**EXTENDED KALMAN FILTER APPLICATION IN THE UNDERWATER VEHICLE POSITIONING TASK**

**ABSTRACT**

В данной статье предложена схема комплексирования информации для использования расширенного фильтра Калмана в задаче позиционирования ведущего подводного аппарата с помощью коммуникационных устройств (буев), дающих информацию о положении при помощи механизма наклонных дальностей, инерциальных датчиков, допплеровского лага и глубинометра. Описаны методики расчета параметров всех компонент комплексной навигационной модели. Приведены результаты имитационного моделирования с соответствующими метриками качества.

**INTRODUCTION**

Автономные подводные аппараты (AUVs) – роботы, которые способны перемещаться под водой самостоятельно без вмешательства оператора. До относительно недавнего времени, AUV использовались лишь в ограниченных областях применения. С развитием технологий обработки данных и высокоэффективных источников питания, AUV стали развиваться и использоваться чаще. Как правило, AUV обладают высокой степенью автономности, гибкости и возможностями удаленной навигации при исследовании морских ресурсов, подводной разведке, сборе данных и других аспектах [1]. С развитием технологий воздушной и наземной навигации, технологии подводной навигации также стали существенно эволюционировать [2,3,4]. Однако, из-за специфики подводной среды, все еще существует разрыв между точностью навигации и позиционирования подводных аппаратов по сравнению с воздушными и наземными, и на данный момент подводная навигация стала главным камнем преткновения в области морских исследований [5].

Подводя итог, можно сказать, что даже при наличии большего количества датчиков, все еще существует множество ограничений и недостатков в независимой работе AUV под водой. Однако AUV способны использовать свои навигационные датчики для получения соответствующей измерительной информации для последующего комплексирования с технологиями подводной акустической связи. Простота и гибкость использования подобных систем привели к повышенному вниманию исследователей к подводному позиционированию AUV [6,7].

Основной проблемой навигации и позиционирования является оценка состояния, и точный сбор информации о наблюдениях, в особенности для ведущего аппарата в группе. Большинство существующих методов позиционирования AUV включают улучшенные алгоритмы навигации на основе фильтра Калмана (KF) в сочетании с данными измерений от подводных навигационных датчиков. Модель совместной системы локализации AUV часто является нелинейной. Поэтому для оценки состояния обычно используется расширенный фильтр Калмана (EKF) [8,9,10].

В настоящее время использование гидроакустических устройств связи для получения относительных наблюдений является наиболее эффективным и надежным методом измерения. Однако AUV используются в сложных морских средах, где на измерительные датчики могут повлиять неблагоприятные условия, приводя к неизвестным ошибкам измерительной системы. Это неизбежно приводит к снижению точности и стабильности процедуры фильтрации.

Среди существующих решений по задаче позиционирования выделяется работа [11], где рассматривалась система комплексирования информации с датчиков, среди которых данные наклонных дальностей от трех гидроакустических буев, расположенных на поверхности. Аналогичная задача представлена в [12], но задействованы уже четыре буя. В представленных источниках можно выделить существенные недостатки: отсутствие параметров для настройки фильтра и методологии комплексирования информации с датчиков. Более того, не приведены метрики качества по ошибкам работы фильтра, от чего трудно определить степень точности работы алгоритмов восстановления состояния.

Для решения вышеуказанных проблем необходима разработка алгоритма фильтрации при помощи EKF с учетом шумовых параметров датчиков. В настоящей работе будет принято использование двух буев с ультракороткой базой для обеспечения позиционирования подводного аппарата при комплексировании информации с датчиками инерциальной навигации, допплеровским лагом и глубинометром.

**MATERIALS AND METHODS**

**AUV NAVIGATION SYSTEMS**

In contrast to airborne or ground-based drones, AUVs are dealing with a uniquely difficult navigational problem due to the lack of high-precision satellite navigation underwater. Of course, for remotely piloted vehicles, additional navigation information (position, speed) may be sent to the vehicle via fiber optic cable. However, for unmanned submersibles without cable communication, this is almost impossible to be implemented in practice [13,14].

There are three main methods of AUV navigation in the literature: dead reckoning and inertial navigation, acoustic navigation and geophysical navigation methods [15].

The first method is based primarily on the inertial navigation equipment, which has become financially affordable, especially after the creation of microelectromechanical systems (MEMS).

Since measurement errors of inertial navigation equipment are monotonically increasing and unlimited, other aids (e.g., differential global positioning system for position estimation, Doppler velocity log or correlated speed log for velocity estimation; pressure sensors for depth estimation, etc.) must be integrated to improve positioning system accuracy [16].

