

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,

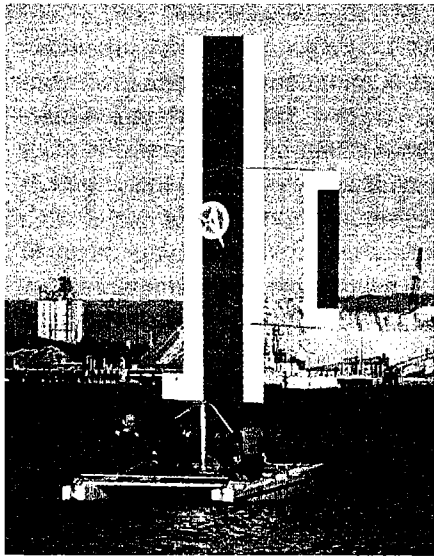


Рис.1. «Атлантис» с парусом-крылом, январь 2001 г.

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 м².

го авторулевого 100 м. ых применений, включо- 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 ыла. 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 м².

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 (± 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 вырабатывает оценку вектора состояния на текущий момент и формирует необходимые сигналы для привода рулей, обеспечивая таким образом управление.

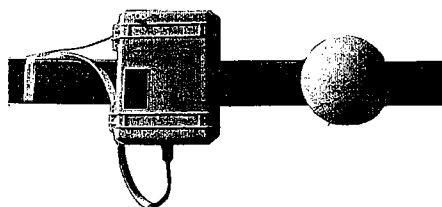


Рис.2. Система определения ориентации и антенна GPS

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.

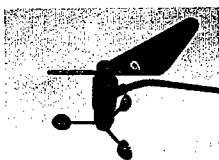


Рис.4. Анемометр

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

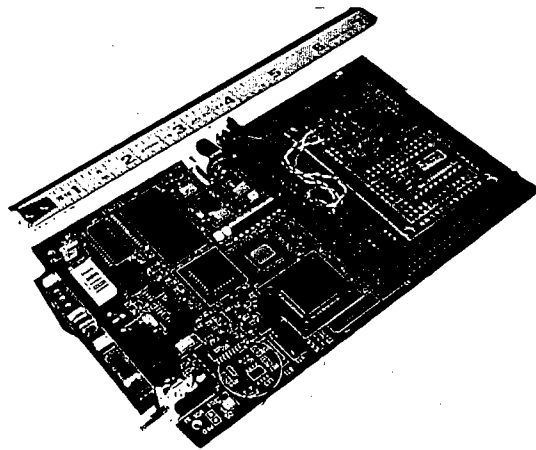


Рис.3. Магнетометр и акселерометры крупным планом

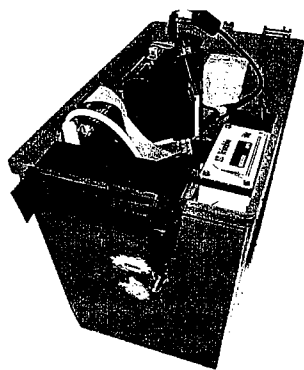


Рис.5. Портативный компьютер GNC

Внутри правого корпуса, ниже крышки заднего смотрового люка, установлены два микроконтроллера Seimens 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° , 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).

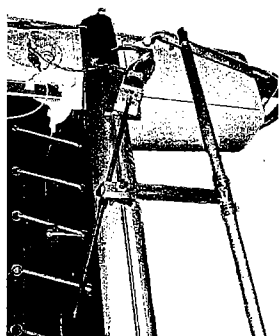


Рис.6. Привод руля

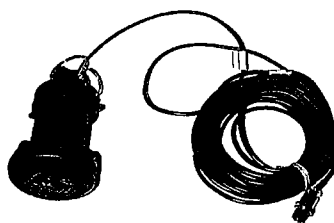


Рис.7. Датчик лага

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.

