаний об акватории в районе противоминных действий задается траектория движения ТПА к цели в виде набора опорных точек. Координаты точек задают в связанной с неподвижным репером местной географической системе координат.

Движение ТПА по траектории, заданной набором точек от 1 до N , предлагается организовать следующим образом:

- режим 1 (наведение): до входа ТПА в зону с радиусом R_i вокруг заданной i -й точки траектории ($i = 1, \dots, N$) управление осуществляется курсом и маршевой скоростью ТПА, при этом контур лага СУ отключен;
- при входе ТПА в зону с радиусом R_i i -й точки траектории, когда $i < N$, происходит переключение управления: в контуры СУ поступают координаты следующей точки и ТПА продолжает движение в режиме 1;
- после входа ТПА в зону с радиусом $R_{N\min}$ N -й точки траектории управление аппаратом полностью аналогично описанному выше для программы «Выход в точку».

Работоспособность рассмотренных программ исследована моделированием в пакете прикладных программ Matlab/Simulink, в программном комплексе тренажёра ТПА [4] с использованием математической модели системы базовое судно — кабель — ТПА, моделей СУ и ИИК ТПА. Исследования проводились при наличии возмущающих факторов и неидеальностей: течение, медленноменяющееся смещение нуля в модели ГДЛ, запаздывание, дискретизация по времени, флюктуирующая погрешность в модели ГАНС. Используемые в ИИК алгоритмы комплексирования оценивали координаты и скорости ТПА в соответствующей системе координат и компенсировали медленноменяющуюся погрешность лага.

В качестве примера реализации программы «Совместное движение» на рис. 3 представлены траектории движения судна и ТПА в режиме совместного движения при воздействии на ТПА бокового течения (0,9 м/с, направлено вправо).

Результаты работы программы «Выход в точку» приведены на рис. 4, 5. Заданная точка (кружок с перекрестьем) находится в центре окружности радиуса R_{\min} . На рис. 4 показан вид траектории ТПА с учетом его разворота на заданный угол курса по кратчайшему пути при отсутствии течения. На рис. 5 приведены траектории ТПА при наличии течения (1 м/с) и смене его направления. Исходно ТПА вышел в зону заданной точки и удерживался в ней с течением, направленным влево. Далее имитировалась смена направления течения (новое направление показано стрелкой в левом нижнем углу рисунка). При этом ТПА был снесен за зону радиуса R_{\max} . Далее программа вернула и удерживала аппарат в заданной зоне.

В качестве примера реализации программы «Выход по траектории» приведем задачу организации движения ТПА в конечную точку в обход

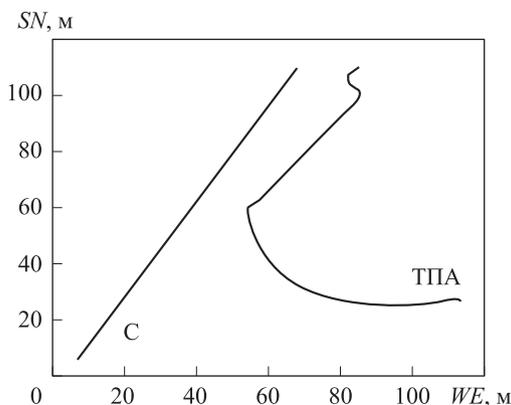


Рис. 3. Траектории судна (С) и ТПА в режиме совместного движения при воздействии на ТПА бокового течения (SN , WE — направления осей Юг—Север, Запад—Восток)

опасной зоны, заданной в виде окружности в плоскости горизонта. Вокруг опасной зоны от начальной точки к конечной проложена расчётная траектория, задаваемая пятью точками. На рис. 6, 7 представлены траектории движения ТПА, начиная с точки 1 с координатами (0; 0), при отсутствии течения, упрощённой (идеальной) и полнофункциональной реализации ИИК (см. рис. 6), а также при отсутствии и наличии течения (боковое, направлено вправо) и флюктуирующей погрешности ГАНС (см. рис. 7).

