

А. С. Куценко, С. А. Егоров

**ОРГАНИЗАЦИЯ ДВИЖЕНИЯ
ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО ПОДВОДНОГО
АППАРАТА ПО ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ**

Приведены результаты разработки алгоритмов автоматического режима движения телеуправляемого подводного аппарата по траектории, заданной относительно неподвижного репера. Траектория задана набором точек, и организовано последовательное движение аппарата от точки к точке с выходом в конечную точку и удержанием аппарата в ее окрестности. Исследовано движение аппарата в плоскости горизонта при разных возмущающих факторах и неидеальностях навигационной системы аппарата.

E-mail: saiclex@mail.ru, sa_egorov@mail.ru

Ключевые слова: телеуправляемый подводный аппарат, алгоритм наведения.

Эффективность и безопасность решения ряда задач с помощью телеуправляемого подводного аппарата (ТПА) повышаются при реализации автоматического движения аппарата по заданной траектории. При формировании траектории учитываются параметры опасных зон (ОЗ), в которые ТПА не должен попадать.

Далее рассматриваются два алгоритма движения ТПА по заданной траектории при следующих условиях и допущениях:

— в качестве навигационной системы, определяющей декартовы координаты ТПА относительно неподвижного репера (X — направление на север, Y — вертикально вверх, Z — на восток), используется гидроакустическая навигационная система (ГАНС) с короткой базой или ультракороткой базой и гидроакустический лаг, измеряющий линейные скорости перемещения ТПА относительно дна;

— параметры заданной опорной траектории для ТПА задаются в виде точек с координатами X_{Bi} , Z_{Bi} , где i — номер опорной точки, изменяющийся в пределах $1 \dots N$ (N — заданное число опорных точек). Предполагается, что необходимо удержание ТПА в окрестности последней точки с координатами X_{BN} , Z_{BN} . Допустимые зоны нахождения ТПА вокруг опорных точек задаются радиусом R_{\min} . При выходе ТПА в зону i -й точки с радиусом R_{\min} считаем, что ТПА вышел в окрестность данной точки B_i ;

— параметры ОЗ задаются в виде точек S_k с координатами X_{S_k} , Z_{S_k} и радиусом R_{Ozk} для каждой ОЗ, где k — номер ОЗ, изменяющийся в пределах $1 \dots M$. Предполагается, что недопустимо нахождение ТПА в любой ОЗ. При попадании ТПА в зону S_k -й точки с радиусом R_{Ozk} считаем, что ТПА должен выйти из данной зоны. Для всех ОЗ параметр b задает направление обхода ОЗ — по часовой стрелке при $b = 1$

или против часовой стрелки при $b = -1$. Если данный параметр не задан ($b = 0$), то направление обхода должно выбираться автоматически по кратчайшему пути обхода ОЗ до текущей опорной точки;

- движение ТПА в вертикальной плоскости не рассматривается;
- углы дифферента и крена ТПА в процессе движения малы и рассматривается движение ТПА только в горизонтальной плоскости;
- в системе управления (СУ) ТПА отсутствуют внешние данные о направлении течения и его скорости.

Для организации движения ТПА разработаны кинематические алгоритмы, которые формируют задающие воздействия на контуры СУ ТПА в плоскости горизонта, управляя движением аппарата по маршруту, лагу и курсу. В основу алгоритмов положен следующий набор элементарных движений:

- наведение ТПА на точку в плоскости горизонта;
- стабилизация ТПА в окрестности последней точки траектории;
- обход ОЗ.

Первый алгоритм осуществляет последовательное движение ТПА от первой точки траектории к следующей, пока ТПА не выйдет в последнюю точку траектории, а затем реализует удержание в окрестности последней точки траектории. Поскольку максимальная маршевая скорость ТПА обычно в несколько раз выше лаговой, то при больших рассогласованиях по координатам движение к заданной точке целесообразно 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 R_{\min} стабилизируется курс аппарата, имевший место в момент входа в зону, а отработка 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 R_{\max} снова включается режим 1 до входа аппарата в зону R_{\min} [1].

В основу режима 1 положен классический метод наведения — метод прямого преследования (погони) [2], в котором продольная ось ТПА в каждый момент времени направляется на заданную точку в прямоугольной декартовой системе координат относительно неподвижного репера. При формировании ошибки в контуре курса реализуется алгоритм, обеспечивающий разворот ТПА на заданный курс по кратчайшему угловому расстоянию [1]. 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.

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_{\min} вокруг заданной i -й точки траектории ($i = 1, \dots, N$) управление осуществляется курсом и маршевой скоростью ТПА (контур лага СУ отключен);
- при входе ТПА в зону R_{\min} i -й точки траектории, когда $i < N$ происходит переключение управления — в контуры СУ поступают координаты следующей точки и ТПА продолжает движение в режиме 1;
- режим 2 (стабилизация) — после входа ТПА в зону R_{\min} N -й точки траектории стабилизируется курс аппарата, имевший место в момент входа в зону, а отработка рассогласований по координатам осуществляется маршевым и лаговым контурами.