Acoustic navigation is based on using the AUV transponder's acoustic signals to determine its position. The most common methods are the long baseline, which uses at least two widely separated transponders mounted usually on the seafloor; and the ultra-short baseline, which uses GPS-calibrated transponders on an accompanying surface vessel. Both methods have limited range (about 10 km for individual LBLs, about 4 km in deep water, while less than 0.5 km in shallow water for USBL networks). Because LBL requires the installation of beacons, its applicability is limited to missions performed in stationary locations (e.g., harbor defense). In addition, beacon installation and maintenance are complicated and expensive operations. USBL may not be applicable in some military applications because of tactical limitations, as it requires an accompanying vessel [17].

As can be seen in Fig. 1, it is necessary to provide measurements fusion of different sensors in order to estimate AUV position together with errors.

**GYROSCOPE**

**ACCELEROMETER**

**PRESSURE SENSOR**

**DOPPLER VELOCITY LOG**

**GPS**

**EXTENDED KALMAN FILTER**

,

,

Figure 1 – Fusion and filtering scheme for sensor readings

The most commonly used method of obtaining absolute position information underwater is through the buoys. These buoys are in known locations and the AUV receives the range and/or azimuth to several of them and then calculates its position through trilateration or triangulation. Based on the location of the transceivers, three different basic systems can be distinguished: Long Baseline System (LBL), Short Baseline System (SBL) and Ultra Short Baseline System (USBL) [18,19].

A typical configuration for a standard long baseline is shown in Figure 2(a). Two or more buoys are deployed around the perimeter of the area in which the AUV will operate. These buoys are anchored and float on the surface or, especially in deeper waters, several meters above the seafloor. Each unit receives acoustic requested pings from a common receiving channel. После получения запросного пинга от AUV, каждый блок ждет уникальное специфическое время ответа TAT, а затем посылает в ответ пинг на своем отдельном канале передачи. AUV затем получает ответный пинг. Канал передачи, а также ТАТ различны для каждого блока. Уникальный ТАТ гарантирует, что два буя не будут смешиваться при передаче в одно время, и с использованием различных частот передачи буи обеспечивают способ определения для AUV, из какого блока был отправлен ответный пинг.

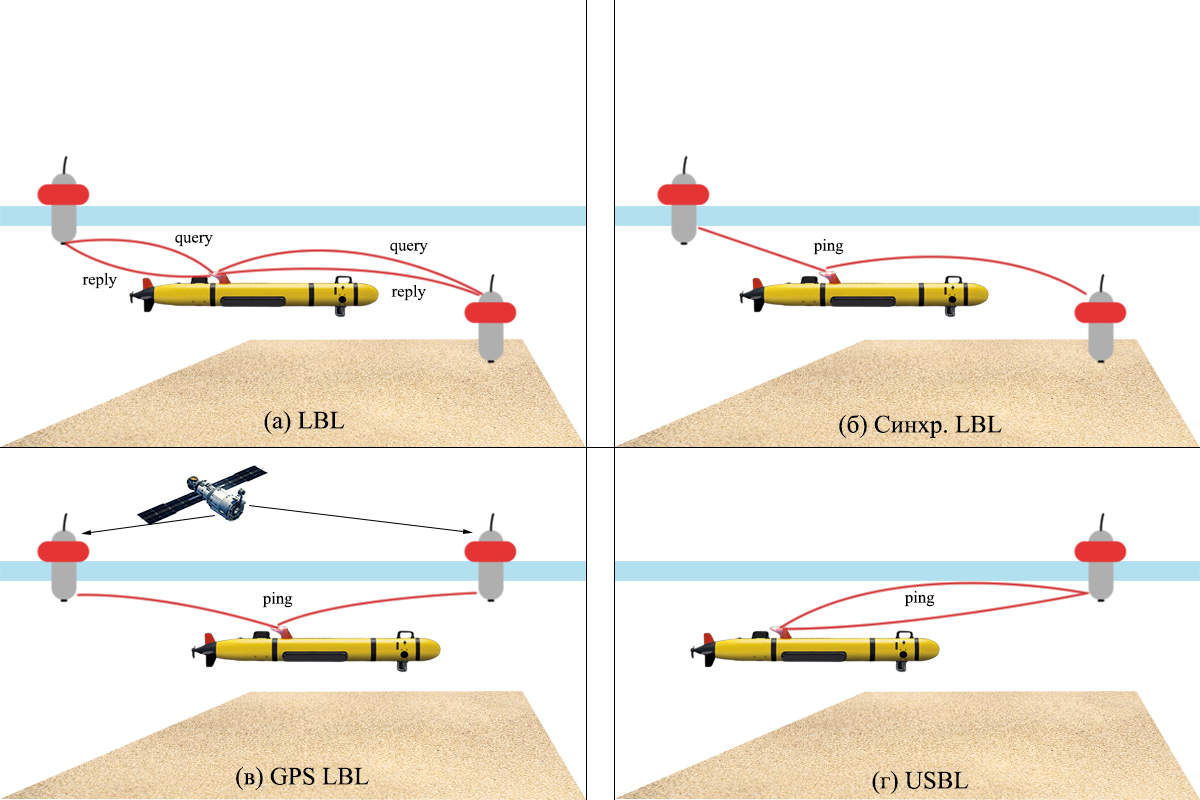


Figure 2 – Buoy-based underwater positioning methods

The standard LBL systems mentioned earlier are not well suited for large groups, as only one AUV can access the buoy network at a time and receive position updates. Therefore, the position update interval increases with the number of vehicles.