Результаты исследований работы программ позволяют сделать следующие выводы:

- предложенный алгоритм реализации движения ТПА в заданную точку (режимы 1, 2) обеспечивает вывод и стабилизацию аппарата в окрестности заданной точки в широком диапазоне значений скоростей совместного движения и скоростей течения;

- из-за ограничения силы тяги лагового движителя ТПА при наличии достаточно сильного бокового течения имеет место периодическое переключение режимов наведения и стабилизации аппарата в окрестности заданной точки или конечной точки траектории (см. рис. 3, 5, 7). В ходе этого переключения СУ стремится установить ТПА против течения, а в случае совместного движения — с дополнительным сохранением скорости движения. Такая особенность алгоритма позволяет максимально использовать силу тяги маршевых движителей для удержания ТПА в окрестности заданной точки при достаточно сильном течении;

- при отсутствии течения реальные кривые движения ТПА между точками траектории близки к прямолинейным отрезкам, соединяющим эти точки. При наличии течения из-за особенности алгоритма наведения режима 1 имеют место отклонения реальной траектории от расчётной между точками траектории, что может привести к заходу ТПА в опасную зону. Во избежание этого расчётную траекторию следует

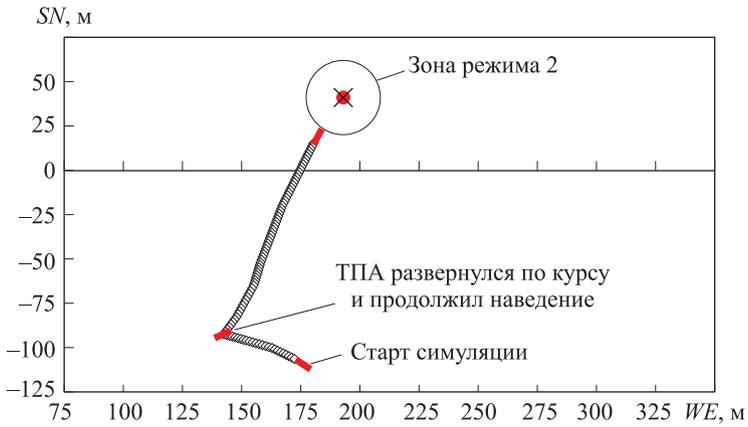


Рис. 4. Траектория ТПА при работе программы «Выход в точку» и отсутствии течения

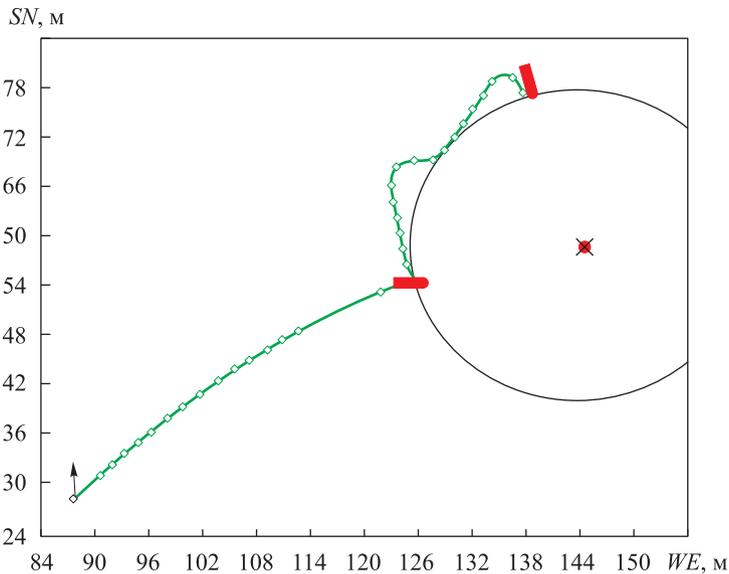


Рис. 5. Траектории ТПА при работе программы «Выход в точку», наличии течения и смене его направления

задавать на некотором удалении от опасной зоны, гарантирующем безопасное движение ТПА при течении различной силы и направления;

- флюктуирующая погрешность в канале ГАНС, частично отфильтрованная в комплексном ИИК, проходит на выход СУ. Однако амплитуда колебаний на выходе СУ значительно меньше, чем в сигнале ГАНС и они не оказывают существенного влияния на работоспособность системы управления.