Второй алгоритм осуществляет последовательный выход от первой точки опорной траектории к следующей, пока ТПА не выйдет в зону R_{\min} последней точки опорной траектории. Движение ТПА по траектории, заданной набором точек от 1 до N , осуществляется аналогично первому алгоритму, кроме случаев попадания ТПА в любую из заданных ОЗ. При попадании в зону радиуса $(R_{O_3} + \Delta)$ вокруг точки S_k СУ отрабатывает обход данной ОЗ до выхода ТПА в зону прямой видимости опорной точки, которую он отрабатывает в данный момент времени (Δ — ширина полосы вокруг зоны, заданной R_{O_3k} и S_k для безопасного обхода ОЗ). На рис. 1 проиллюстрирован выход ТПА в точку с учетом опорной траектории и ОЗ. Для реализации данного алгоритма анализируются следующие параметры для всех заданных ОЗ и точки B_i , в зону которой должен выйти ТПА:

D_{ASk} — текущая дистанция от ТПА до точки ОЗ;

D_{SkBi} — текущая дистанция от ОЗ до точки опорной траектории B_i ;

D_{ABi} — текущая дистанция от ТПА до точки опорной траектории B_i ;

Π_{SkBi} — пеленг от точки S_k на точку опорной траектории B_i ;

Π_{ABi} — пеленг от ТПА на точку опорной траектории B_i .

Данный алгоритм при попадании ТПА в зону, где $(R_{O_3} + \Delta) \geq D_{ASk}$, включает режим обхода ОЗ по касательной к окружности радиусом D_{ASk} вокруг точки S_k по ходу часовой стрелки, если $b = 1$, против хода часовой стрелки при $b = -1$, или по кратчайшему пути от ТПА до точки B_i , если $b = 0$. Для выявления кратчайшего пути используется разность пеленгов Π_{SkBi} и Π_{ABi} : при $\Pi_{SkBi} - \Pi_{ABi} > 0$ выбирается

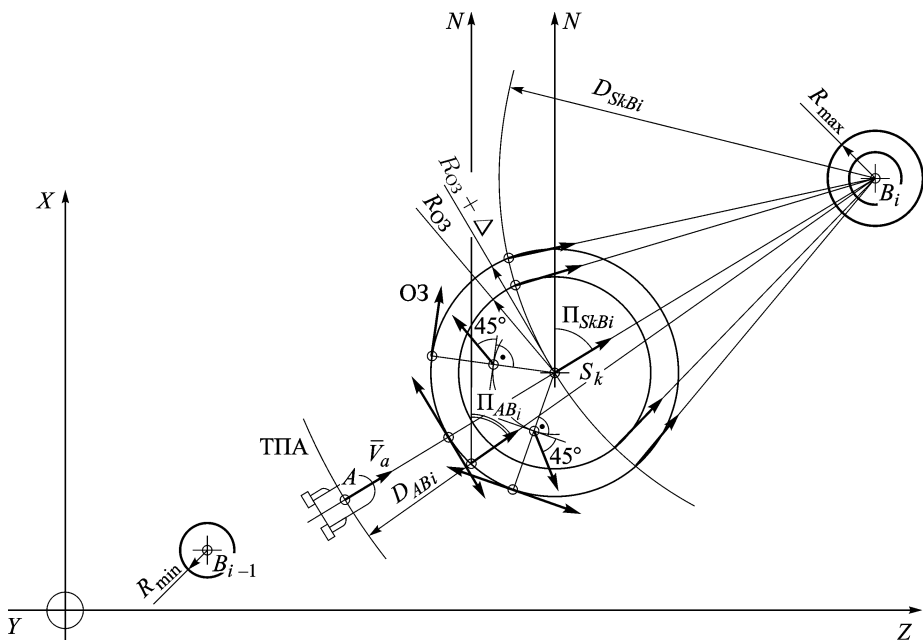


Рис. 1. Выход ТПА в точку B_i с учетом обхода O_3 (темные стрелки – заданные воздействия на контуры СУ ТПА, N – направление на север)

обход O_3 против хода часовой стрелки, при $\Pi_{SkBi} - \Pi_{ABi} \leq 0$ выбирается обход O_3 по ходу часовой стрелки. Во избежание переключений направления обхода из-за возможной флуктуации координат ТПА относительно репера и близких по значению пеленгов Π_{SkBi} и Π_{ABi} алгоритм определения кратчайшего пути обхода O_3 используется только в момент попадания ТПА в зону, где $R_{03} + \Delta \geq D_{ASk}$. При попадании ТПА в зону, где $R_{03} \geq D_{ASk}$, включается режим выхода из O_3 под углом 45° к касательной к окружности радиусом D_{ASk} вокруг точки S_k . При попадании ТПА в зону, где $D_{SkBi} \geq D_{ABi}$, включается режим 1 наведения на точку B_i . В зоне, где $D_{SkBi} \geq D_{ABi}$, случаи при $R_{03} + \Delta \geq D_{ASk}$ не анализируются.