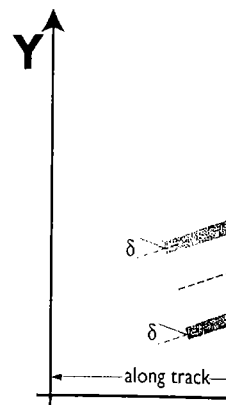


Рис.8. Система координат: «Расстояние по оси абсцисс: «Боковое»

Первая приближенная динамика перемещения катамарана. Линейная

где δ 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 Ψ 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. ает 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

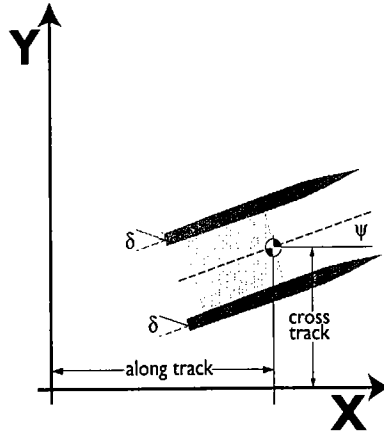


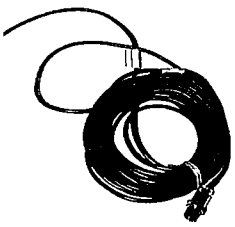
Рис.8. Система координат OXY :
ось абсцисс: «Расстояние вдоль прямой»
ось ординат: «Боковое отклонение»

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, – Ψ .

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 δ 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 Ψ 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 Ψ , и боковое отклонение целесообразно нормализовать по скорости V_x . При этом новыми переменными становятся \tilde{Y} и $\tilde{\Psi}$ δ 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.

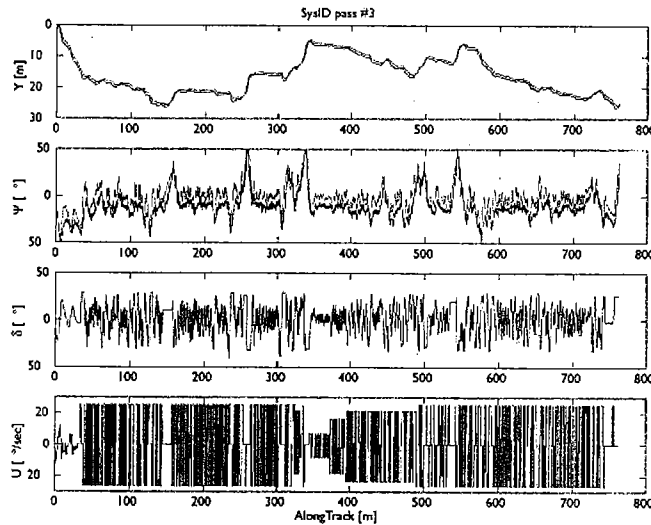


Рис.9. Входные переменные и управление при идентификации модели катамарана

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

$$H(k-1) =$$

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

Далее в работе используется методология идентификации систем, называемая OKID [8] и предполагающая описание объекта линейной системой в дискретном времени. Основы теории этого подхода изложены в [10]. Для линейной системы в дискретном времени уравнения движения можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k, \\ y_k &= Cx_k + Du_k. \end{aligned} \tag{5}$$

Известно, что тройка $[A, B, C]$ не единственна, и ее можно преобразовать с использованием некоторого преобразования подобия так, что входы и выходы были бы единственны, а вектор состояния – нет. Однако выход системы при нулевых начальных условиях и возмущении единичным входным импульсом, известный как марковские параметры системы, остается инвариантным при преобразовании подобия. Введем эти марковские параметры в виде $[Y_0, Y_1, \dots, Y_k]$.

Марковские параметры могут быть скомпонованы в обобщенную матрицу Ганкеля (6), которую можно представить в виде произведения матриц наблюдаемости, перехода из состояния X_1 в X_k и управляемости; отсюда следует, что матрица Ганкеля при отсутствии шумов всегда будет иметь ранг n , где n порядок системы

$$H(k-1) = \begin{bmatrix} Y_k & Y_{k+1} & \dots & Y_{k+\beta-1} \\ Y_{k+1} & Y_{k+2} & \dots & Y_{k+\beta} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Y_{k+\alpha-1} & Y_{k+\alpha} & \dots & Y_{k+\alpha+\beta-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ CA^2 \\ \dots \\ CA^{\alpha-1} \end{bmatrix} A^{k-1} [B \ AB \ A^2B \ \dots \ A^{\beta-1}B]. \tag{6}$$

Поскольку шум может исказить это свойство матрицы Ганкеля, имеющей полный ранг, она представляется в виде разложения по сингулярным числам с порядком, который заведомо превышает размерность системы, с последующим ее усечением путем сохранения только значимых сингулярных чисел, определяющих порядок модели катамарана. Эта усеченная матрица Ганкеля далее будет использована для определения тройки $[A, B, C]$ в форме, которая обеспечивает равенство граммianов управляемости и наблюдаемости. Версия подобного алгоритма, который учитывает корреляцию данных, используется для идентификации модели «Атлантика». Более подробно эта тема обсуждается в [11].

