

УДК 629.121/127

Г. ЭЛКАИМ, Б. ПАРКИНСОН

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ МОДЕЛИ КАТАМАРАНА ДЛЯ ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ДАННЫМ GPS ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НА ЗАДАННОЙ ТРАЕКТОРИИ

*Описаны эксперименты, проведенные с использованием модифицированного катамарана, с целью проверки работоспособности системы идентификации его модели, применяемой для синтеза линейно-квадратичного закона управления при стабилизации на заданной прямолинейной траектории. Основным источником информации для решения задачи идентификации - GPS. На первом этапе экспериментов вместо паруса-крыла был установлен специальный двигатель, имитирующий тяговые усилия, создаваемые парусом. В этих условиях идентифицировалась модель катамарана, синтезировался закон управления на ее основе, и затем оценивалась точность стабилизации катамарана на прямолинейном участке, которая оказалась достаточно высокой со значением среднеквадратической ошибки 0,15 м. На втором этапе эксперименты проводились со штатным парусом-крылом, при этом точность стабилизации имела тот же уровень со значением среднеквадратической ошибки 0,3 м несмотря на повышенный уровень ветро-волновых возмущений.*

### Введение

В данной статье описывается проект «Атлантис» (рис. 1), начало которому положила концепция необслуживаемого, автономного парусника, управляемого по информации от GPS. С момента принятия этой концепции в марте 1997 г. до ее реализации в экспериментальную систему прошло четыре года. При этом внедрено множество новых решений, касающихся использования ветра в качестве движущей силы, общей архитектуры системы, датчиков, методов идентификации модели объекта и управления им.

Функционально «Атлантис» представляет собой морской прототип беспилотного летательного аппарата, который мог бы служить аналогичным целям. В рамках проекта «Атлантис» продемонстрированы достижения в повышении точности управления морским объектом, приводимым в движение ветром,

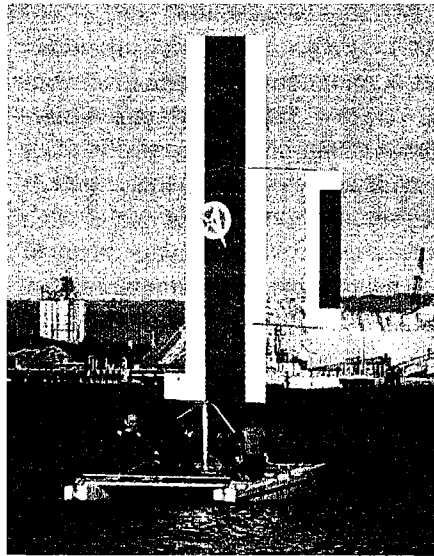


Рис.1. «Атлантис» с парусом-крылом, январь 2001 г.

Элкаим Габриэль Х. (1967). Научный сотрудник Стэнфордского университета, США.

Паркинсон Брэдфорд У. (1935). Профессор авиации и аэронавтики Стэнфордского университета, США.

Научный редактор русского текста д.т.н. А.Е.Пелевин.

до уровня 1 м, в то время как точность обычного серийного авторулевого 100 м. Такое повышение точности открывает возможности новых применений, включая позиционирование навигационных или коммуникационных станций без обслуживающего персонала, автономный переход от пирса к пирсу и многие другие, над которыми сейчас продолжаются работы. Опытный образец создан на основе модифицированного легкого катамарана Prindle-19.

Ветровая двигательная система представляет собой жесткий парус-крыло, закрепленный вертикально на подшипниках, что обеспечивает свободное вращение в азимуте относительно основной мачты. Аэродинамический момент относительно основной мачты сбалансирован за счет использования хвостового крыла, закрепленного на брусах, идущих от основного крыла. Благодаря такой конструкции парус-крыло может автоматически занимать положение с углом, оптимальным к направлению ветра, а хвостовое крыло работает как флюгер, не вызывая большого крена катамарана при порывах ветра. Современная конструкция паруса-крыла обеспечивает более высокое аэродинамическое качество по сравнению с обычным парусом, при этом создается необходимая тяга и уменьшается опрокидывающий момент.

Архитектура системы распределенная, датчики и приводы объединены высокоскоростной цифровой шиной. Датчики вырабатывают данные на частоте 100 Гц, а центральный навигационно-управляющий компьютер (guidance navigation and control computer (GNC)) осуществляет оценивание навигационных параметров и вырабатывает управление на частоте 5 Гц. Показано, что на этой частоте можно осуществлять прецизионное управление катамараном. Распределенная архитектура более устойчива к внешним воздействиям и в то же время дешевле систем, в которых используется высокоскоростная, часто аналоговая конфигурация в виде звезды с централизованным модулем обработки входных данных и выработки управления.