New LBL systems like the one shown in Fig. 3(b), synchronized the clocks of the buoys and the AUV transceiver units. The buoys broadcast a ping containing a unique identifier at certain intervals. When the AUV receives this ping, the known beacon broadcast schedule and the timing of the synchronized clocks ensure that the vehicle knows when the ping was sent and can directly calculate the OWTT (one-way travel-time).

Another improvement over conventional LBLs is the system shown in Fig. 3(c). Relying on the setup in Fig. 3(b), the buoys now transmit their GPS positions along with a unique identifier. As with the system described earlier, the AUV does not need to send queries to the buoys. With the buoy positions embedded in the ping, the buoys are free to swim, and there is no need to save their coordinates to the AUV before deployment.

**Slant Ranges Usage**

If there are two or more buoys, it is possible to reconstruct information about the location of the modem-object using the slant range mechanism to recalculate the position in the global coordinate system by GPS or GLONASS.

Two buoys are considered in the task. Their locations at longitudinal, lateral and vertical displacements are determined by the and vectors. Assuming that the depth is constant (without considering wave perturbations), it is possible to neglect the and values, obtaining the positions in the plane and .

The possibility to obtain slant range to the underwater vehicle will allow to calculate its position, but preliminary requires knowledge of its depth (assuming that the pressure sensor is always working) to determine the projection of the range on the XY plane. Denoting the slanted ranges as and , expressions for their plane projections are obtained

Further, the positioning problem is reduced to the geometric problem of finding intersection points between two circles whose centers are the buoy positions, and whose radii are the projections found earlier ( and ).

The distance between the circles allows to use the cosine theorem

The possible positions of the submersible are now defined by the expression

where – unit vector between the first and the second center,

– perpendicular to the unit vector.

The duality of solving the equation is resolved if the previous underwater vehicle position is known. In this case, it is necessary to choose the point closest to the last vehicle position (Fig. 3).

****

Figure 3 – Slant ranges geometry

**UNDERWATER VEHICLE MODEL DESCRIPTION**

General coordinates of an autonomous underwater vehicle (AUV) are determined in a geocentric coordinate system using SNAME notation [20,21]:

where determines the longitudinal, lateral, and vertical positions, respectively, and the vector determines the Euler angles: roll, pitch, and yaw, respectively.

The velocity vector is expressed in the coordinate system associated with the body. The velocities according to the notation announced above should be written as

Under the influence of hydrodynamic effects caused by the aquatic environment, it is possible to write down the expression for the underwater vehicle dynamics in the following form

where – the solid body inertia matrix ( is the DoF number),

– added mass matrix,

– solid body Coriolis matrix,

– added mass Coriolis matrix,

– dissipative coefficients matrix,

– gravitational forces and moments vector,

– vector (of forces and moments) of the controls applied to the body,

– vector (of forces and moments) of external disturbances applied to the body.

In real systems, is calculated with the thruster’s models using the thruster’s distribution matrix () as

where – is a vector that describes the thrusters' load ( is the number of thrusters), and the matrix relates the thrusters' load and the forces/moments vector

The kinematics equation linking (1) and (2) is written in the form

where – the rotation matrix obtained from the Euler angles,

– the Jacobian linking the angular velocities of the world reference system and the body system.

The rotation matrix is defined by the following expression

Given , it is possible to write the state vector

The latter equation can be represented in the State-Dependent Coefficients (SDC) form [13]

,

, .

where – dynamics matrix,

– control matrix,

– output matrix ( – number of system outputs),

– input-output coupling matrix,

– control vector, including the vector of external perturbations .

**DESCRIPTION OF THE KALMAN FILTER MODEL**

Consider the problem of constructing a filter for a nonlinear system, known as an extended Kalman filter. It allows to estimate the controlled object state, even if the dimensionality of the state vector of the system under study exceeds the number of measured parameters. To calculate the current state of an a priori known dynamic system, it is necessary to know its current measured state, as well as the state of the filter at the time of the previous measurement. The purpose of the filter is to minimize the sum of squared errors of the state vector estimation [8,9,10].