Для любой реальной системы, однако, ее импульсную характеристику нельзя получить путем возмущения системы единичным входным импульсом, так как импульс с мощностью, достаточной для возбуждения всех форм движения, вероятно, привел бы к насыщению привода. Однако импульсную характеристику системы можно сформировать на основе зафиксированных данных о непрерывном потоке единичных входных импульсов («богатый» вход) и соответствующих им выходов системы. При нормальных условиях (при «малых» управлениях) набор марковских параметров может не обеспечить решение задачи идентификации. Если система асимптотически устойчива, так что $A^k=0$ для некоторого k , то количество марковских параметров можно сократить. Процесс идентификации упрощается при работе с асимптотически устойчивыми системами.

Добавление наблюдателя к линейным уравнениям системы приводит к их следующему преобразованию:

$$\begin{aligned}
 x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k + Gy_k - Gy_k; \\
 x_{k+1} &= [A + GC]x_k + [B + GD]u_k - Gy_k; \\
 x_{k+1} &= \hat{A}x_k + \hat{B}v_k; \\
 \hat{A} &\equiv [A + GC], \hat{B} \equiv [B + GD, -G], v_k \equiv \begin{bmatrix} u_k \\ y_k \end{bmatrix}.
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Таким образом, устойчивость матрицы динамики можно увеличить путем включения наблюдателя и при определении марковских параметров применить метод наименьших квадратов.

На основании теоремы разделения и имеющегося фильтра Калмана для реализации полной обратной связи при линейно-квадратичном подходе к синтезу управления остается лишь определить коэффициенты закона. Усовершенствованная версия процесса OKID [11] использовалась для идентификации динамики катамарана по экспериментальным данным.

Применительно к «Атлантису» разложение по сингулярным числам матрицы Ганкеля для нормализованных по скорости данных показало большое уменьшение величины сингулярных чисел от четвертого к пятому и выше (рис. 10, верхний). Кроме того, уровни значений сингулярных чисел (рис. 10, нижний) для всех моделей катамарана выше четвертого показали уменьшение величины от четвертого к пятому и выше на два порядка. Определение тройки $[A, B, C]$ при идентификации динамики также оказалось достаточно эффективно. С использованием этих результатов был синтезирован линейно-квадратичный закон управления и проведено моделирование, обосновывающее его качество. После того как результаты моделирования оказались вполне удовлетворительными, были проведены экспериментальные испытания для подтверждения правильности этого подхода.

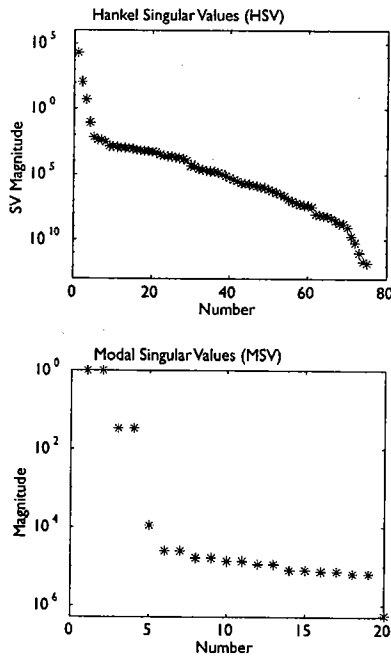


Рис.10. Сингулярные значения матрицы Ганкеля для данных катамарана:

внизу: номер сингулярного числа
слева: величина сингулярных чисел
вверху: сингулярные значения матрицы Ганкеля (HSV) и модальные сингулярные значения (MSV)

Испытания катамарана с вращающимся двигателем

Когда парус-крыло находился еще в стадии изготовления, аппаратура и программное обеспечение задач идентификации модели и выработки управления были уже готовы. На этом этапе для испытания части системы был использован электрический поворотный двигатель, заменяющий парус-крыло. При этом двигатель установили на катамаране так, что была обеспечена возможность его поворота, а следовательно, и направления тяги, от средней линии не более чем на 40°.

Поскольку на динамику катамарана сильно влияет скорость движения, то для

обеспечен
нагружен
парусом-к
тель работ
ветствующ
сти ветра
регулятор



Рис.