Представленный выше подход к организации функционирования СУ противоминного ТПА с выделением отдельных режимов работы

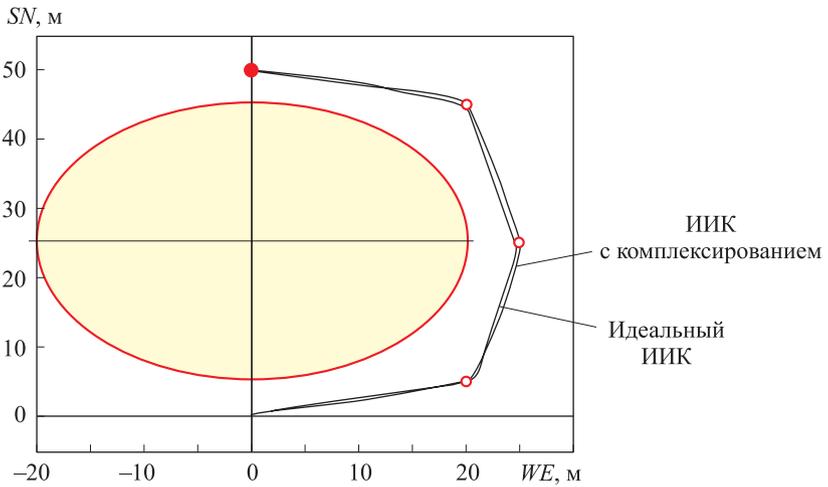


Рис. 6. Движение ТПА по точкам траектории при отсутствии течения, с идеальным и комплексным ИИК

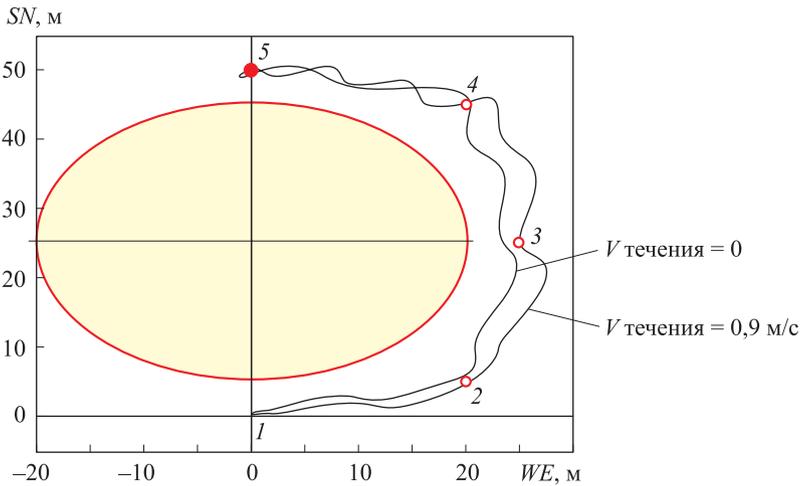


Рис. 7. Движение ТПА по точкам траектории при наличии течения и флуктуирующей погрешности ГАНС

системы и их целенаправленным запуском оператором аппарата позволяет автоматизировать схему проведения противоминных действий, существенно упростить управление движением аппарата и уменьшить вовлеченность в него оператора ТПА.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Егоров С.А., Куценко А.С., Вельтищев Вад. В. Особенности создания систем управления противоминных телеуправляемых подводных аппаратов. *Мат. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана»*. Владивосток, 2011, с. 55–60.
- [2] Куценко А.С., Егоров С.А. Организация движения телеуправляемого подводного аппарата по заданной траектории. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2012, спец. вып. «Специальная робототехника и мехатроника», с. 51–56.
- [3] Куркоткин В.И., Стерлигов В.Л. *Самонаведение ракет*. Москва, Воениздат МО СССР, 1963, 92 с.
- [4] Вельтищев Вит. В., Егоров С.А., Куценко А.С., Вельтищев Вад. В. Компьютерный тренажер для подготовки операторов противоминного телеуправляемого подводного комплекса. *Мат. 4-й Всерос. науч.-техн. конф. «Технические проблемы освоения мирового океана»*. Владивосток, 2011, с. 123–127.

Статья поступила в редакцию 21.05.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

С.А. Егоров. Автоматизация движения противоминного телеуправляемого подводного аппарата. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 3. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/robot/635.html>

Егоров Сергей Александрович родился в 1970 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 1994 г. Канд. техн. наук, зав. сектором НИИСМ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 60 научных работ в области подводной робототехники. e-mail: sa_egorov@mail.ru