Taking into account the white noise of the system and the white noise of measurements , the system in SDC-form has the following view:

The state vector estimation of the Kalman filter is defined as

where – is the state covariance estimation, – is the initial value of the state covariance estimation, – is the Kalman filter gain matrix, and are the cost matrices in the Riccati equation.

Noises and must satisfy the conditions:

**NAVIGATION SYSTEM COMPONENTS**

**DESCRIPTION OF THE CONTROLLED OBJECT MMT-300**

The MMT-300 AUV is designed to perform bottom and aquatic surveys at depths of up to 300 m. Search programs (missions) can be described as AUV tacking through the surveyed area with activation of on-board search devices (one or several) at specified intervals and then returning the vehicle to the supplying vessel.

The location of the main AUV elements is shown in Fig. 4: 1 – маршевые движители, 2 – стабилизаторы, 3 – кормовой отсек, 4 – герморазъем заряда, 5 – крышка кормовая, 6 – отсек навигации и связи, 7 – антенна ГБО, 8 – отсек полезной нагрузки герметичный, 9 – крышка носовая, 10 – отсек полезной нагрузки забортный, 11 – подруливающее устройство горизонтальное, 12 – крышка отсека, 13 – радиомодуль, 14, 16 – рым грузовой, 15 – отсек автопилота, 17 – подруливающее устройство вертикальное, 18, 22 – крышка отсека полезной нагрузки, 19 – рым буксировочный, 20 – механизм аварийного балласта, 21 – доплеровский лаг, 23 – антенны ЭЛС, 24 – герморазъем связи.



Рисунок 4 – Расположение основных элементов АНПА

**Система программного управления и бортовой навигации**

Система бортового управления и навигации (СБУН) предназначена для управления всеми системами аппарата во всех режимах работы АНПА.

СБУН обеспечивает:

− выполнение заранее заложенной оператором программы-задания (миссии) АНПА с учетом имеющейся внешней обстановки;

− детектирование возникающих аварийных ситуаций и их адекватную их отработку;

− управление траекторным перемещением различных типов (движение заданным курсом/в точку в режимах стабилизации глубины/высоты над грунтом и т.п.);

− управление поисковыми средствами и иным оборудованием полезной нагрузки (вкл/выкл фотосистемы или гидролокатора бокового обзора, перевод их в различные режимы функционирования);

− комплексирование информации от магнитного компаса, датчиков ориентации, доплеровского лага, датчика глубины, а также GPS (на поверхности);

− определение результирующего местоположения АНПА в географических координатах.

Система бортового управления и навигации включает в свой состав:

− аварийные датчики и исполнительные устройства;

− магнитный компас и датчики ориентации (датчик крена, датчик дифферента, датчики угловых скоростей курса и дифферента, магнитный компас);

− радиомодуль (бортовые элементы системы радиосвязи, приемник спутниковой навигации (GPS/ГJIOHACC) и проблесковый светомаяк);

− датчик глубины;

− доплеровский лаг, имеющий следующие характеристики:

− частота – 700 кГц;

− максимальное отстояние от грунта – 60 м;

− диапазон измеряемых скоростей – 0 …2 м/с;

Магнитный компас и датчики ориентации предназначены для определения магнитного курса, крена и дифферента АНПА и используются для обеспечения траекторного движения АНПА.

Доплеровский лаг предназначен для определения вектора абсолютной скорости АНПА.

Система радиосвязи предназначена для обеспечения связи АНПА-судно со скоростью не менее 10 МБит на дистанции до 400 м (при нахождении АНПА на поверхности).

Приемник спутниковой навигации (GPS/TJIOHACC) предназначен для определения географических координат АНПА при нахождении его на поверхности.

**Движительно-рулевой комплекс**

Движительно-рулевой комплекс (ДРК) является программно-управляемым исполнительным устройством. В АНПА использована схема движительного комплекса из четырёх кормовых маршевых реверсивных движителей и двух подруливающих движителей горизонтального и вертикального каналов. Кормовые движители расположены попарно в горизонтальной и вертикальной плоскостях под углом 22,5° к продольной оси аппарата. Такая движительная схема позволяет создать произвольные упоры и моменты для управления АНПА, а также реализовывать различные режимы движения.

Управление движением АНПА осуществляется по пяти степеням свободы. Диапазон допустимых значений для заданных продольной скорости составляет 0─2,0 м/с.

Заглубление с поверхности воды АНПА осуществляется с использованием вертикального подруливающего устройства (ВПУ). Далее погружение АНПА выполняется под управлением маршевых движителей.