очень легко

25
20
15
10
5
North [m]
50
100
150
200

Рис.

На рис. 1
билизации и
перекладки]
показаны за

обеспечения соответствующего весового водоизмещения «Атлантис» был нагружен свинцом-балластом массой 75 кг, чтобы масса была такой же, как и с парусом-крылом. Для проверки работы на разных скоростях движения двигатель работал при напряжении 12, 24 и 36 В и токе 65 А, что обеспечивало соответствующее изменение скорости; при этом изменчивость направления скорости ветра задавалась путем поворота двигателя на разные углы, в то время как регулятор обеспечивал стабилизацию на заданной траектории движения.

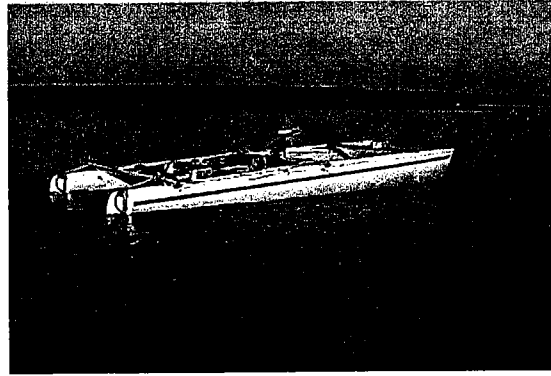


Рис.11. «Атлантис» на испытаниях с вращающимся двигателем

На рис. 11 показан «Атлантис» на испытаниях с вращающимся двигателем в центре судна, свинцовые батареи обеспечивают балласт. Как показано на рисунке, катамаран движется без обслуживающего персонала, компьютер GNC обеспечивает навигацию и управление. Анемометр находится на передней деревянной поперечной балке, и это его временное размещение. Физически переставить датчик очень легко благодаря использованной на «Атлантисе» архитектуре шины.

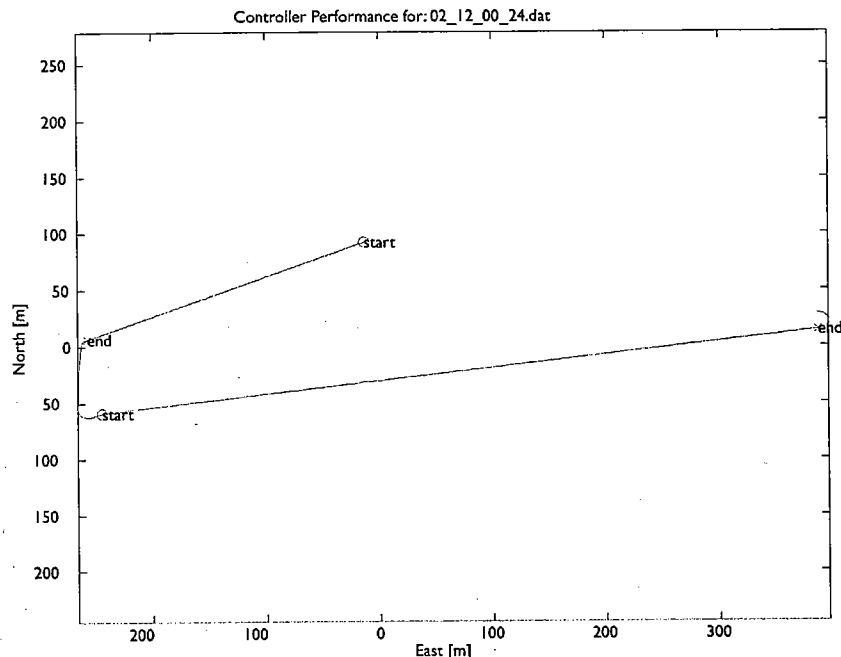


Рис.12. Траектория движения катамарана с вращающимся двигателем: *вверху*: рабочие характеристики регулятора

На рис. 12 показана типичная траектория движения при автоматической стабилизации на прямолинейных участках. При этом поворот совершается путем перекладки руля за заданный угол без использования обратной связи. На рис. 13 показаны зарегистрированные данные бокового отклонения от траектории, ко-

торые имеют небольшую величину, несмотря на имеющееся течение и ветроволновые возмущения. Судя по графику бокового отклонения от траектории, приведенного на рис. 13, среднее значение было не более 10 см, а среднеквадратическое отклонение ~ 3 см.