В системе используется приемник GPS (DGPS) с дифференциальным режимом работы для измерения положения и скорости, дополненный недорогой системой определения ориентации, основанной на триадах акселерометров и магнитометров. Точное определение ориентации необходимо для того, чтобы рассчитать положение, которое соответствует центру тяжести катамарана, а не антенны GPS.

В ходе эксперимента регистрировались данные датчиков и привода, который также использовался для формирования необходимых входных сигналов, вызывающих различные формы движения катамарана. Модель объекта определялась по методике идентификации систем с использованием калмановского наблюдателя (Observer Kalman System Identification Techniques (OKID)). Линейно-квадратичный закон синтезировался по модели, идентифицированной методом OKID, управление формировалось с использованием оценки вектора состояния, вырабатываемой с помощью фильтра Калмана. Цель испытаний – проверить качество автоматической стабилизации катамарана на заданной прямолинейной траектории при наличии течений, ветра и волнения.

### Описание системы

Чтобы удостовериться в правильности предложенного подхода, были проведены эксперименты с опытным образцом на основе модифицированного легкого парусного катамарана Prindle-19. Катамаран длиной 7,2 м и шириной 3 м первоначально был оснащен парусом от шлюпа, имеющим площадь 17 м<sup>2</sup>.

го авторулевого 100 м. ых применений, вклю- юнных станций без об- к пирсу и многие дру- ный образец создан на 9.

жесткий парус-крыло, ывает свободное вра- намический момент от- ользования хвостового крыла. Благодаря такой ть положение с углом, аботает как флюгер, не а. Современная конст- динамическое качество я необходимая тяга и

ыводы объединены вы- ют данные на частоте пьютер (guidance нави- вание навигационных

Показано, что на этой катамараном. Распреде- твиям и в то же время гная, часто аналоговая ем обработки входных

ференциальным режи- ненный недорогой сис- акселерометров и маг- ю для того, чтобы рас- ги катамарана, а не ан-

ов и привода, который одных сигналов, вызы- ь объекта определялась лмановского наблюда- ьс (OKID)). Линейно- ицированной методом нки вектора состояния, спытаний – проверить данной прямолинейной

подхода, были прове- фицированного легко- 7,2 м и шириной 3 м щим площадь 17 м<sup>2</sup>.

Управление по курсу осуществлялось с помощью рулей, находящихся в корме каждого корпуса, и выдвижных швертов, установленных на расстоянии примерно 0,5 м за основной поперечной балкой. При установке системы в корпуса катамарана было вмонтировано несколько датчиков и приводов, а вся парусная система (мачта, гик, основной парус и кливер) была заменена вертикальным самобалансирным парусом-крылом, укрепленным на сферических ролико-подшипниках.

На «Атлантисе» имеется несколько основных подсистем, связанных высокоскоростной общей шиной (Controller Area Network (CAN)), обеспечивающей обмен информацией в условиях переменного состава и положения датчиков. Вся монтажная шина на «Атлантисе» состоит из четырех проводов: питание ( $\pm 12$  В), заземление, CAN\_hi и CAN\_low. Такой монтаж имеет много преимуществ, но наиболее важные свойства – это легкость поиска неисправностей и гибкость построения системы.

Основные компоненты: система ориентации, анемометр, датчики относительной скорости и угла перекладки руля, привод руля, приемник GPS и парус-крыло. Эти подсистемы связаны с основным компьютером GNC, который вы-рабатывает оценку вектора состояния на текущий момент и формирует необходимые сигналы для привода рулей, обеспечивая таким образом управление.

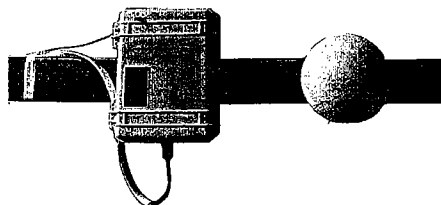


Рис.2. Система определения ориентации и антенна GPS

подробно обсуждается в [6]. Система определения ориентации устанавливается рядом с антенной GPS внутри водонепроницаемого корпуса на деревянной поперечной балке у передней опоры. Деревянная поперечная балка введена для увеличения жесткости конструкции катамарана и несколько снимает напряжения, возбуждаемые парусом-крылом.