**Гидроакустическая система навигации и связи (опция)**

ГАНС обеспечивает слежение за аппаратом, а также периодическую коррекцию в определении бортовых координат АНПА. Погрешность определения дистанции значительно зависит от гидрологических условий района работ, а также от погрешности заданной скорости звука. При отсутствии ГАНС АНПА использует счисление (с использованием показаний магнитного компаса (МК), датчика глубины (ДГ) и доплеровского лага (ДЛ)) и GNSS (на поверхности) для определения собственных координат.

Характеристики ГАНС сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Характеристики ГАНС

|  |  |
| --- | --- |
| Наименование параметров | Значение параметров |
| Рабочая глубина, м | до 300 |
| Дальность действия (наклонная), км | до 3,5 |
| Погрешность измерения наклонной дальности, м | не более 0,01 |
| Рабочая частота, кГц | 18 … 34 |
| Погрешность измерения пеленга, град | 0,1 |
| Скорость передачи данных, кбит/с | до 13,9 |

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ MMT-300**

Основные параметры подводного аппарата MMT-300 сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Параметры AUV

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Масса, | Длина, | Радиус, | Вектор центра масс, | Вектор центра плавучести, | Плавучесть, |
| 150 кг | 3.081 м | 0,147 м |  |  | , Н |

**Матрица распределения движителей**

Зная геометрические и физические параметры движителей, возможно определить матрицу распределения движителей (4) по следующему выражению

где – это сила, создаваемая -м движителем,

– это геометрическое положение точки создаваемой силы -го движителя относительно центра масс подводного аппарата.

Стоит отметить, что силы, создаваемые движителями ММТ-300, зависят от программного управления, что приводит выражение (9) к параметрической форме

где – это программный код управления.

По рис. 5 возможно определить значения , которые представлены в таблице 3.



Рисунок 5 – Геометрические параметры центра масс MMT-300

Таблица 3 – Моменты рычагов 6 движителей ММТ-300

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Thruster № | , (mm) | | |
| , (mm) | , (mm) | , (mm) |
| 1 | -1330 | 0 | 189 |
| 2 | -1330 | 159 | 30 |
| 3 | -1330 | 0 | -129 |
| 4 | -1330 | -159 | 30 |
| 5 | 1330 | 0 | 30 |
| 6 | 882 | 0 | 30 |

Так как все движители одинаковы по строению, то они создают единую силу, зависящую от программного кода управления . При этом определяются с учетом геометрии объекта управления как

, ,

, ,

, .

По статической характеристике движителей (рис. 6) возможно записать функциональную зависимость между кодом управления и создаваемой силой, например при помощи полинома шестого порядка



Рисунок 6 – Статическая характеристика движителей MMT-300

Имея определенные выше зависимости, возможно определить из выражения (10), что позволит определить выражение для сил и моментов (4) уже в параметрической форме . Причем здесь определяет процентаж нагрузки движителей. При полной работоспособности .

**Матрица инерции и присоединенных масс**

Матрица в уравнении (6) константная, симметричная и положительно определенная (). Величины, наполняющие ее, во многом зависят от формы рассматриваемого объекта и в самом общем случае имеет следующий вид [20,21]

где – масса твердого тела,

– это единичная матрица размерности ,

– это тензор инерции в системе отсчета данного тела,

– вектор от начала координат до центра тяжести твердого тела,

– оператор преобразования вектора в кососимметричную матрицу:

в развернутом виде:

Тензор инерции для полнотелого цилиндра определяется как

Матрица представляет собой производные от элементов внешних сил и моментов, и в компонентном виде записывается как [21]

,

где , и т.д.

Учитывая аппроксимацию подводного аппарата симметричной формой, запись матрицы сильно упростится и примет диагональный вид:

Единственного верного способа вычисления элементов матрицы нет, поэтому, как правило, используют ряд оценочных методов. Для полнотелого цилиндра массой , длиной , радиусом присоединенные массы (15) определяются как [20]

**Матрица Кориолиса**

По Фоссену [21] матрица в общем случае определяется из блоков матрицы инерции . В данном случае , тогда

Помимо этого, возможен аналогичный, более комплексный способ расчета , без знания матрицы инерции :

Матрица с учетом упрощений записывается следующим образом:

Нетрудно заметить, что здесь состоит из диагональных элементов матрицы и компонентов вектора скоростей.

По Фоссену [21] матрица в общем случае определяется из блоков матрицы инерции . В данном случае , тогда

**Вектор гравитации и плавучести**

В работе [21] для расчета автор использует выражение

где – масса судна включая воду в пространстве,

– ускорение свободного падения,

– выталкивающая сила,

где – плотность жидкости,

– объем жидкости, вытесняемой судном,

, , – компоненты вектора от начала координат до центра плавучести твердого тела.