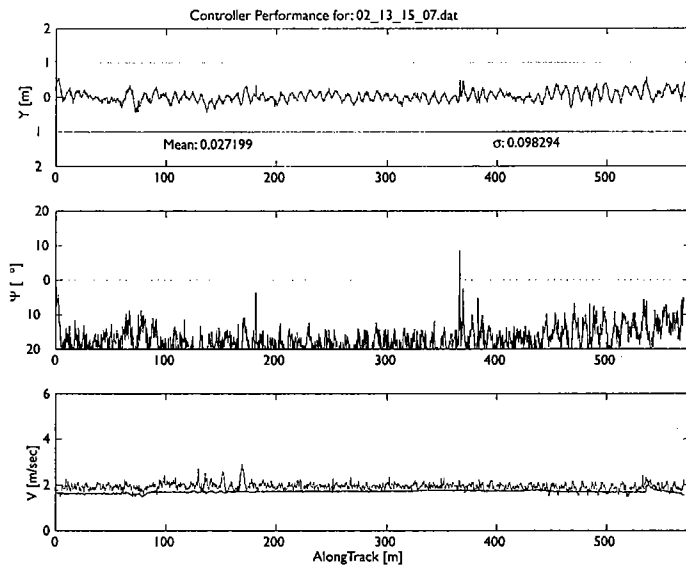


Рис.13. Характеристики процесса стабилизации катамарана с вращающимся двигателем:
вверху: рабочие характеристики регулятора
внизу: расстояние вдоль траектории

частотный шум датчика относительной скорости.

Испытания паруса-крыла

Чтобы оценить работу регуляторов и всей системы в целом, в гавани города Редвуд, штат Калифорния, 27 января 2001 г. были проведены испытания для проверки качества стабилизации катамарана на прямолинейной траектории при повышенном уровне возмущений из-за тяги паруса-крыла. Конструкция регуляторов не подверглась изменениям, и испытания проводились в день, когда скорость ветра была примерно 12 уз (6 м/с) с порывами до 20 уз (10 м/с).

Парус-крыло работал даже лучше, чем предполагалось. Когда хвостовое крыло находилось в центре, у «Атлантика» не было крена и отсутствие аэроупругой нестабильности (изменение наклона паруса) делало плавание в этом случае спокойным. После того как задний конец хвостового крыла был повернут в направлении предполагаемого движения, «Атлантика» плавно ускорял ход и спокойно продолжал идти по галсу. Даже при больших порывах парус-крыло «Атлантика» быстро разворачивался лишь с небольшим дрожанием на новый угол атаки.

Большое впечатление производила способность «Атлантика» плыть под очень острым углом к ветру. После анализа данных было показано, что «Атлантика» сохранял способность плыть в направлении до 25° к истинному направлению ветра. Это результат улучшенной аэродинамики жесткого крыла и самоподстройки в отличие от обычного паруса. Хотя нужны дальнейшие экспериментальные исследования для того, чтобы улучшить тяговые характеристики

Интересно, что угол Ψ имеет смещение на -20° для большей части этого участка движения, что объясняется наличием течения. Величина его ясна из сравнения графиков скорости, приведенных на рис. 13, где верхняя линия представляет относительную скорость катамарана, а ровная линия ниже – абсолютную скорость по GPS. Разница между ними представляет величину течения; это можно увидеть, несмотря на высоко-

паруса-крыла.
вающие резул

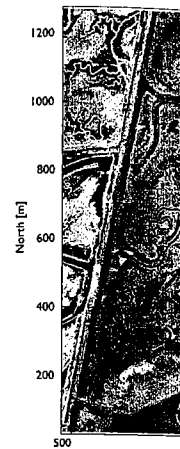


Рис.14. Спутниковые данные: регулятор

2
1
North [m]
1
2
3

На рис. 15 Система управления каждой парусной панелью осуществ

На рис. 16 боковые скорости парусов среднего значе

Среднее значение 30 см, а среднее квадратическое погрешность характеристики прие

еется течение и ветронения от траектории, 10 см, а среднеквадра-

Интересно, что угол Ψ имеет смещение на -20° для большей части этого участка движения, что объясняется наличием течения. Величина его ясна из сравнения графиков скорости, приведенных на рис. 13, где верхняя линия представляет относительную скорость катамарана, а ровная линия ниже – абсолютную скорость по GPS. Разница между ними представляет величину течения; это можно увидеть, несмотря на высоко-

целом, в гавани города зедены испытания для ейной траектории при 1. Конструкция регуля-

лись в день, когда ско- уз (10 м/с). юсь. Когда хвостовое а и отсутствие аэроуп-

«Атлантика» плыть под показано, что «Атлан- истинному направле- есткого крыла и само- и дальнейшие экспери- говые характеристики

паруса-крыла. Проведенные эксперименты показывают, что впереди обнадежи- вающие результаты.