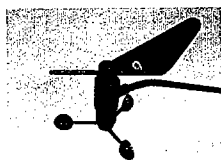


Рис.4. Анемометр

Портативный компьютер GNC, показанный на рис. 5, класса Pentium разме-

щается в другом водонепроницаемом корпусе вместе с приемником GPS Trimble Ag 122. Компьютер GNC оснащен аппаратным средством защиты программного обеспечения и данных от несанкционированного доступа для параллельного порта и позволяет осуществлять коммуникацию через шину CAN. Благодаря преобразователю постоянного тока он питается от шины электропитания судна, а не от собственных батарей.

Система определения ориентации, представленная на рис. 2 и 3, состоит из трехосного магнетометра, двухосного акселерометра и микроконтроллера Seimens 515. В основе алгоритма ее работы лежит решение, использующее кватернионы для задачи согласования векторов, впервые предложенное в 1966 г. [7]. Алгоритм

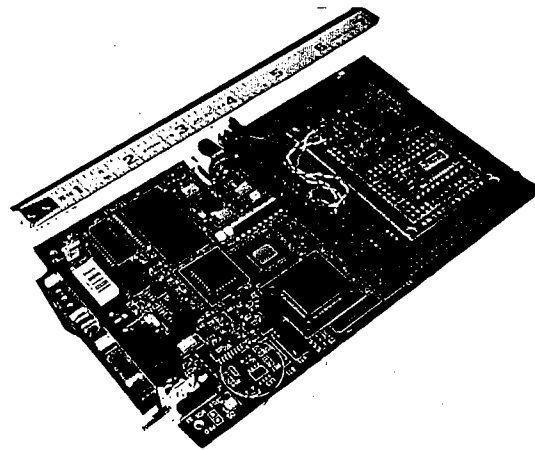


Рис.3. Магнетометр и акселерометры крупным планом

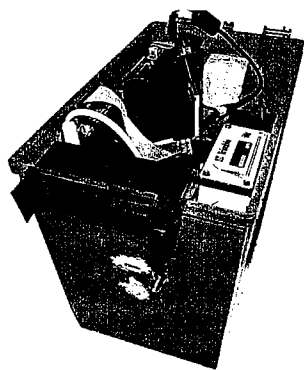


Рис.5. Портативный компьютер GNC

Внутри правого корпуса, ниже крышки заднего смотрового люка, установлены два микроконтроллера Siemens 505: один – для преобразования данных от датчика относительной скорости и угла перекладки руля, а другой – для привода руля (рис. 6). В правом корпусе катамарана в дно вмонтирован датчик лага (рис.7); в корме – датчик для измерения магнитного поля между двумя магнитами на линии шарнира руля для измерения угла перекладки руля.

Привод руля представляет собой маломощный двигатель постоянного тока с вращением только относительно вертикальной оси и блок электронного управления, изготовленный по МОП-технологии. Внутри основной мачты находится контактное кольцо, позволяющее осуществлять вращение на полные  $360^\circ$ , при этом жгут проводов общей шины «Атлантика» не скручивается. Само крыло построено из трех секций, которые собираются на месте. Нижняя секция содержит блок электроники с батареями, балласт и электронику для зарядки батарей. Микроконтроллер и двигатель постоянного тока используются для управления закрылком. В него также входит микроконтроллер со специальной головкой морского преобразователя, прикрепленный к крышке блока электроники, для преобразования данных анемометра (см. рис.4).

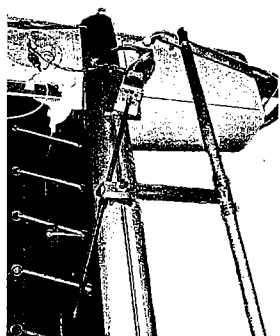


Рис.6. Привод руля

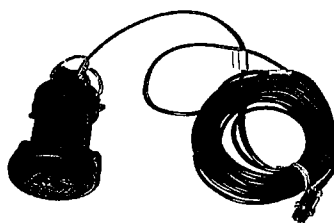


Рис.7. Датчик лага

Анемометр используется для измерения скорости и направления ветра относительно угла паруса-крыла. Существенно, что измеряется угол атаки крыла. Экспериментальные данные показывают, что он может изменяться на  $\pm 20^\circ$  от среднего. При отсутствии возможности быстро разворачиваться на новый угол атаки крыло большую часть времени не обеспечивало бы эффективную тягу, поэтому возникает необходимость в его самобалансировке. Способность разворачиваться на новый угол атаки за счет балансировки во время порыва ветра обеспечивает наибольшую тягу с малым кренящим моментом.