**Демпфирующие силы**

Рисунок 7 – Схема распределения демпфирующих сил

Сила сопротивления/подъемная сила рассчитывается с помощью

– коэффициент сопротивления,

– коэффициент подъемной силы,

– плотность среды,

– скорость тела в жидкости,

– площадь поверхности, относительно течения,

– площадь поверхности, перпендикулярной течению,

Коэффициенты для цилиндрической аппроксимационной формы AUV приведены в работе [22]. Для заданной пропорции длины и радиуса, соответствующий коэффициент равен .

Коэффициент определяется относительно геометрии носовой части AUV. В данном случае наиболее близка форма полусферической чаши. В работе [23] приведено соответсвующее значение .

Фронтальная и боковые площади определяются исключительно по базовым геометрическим параметрам подводного аппарата по следующим выражениям:

(м2).

(м2).

Силы, создаваемые при движении цилиндрического тела , приблизительно определяются как

Моменты, создаваемые при движении цилиндрического тела, приблизительно определяются как

Силы демпфирования, с учетом рассчитанных параметров определяются как

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БУЯ**

Схема, задействованных в работе буев приведена на рис. 8. Их параметры сведены в таблицу 4.

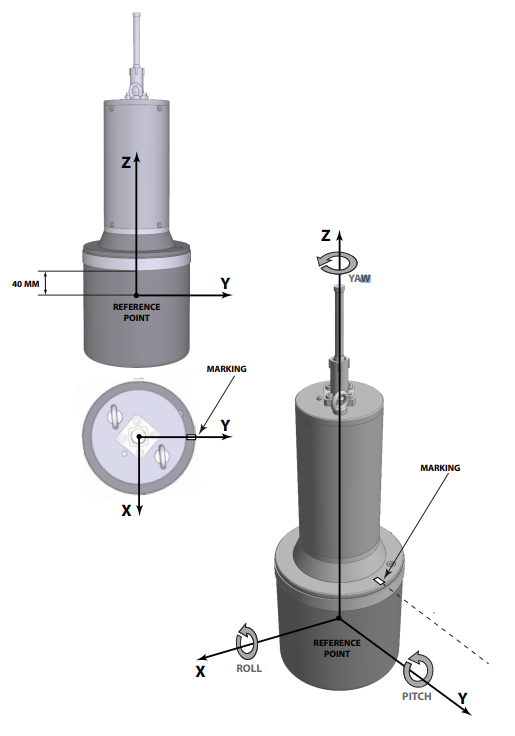


Рисунок 8 – Схематичное изображение буя в своей системе координат

Таблица 4 – Параметры буев

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| Масса, | Длина, | Радиус, | Вектор центра масс, | Вектор центра плавучести, | Плавучесть, |
| 12 кг | 0.36 м | 0,08 м |  |  | 17, Н |

Учитывая, что буй имеет цилиндрическую форму, возможно описать его динамику аналогично MMT-300, за исключением того, что тензор инерции повернут и определяется как

**ОПИСАНИЕ БОРТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ**

Ни один прибор не может производить измерение идеально, то есть без погрешностей. Погрешность – разница между истинным значением величины и фактическим, измеряемым прибором. Погрешности приборов делятся на случайные и систематические составляющие. Случайные составляющие также называются случайными ошибками измерений. Их конкретную реализацию к тому или иному моменту времени нельзя предсказать, можно лишь описать общий вид их поведения. Математическая модель случайных составляющих определяется как последовательность суммы отсчетов белого шума с отсчетами процесса Маркова или фликкер-шума [24]. Определение характеристик случайных процессов позволяет верно описать их динамику при интеграции ИНС с другими датчиками, повысив качество фильтрации.

**Инерциальные датчики**

Исследуем потенциальную величину ошибки навигации, вносимую случайными погрешностями датчиков при работе в автономном режиме.

При комплексировании ИНС с другими датчиками смещения нулей акселерометров и гироскопов включаются в вектор оцениваемых параметров: это позволяет учесть их случайную составляющую, которая является основным источником ошибок позиционирования после компенсации других систематических погрешностей. Наибольший эффект на смещение нулей МЭМС-датчиков оказывает температура, в то же время её влияние на неортогональности осей и погрешности масштабных коэффициентов ограничено.

Выходной вектор измерений скорости от блока трех-осевого акселерометра моделируется как

,

где , – СКО ошибки акселерометра, – смещение акселерометра, которое моделируется как марковский процесс 1-го порядка.

Аналогично, фактический выход гироскопа определяется как

,

где , – СКО ошибки гироскопа, – смещение гироскопа, которое моделируется как марковский процесс 1-го порядка.

**Глубинометр**

Глубина и подводное давление имеют прямую зависимость. По мере углубления аппарата в воду показания давления линейно увеличиваются.