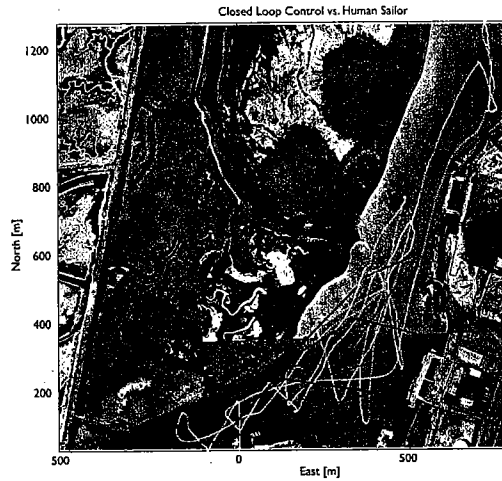


Рис. 14. Спутниковая фотография гавани: *вверху*: регулирование с обратной связью

На рис. 14 показана сделанная со спутника фотография гавани, где проводились испытания как с вращающимся двигателем, так и с парусом-крылом. Белые точки – траектории движения катамарана при испытаниях предыдущего года, когда «Атлантика» плывал с обычным парусным снаряжением под управлением пилота. Черные точки – траектории при автоматической стабилизации на последних испытаниях. Белый след имеет изогнутый характер, тогда как черные линии как будто проведены по линейке.

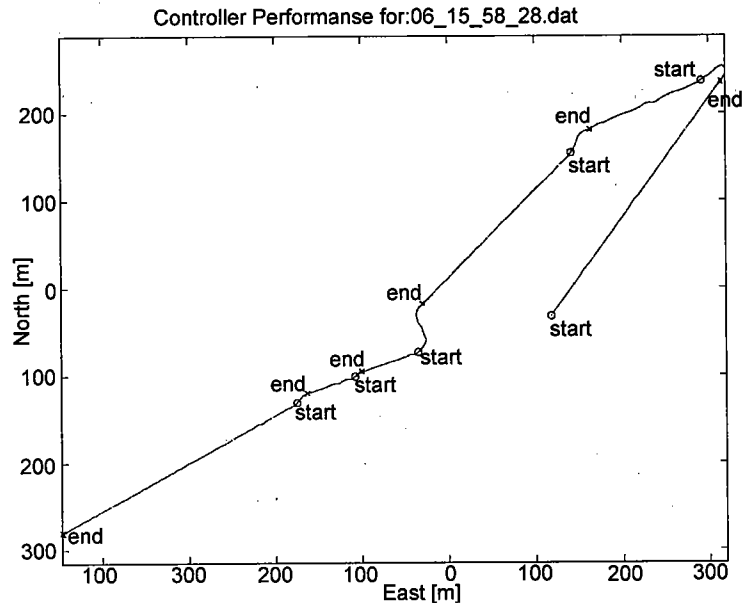


Рис. 15. Траектория движения катамарана с парусом-крылом

На рис. 15 представлены траектории движения управляемого катамарана. Система управления стабилизировала движение на прямолинейном участке между каждой парой точек ее «начала» и «конца», а повороты с участка на участок осуществлялись путем заданной перекладки руля.

На рис. 16 представлены характеристики процесса автоматической стабилизации: боковое отклонение, угол Ψ и скорости. Темная верхняя линия на графике скоростей представляет скорость ветра, она изменяется более чем на 50% от среднего значения.

Среднее значение бокового отклонения от заданной траектории не более 30 см, а среднеквадратическое отклонение не более 3 см. Заметим, что это только погрешность процесса стабилизации катамарана. В соответствии с характеристикой приемника дифференциальной GPS Береговой Охраны навигационная

ошибка датчика GPS составляет примерно 36 см, таким образом, суммарная погрешность системы не более 1 м.