Вдоль крыла расположены четыре привода, которые идентичны приводу руля и приводят в действие закрылки и хвостовое крыло. Равновесие моментов между крылом и хвостовым крылом удерживает парус-крыло в необходимом положении относительно ветра, обеспечивая постоянный угол атаки. До тех пор пока изменение направления ветра не пересечет среднюю линию (продольную ось) судна, крыло продолжает обеспечивать тягу для движения катамарана вперед за счет устойчивости системы паруса-крыла. Но если изменение направле-

ния ветра пересечет крыло изменится симметрия от того, что нет.

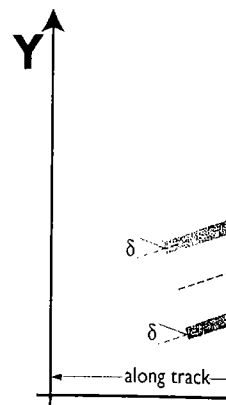


Рис.8. Система координат: «Расстояние по оси абсцисс: «Боковое»

Первая приближенная динамика перемещения катамарана. Линейная

где  $\delta$  обозначает угол отклонения катамарана до центра движения недостаточностью, но при калибровке модели. Если она соответствует простому постоянству  $V_x$  неадекватно. Более детальное рассмотрение и угол  $\Psi$  инерции по оси X расстоянию. никакое отклонение когда судно движется его на большое чтобы сделать матрицу боковое отклонение новыми переменными принимают вид

а, ниже крышки заднего тены два микроконтроллера для преобразования данной скорости и угла педля привода руля (рис. 6). зана в дно вмонтирован датчик для измерения угла магнитами на линии угла перекадки руля. ет собой маломощный ка с вращением только оси и блок электронноый по МОП-технологии. находится контактное ые 360°, при этом жгут амо крыло построено из ция содержит блок элекдки батарей. Микрокондля управления закрылььной головкой морского троники, для преобразо-

ния ветра пересечет среднюю линию судна, то положение закрылка и хвостового крыла изменится на обратное, что соответствует перекадке паруса, в зависимости от того, пересекает ли ветер среднюю линию в направлении кормы или нет.

### Методология идентификации объекта

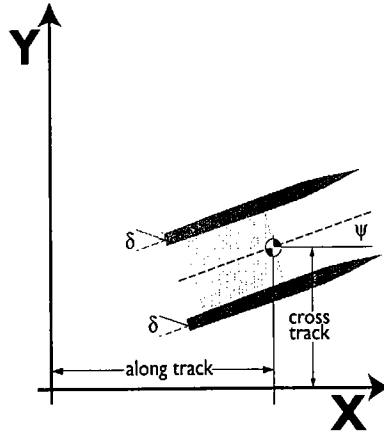


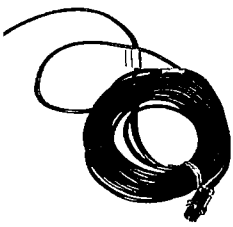
Рис.8. Система координат  $OXY$ :  
ось абсцисс: «Расстояние вдоль прямой»  
ось ординат: «Боковое отклонение»

Чтобы управлять «Атлантисом», необходимо сформировать его модель. Существуют несколько методов, позволяющих построить такую модель [12], но они сложны для реализации. Для получения невысокого порядка модели, которая имела бы достаточную достоверность для эффективного управления, было опробовано несколько подходов. В целях упрощения принято, что «Атлантис» движется по прямой линии заданного пути, которая совпадает с осью  $X$ , и движение совершается с постоянной скоростью  $V_x$ . Расстояние вдоль этой линии обозначим через  $X$  (рис.8), перпендикулярное расстояние от линии пути –  $Y$  (боковое отклонение), а угол, который продольная ось «Атлантиса» образует относительно заданной траектории, –  $\Psi$ .

Первая приближенная модель – простая кинематическая модель, учитывающая динамику перекадки руля, что обеспечивает ограничение на движение катамарана. Линеаризация модели приводит к уравнениям для вектора состояния:

$$\begin{bmatrix} \dot{Y} \\ \dot{\Psi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & V_x & 0 \\ 0 & 0 & \frac{V_x}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y \\ \Psi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \quad (1)$$