Фактический выход датчика глубины моделируется путем добавления шума к действительной глубине

,

где , – СКО ошибки по глубине.

СКО по глубине для используемого датчика приблизительно определяется как м, тогда дисперсия равна м.

**Допплеровский лаг**

Доплеровский лаг измеряет изменение акустической частоты для определения скорости транспортного средства относительно морского дна. Фактический выход допплеровского лага моделируется путем добавления шума к действительной скорости аппарата

,

где , , – СКО ошибки по скорости.

Необходимо установить дисперсию для переменной состояния — скорости аппарата. Мы знаем, что максимально измеряемая скорость передвижения — . Но начальное значение скорости нам неизвестно. Поэтому, мы выберем изначальное значение переменной — 0 м/с, а среднеквадратичное отклонение, по правилу «трёх сигм» . Соответственно, дисперсия определяется как

м/с.

Для допплеровского лага MMT-300 параметр м/c.

**GPS**

При моделировании показаний приемника СНС положим, что точность разрешения горизонтальных координат выше, чем вертикального канала. На практике данный эффект известен как VDOP (Vertical Dillusion Of Precision – снижение точности по вертикали). Также учтем эффект запаздывания решения относительно данных ИНС – . Данное запаздывание может быть вызвано буферизацией данных в приемнике и задержками при обработке сигналов, которые часто возникают при использовании в качестве источника данных недорогих приемников СНС или смартфона на базе операционной системы Android. По причине вариативности такой задержки её целесообразно включать в вектор состояния фильтра и динамически оценивать в процессе работы алгоритма. Тогда модель показаний приемника СНС примет вид:

,

где , , , а , – СКО ошибок по горизонтали и вертикали.

**КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИИ С ДАТЧИКОВ**

Согласно рис. 1 требуется осуществлять комплексирование информации с датчиков при формировании вектора измерений для последующей фильтрации. Существует множество методов объединения показаний датчиков.

В сфере телекоммуникаций объединение с максимальным отношением (MRC) — это метод объединения данных, при котором: сигналы каждого канала суммируются, коэффициент усиления каждого канала устанавливается пропорциональным среднеквадратичному уровню сигнала и обратно пропорциональным среднеквадратичному уровню шума в этом канале.

Объединение с максимальным отношением является оптимальным средством комбинирования для независимых каналов с аддитивным белым гауссовским шумом.

Вектор измерений в настоящей работе имеет следующий вид

,

где , , , , , , .

**МОДЕЛИРОВАНИЕ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ**

При программной имитации процесса фильтрации рассматривается следующая ситуация: аппарат ММТ-300 совершает движение к заданной точке, на поверхности воды при этом располагаются два гидроакустических буя. Влияние поверхностного течения учитывается, влияя на смещение буев. Если ошибка измерения больше оценки неопределенности состояния, то фильтр будет больше “доверять” данным моделирования. Именно поэтому важно правильно подобрать значения ковариационных матриц — основного инструмента настройки фильтра. При заданных параметрах шумов измерительных устройств, параметры EKF представлены ниже:

, ,

,

.

Предполагается, что при комплексировании информации датчиков используется допплеровский лаг в силу небольшого отстояния от морского дна. Также, стоит отметить, что для моделирования дискретного характера измерительных устройств используются экстраполяторы нулевого порядка с частотами обновления, представленными в таблице ниже.

Таблица 5 – Частоты обновления данных с датчиков

|  |  |
| --- | --- |
| Измерительное устройство | Частота обновления |
| ИНС | 50 Hz |
| GPS | 1 Hz |
| Допплеровский лаг | 25 Hz |
| Глубинометр | 50 Hz |

Структурная схема модели системы представлена на рис. 9 и отражает основные ее составляющие: гидроакустические буи для получения наклонных дальностей до AUV, контроллер для посыла управляющих сигналов, блок динамики/кинематики подводного аппарата и блок комплексирования сигналов с датчиков.

*Расширенный фильтр Калмана*

*Динамика и кинематика ММТ-300*

Рисунок 9 – Структурная схема системы позиционирования

Результаты моделирования представлены ниже. Начальное состояние подводного аппарата при этом определяются нулевыми. На рис. 10 отображены траектории подводного аппарата и гидроакустических буев.