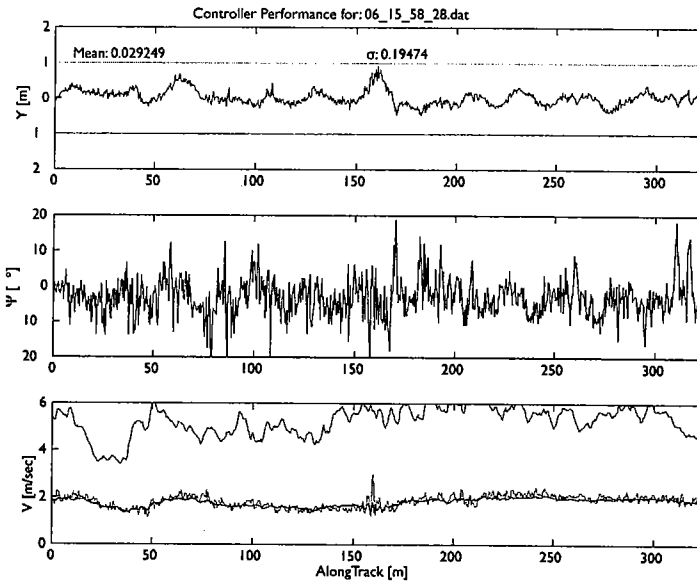


Рис.16. Характеристики процесса стабилизации катамарана с парусом-крылом

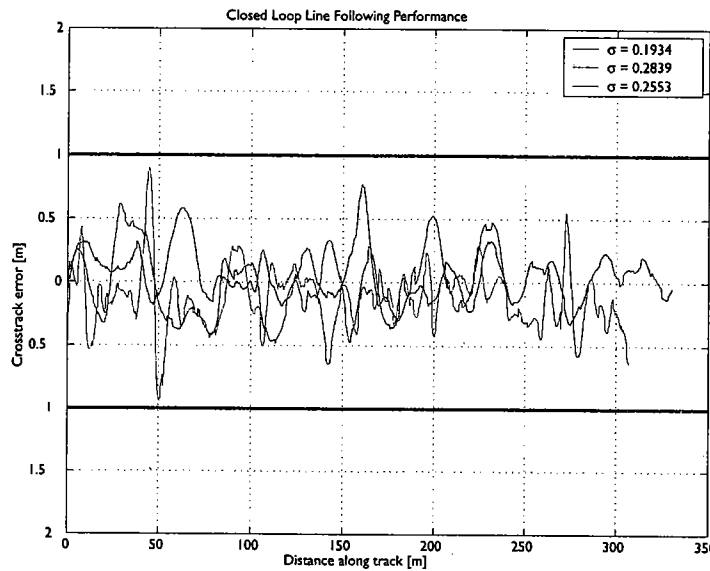


Рис.17. Совокупность всех графиков траекторий, наложенных друг на друга, при стабилизации катамарана на прямолинейных участках:

вверху: «Рабочие характеристики процесса стабилизации»
 слева: «Боковое отклонение от траектории (м)»
 внизу: «Расстояние вдоль траектории (м)»

На рис. 17 представлена совокупность графиков всех зарегистрированных боковых отклонений, наложенных друг на друга, при стабилизации «Атлантика» на всех прямолинейных участках движения, а также границы, равные ± 1 м.

Разница в длине траекторий объясняется местонахождением берега и желанием не сесть на мель. В зависимости от выбранного пути расстояние было

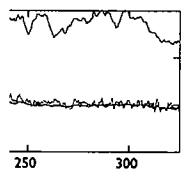
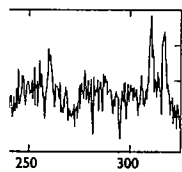
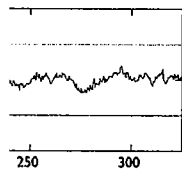
больше или
 1 м. Для ср
 вых AutoHe
 морской ми.

В статье
 недорогих д
 стабилизиро
 крыло позво
 ствие, и реа
 траектории
 му участку
 ционной оши
 1 м.