Информационно-измерительный комплекс (ИИК) ТПА предлагается построить на основе комплексирования данных ГАНС, измеряющей координаты ТПА относительно судна и гидроакустического лага, установленного на ТПА. Координаты судна относительно репера определяются по данным спутниковой навигационной системы.

Алгоритмы комплексирования строятся на основе фильтров 2-го порядка, компенсирующих медленноменяющуюся погрешность лага. Расчет параметров алгоритмов основан на детерминированном подходе к описанию погрешностей измерителей.

Работоспособность описанных алгоритмов исследована моделированием в пакете прикладных программ Matlab/Simulink с использованием математической модели системы “базовое судно–кабель–ТПА”, моделей СУ и ИИК ТПА. Анализировалось влияние возмущающих

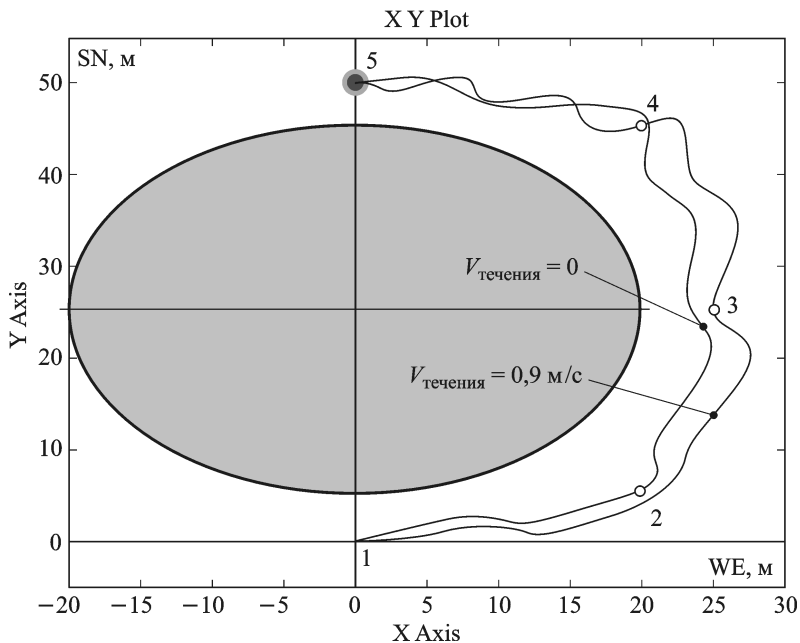


Рис. 2. Движение ТПА по точкам траектории при наличии течения и флуктуирующей погрешности ГАНС

факторов и неидеальностей — наличие течения, медленноменяющегося смещения нуля в модели лага, наличие запаздывания, дискретизации по времени, флуктуирующей погрешности в модели ГАНС.

В качестве примера работы алгоритмов приведем модельную задачу организации выхода ТПА в конечную точку в обход ОЗ, заданной в виде окружности в плоскости горизонта. Вокруг ОЗ от начальной к конечной точке проложена расчетная траектория, задаваемая пятью точками. Движение ТПА организуется по первому алгоритму. На рис. 2 приведены траектории движения ТПА по заданным точкам при наличии течения и флуктуирующей погрешности ГАНС.

По результатам исследований движения ТПА можно сделать следующие выводы:

- 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 расчетной между точками траектории, что может привести к заходу ТПА внутрь ОЗ. Во избежание этого расчетную траекторию следует задавать на некотором удалении от ОЗ, гарантирующем безопасное движение ТПА при течении различной силы и направления;

- из-за ограничения силы тяги лагового движителя в конечной точке траектории СУ стремится установить ТПА против течения, что автоматически достигается переключением режимов 1 и 2. Такая особенность кинематического алгоритма позволяет максимально исполь-

зовать силу тяги маршевых движителей для удержания ТПА в окрестности конечной точки траектории при достаточно сильном течении;

— флуктуирующая погрешность в канале ГАНС, частично отфильтрованная в 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.

— второй алгоритм упрощает задание опорной траектории.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Е г о р о в С. А. Управление движением телеуправляемого подводного аппарата в режиме совместного с носителем движения: Дисс. ... канд. тех. наук. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 361 с.
2. К у р к о т к и н В. И., С т е р л и г о в В. Л. Самонаведение ракет. – М.: Воениздат МО СССР, 1963. – 92 с.

Статья поступила в редакцию 23.03.2012