где  $\delta$  обозначает угол перекадки рулей, а  $L$  – расстояние от центра тяжести катамарана до центра приложения силы от рулей. Эти упрощенные уравнения движения недостаточны, чтобы синтезировать управление судном с большой точностью, но пригодны как начальное приближение для процесса идентификации модели. Если уравнения (1) представить в виде передаточной функции, то она соответствует тройному интегратору и объект невозможно стабилизировать простым пропорциональным управлением. Кроме этого, допущение о постоянстве  $V_x$  неадекватно, поскольку скорость объекта зависит от скорости ветра. Более детальное рассмотрение уравнения (1) показывает, что боковое отклонение и угол  $\Psi$  интегрируются не по времени, а скорее по пройденному вдоль оси  $X$  расстоянию. Действительно, если судно неподвижно относительно воды, никакое отклонение рулей не вызовет изменений курса, подобным же образом, когда судно движется быстро, нужны лишь очень малые усилия, чтобы повернуть его на большой угол. Таким образом, если мы зададим переменные так, чтобы сделать матрицу динамики объекта независимой от  $V_x$ , то и угол  $\Psi$ , и боковое отклонение целесообразно нормализовать по скорости  $V_x$ . При этом новыми переменными становятся  $\tilde{Y}$  и  $\tilde{\Psi}$ ,  $\delta$  не изменяется, а уравнения движения принимают вид



### 7. Датчик лага

направления ветра относительно угла атаки крыла. изменяться на  $\pm 20^\circ$  отчиваться на новый угол бы эффективную тягу, зке. Способность разво время порыва ветра нтом.

идентичны приводу руля. Равновесие моментов крыло в необходимом и угол атаки. До тех пор ю линию (продольную жения катамарана впе и изменение направле-

$$\begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{\Psi} \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{Y} \\ \tilde{\Psi} \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{Y} &\equiv \frac{Y}{V_x}; \\ \tilde{\Psi} &\equiv \frac{\Psi}{V_x}. \end{aligned} \quad (3)$$

Обращаем внимание на то, что в результате этой нормализации матрица динамики становится постоянной. Такой подход испытывался на тракторах, управляемых по информации от GPS [9], и подтвердил свою эффективность. При этом закон управления автоматически учитывает зависимость от скорости.

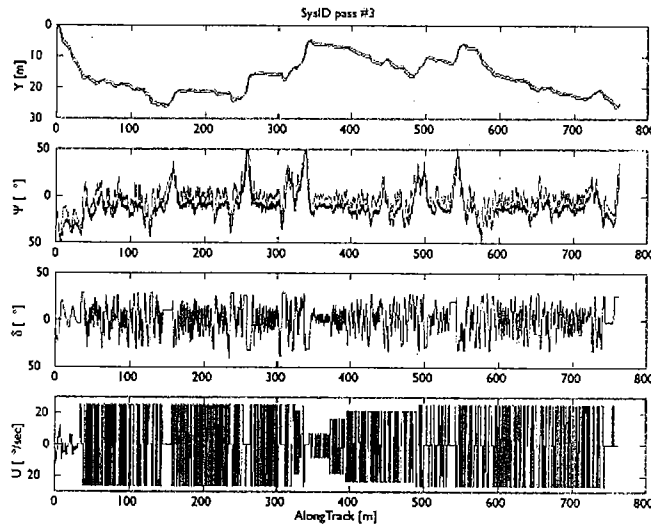


Рис.9. Входные переменные и управление при идентификации модели катамарана

лось для того, чтобы приложить максимальные воздействия к «Атлантису» через средства управления и собрать достаточный объем информации обо всех представляющих интерес формах движения. Типичный вариант движения при идентификации модели представлен на рис. 9.

Закон управления был сформирован с использованием стандартного линейно-квадратичного подхода. Квадратичный критерий направлен на минимизацию взвешенной суммы выходов ( $y_{\max}$  и  $u_{\max}$  – назначенные параметры)

$$J = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{k=0}^N x_k^T C^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ y_{\max}^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} C x_k + u_k^T \begin{bmatrix} 1 \\ u_{\max}^2 \end{bmatrix} u_k. \quad (4)$$

Поскольку при идентификации модели переменные масштабируются по скорости, то получаемая модель представляет собой модель, инвариантную к значению скорости.

Далее в ра... мая OKID [8... кретном врем... системы в ди... щим образом

Известно, использовани... были бы еди... нулевых наче... известный ка... преобразован... Марковски... Ганкеля (6), 1... даемости, пер... матрица Ганк... док системы

Для получения дан... ных, необходимых для идентификации модели «Атлантиса», была проведена серия испытаний в которых судоводитель, через компьютер GNC заставлял рули поворачиваться влево или вправо на максимальной скорости поворота (~25 град/с). Затем водитель давал команду на установку руля в нулевое положение для движения строго по прямой линии.

Это псевдослучайное управление предназна...

$$H(k-1) =$$

Поскольку полный ранг, порядком, ко... ее усечением... ляющих поряд... дет использов... ет равенство... алгоритма, кс... фикации моде...

Для любой получить пут... импульс с мо... роятно, приве... системы можн... ном потоке е... щих им выхо... ях) набор ма... тификации. Е... рого k, то кол... тификации уп...

Добавлени... следующему 1