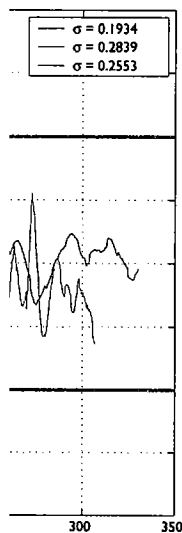
1. Parkinson V
2. AIAA, Wa
3. Wolfhard L
4. New York, N
5. Gelb A., App
6. Stengel R.F.
7. Kuipers J.B.
8. Elkaim G.H.
9. Attitude Dete
10. Location and
11. Wahba G., e
12. Juang j.-N. A
13. Elkaim G.H.
14. GPS-guidedF
15. Juang J.-N.,
16. Correlations (
17. ogy. Vol. 4, N
18. Phan M, Hor
19. Identification
20. 1995.
21. Fossen T.I., C

Abstract. An au
 wax b
 trol. T
 dynan
 severa
 model
 the sys
 lowing
 than 0
 tested
 disturb
 of app
 nomina

образом, суммарная по-



на с парусом-крылом



руг на друга, при стабилиза-
ах:
и»

ех зарегистрированных
стабилизации «Атланти-
границы, равные ± 1 м.
ждением берега и жела-
пути расстояние было

больше или меньше. Ни разу погрешность стабилизации не превысила 1 м. Для сравнения приведем технические требования для семейства авторулевых AutoHelm: погрешность бокового отклонения не должна превышать 0,05 морской мили или 92,6 м.

Заключение

В статье показано, что благодаря достижениям в технике GPS и появлению недорогих датчиков можно построить необслуживаемое судно, которое будет стабилизироваться с высокой точностью. Использование новой системы парус-крыло позволило преодолеть трудности, связанные с приведением паруса в действие, и реализовать эффективное управление. Погрешность стабилизации на траектории в процессе управления катамараном, следующим по прямолинейному участку в достаточно сложных условиях, составила 0,3 м. С учетом навигационной ошибки датчика 0,36 м суммарная ошибка стабилизации не превысила 1 м.

ЛИТЕРАТУРА

1. Parkinson W.B., and Spilker J.J. Global Positioning System: Theory and Applications. Vol. 1 and 2. AIAA, Washington, D.C., 1996.
2. Wolfhard L. CAN System Engineering: From Theory to Practical Application. Springer Verlag, New York, NY, 1997.
3. Gelb A., Applied Optimal Estimation. MIT Press, Cambridge, MA 1974.
4. Stengel R.F. Optimal Control and Estimation. Dover Publications, New York, NY, 1994.
5. Kuipers J.B. Quaternions and Rotation Sequences. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
6. Elkaim G.H., Gebre-Egziabher D., Powell, J.D., Parkinson W.B. A Gyro-Free Quaternion-Based Attitude Determination System Suitable for Implementation using Low-Cost Sensors, IEEE Position Location and Navigations Symposium (IEEE PLANS), San Diego, 2000. P. 185-192.
7. Wahba G., et al. Problem 65-1 (Solution), SIAM Review 8:384-386, 1966.
8. Juang J.-N. Applied System Identification. Prentice Hall, NJ, 1994.
9. Elkaim G.H. O'Connor M.L., Parkinson W.B. System Identification and Robust Control of a GPS-guided Farm Tractor, ION-GPS, 1997.
10. Juang J.-N., Cooper, J.E., and Wright, J.R. An Eigensystem Realization Algorithm Using Data Correlations (ERA/DC) for Modal Parameter Identification, Control-Theory and Advanced Technology. Vol. 4, N 1, 1988.
11. Phan M, Horta L.G., Juang J.-N. and Longman, R.W. Improvement of Observer/Kalman Filter Identification (OKID) by Residual Whitening, Journal of Vibration and Acoustics. Vol. 117, N 2, 1995.
12. Fossen T.I., Guidance and Control of Ocean Vehicles. Wiley and Sons, New York, NY, 1994.

Abstract. An autonomous catamaran, based on a modified I'rrindle-19 day-sailing catamaran was built to test the viability of GPS-based system identification for precision control. The catamaran was fitted with several sensors and actuators to characterize the dynamics. Using an electric trolling motor, and lead ballast to match all-up weight, several system identification passes were performed to excite system modes and model the dynamic response. LQG controllers were designed based on the results of the system identification passes, and tested with the electric trolling motor. Line following performance was excellent, with cross-track error standard deviations of less than 0.15 meters. The wing-sail propulsion system was fitted, and the controllers tested with the wing providing all forward thrust. Line following performance and disturbance rejection were excellent, with the cross-track error standard deviations of approximately 0.30 meters, in spite of wind speed variations of over 50% of nominal value.