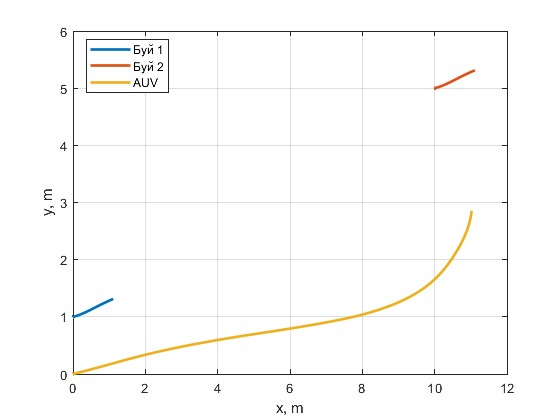


Рисунок 10 – XY положение буев и AUV

Графики выхода системы приведены на рис. 11. Здесь очевидны погрешности измерительных датчиков: заметны шумы и высокие частоты обновления. Результаты работы фильтра Калмана для восстановления состояния приедены на рис. 12 и показывают более приемлемые результаты относительно действительных данных.

Более корректную оценку работы фильтра возможно произвести по ошибке относительно действительных данных (рис. 13). Количественная оценка уже определяется метриками качества. MSE, MAE и RMSE метрики сведены в таблицу 6.

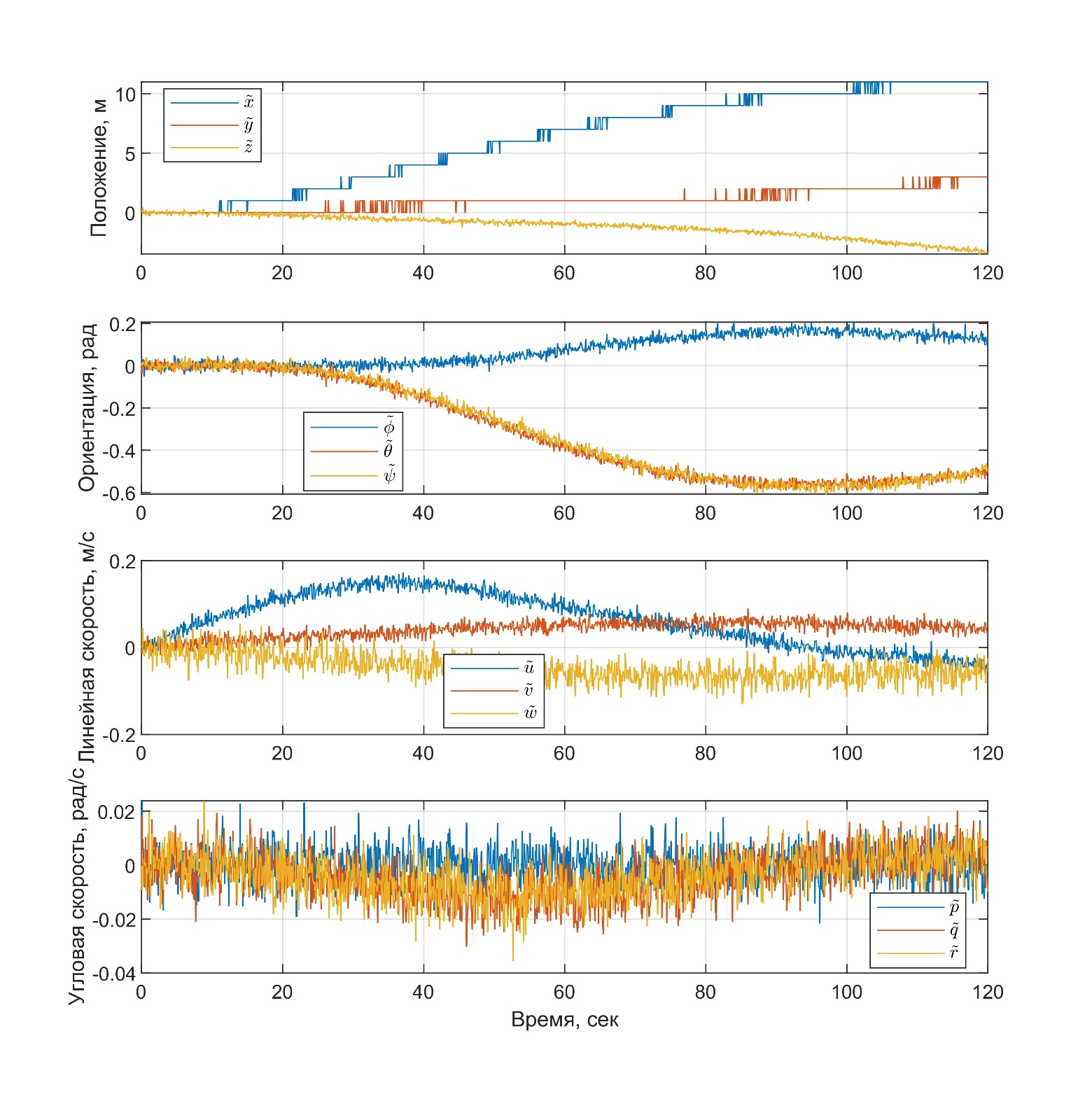


Рисунок 11 – Графики измерений

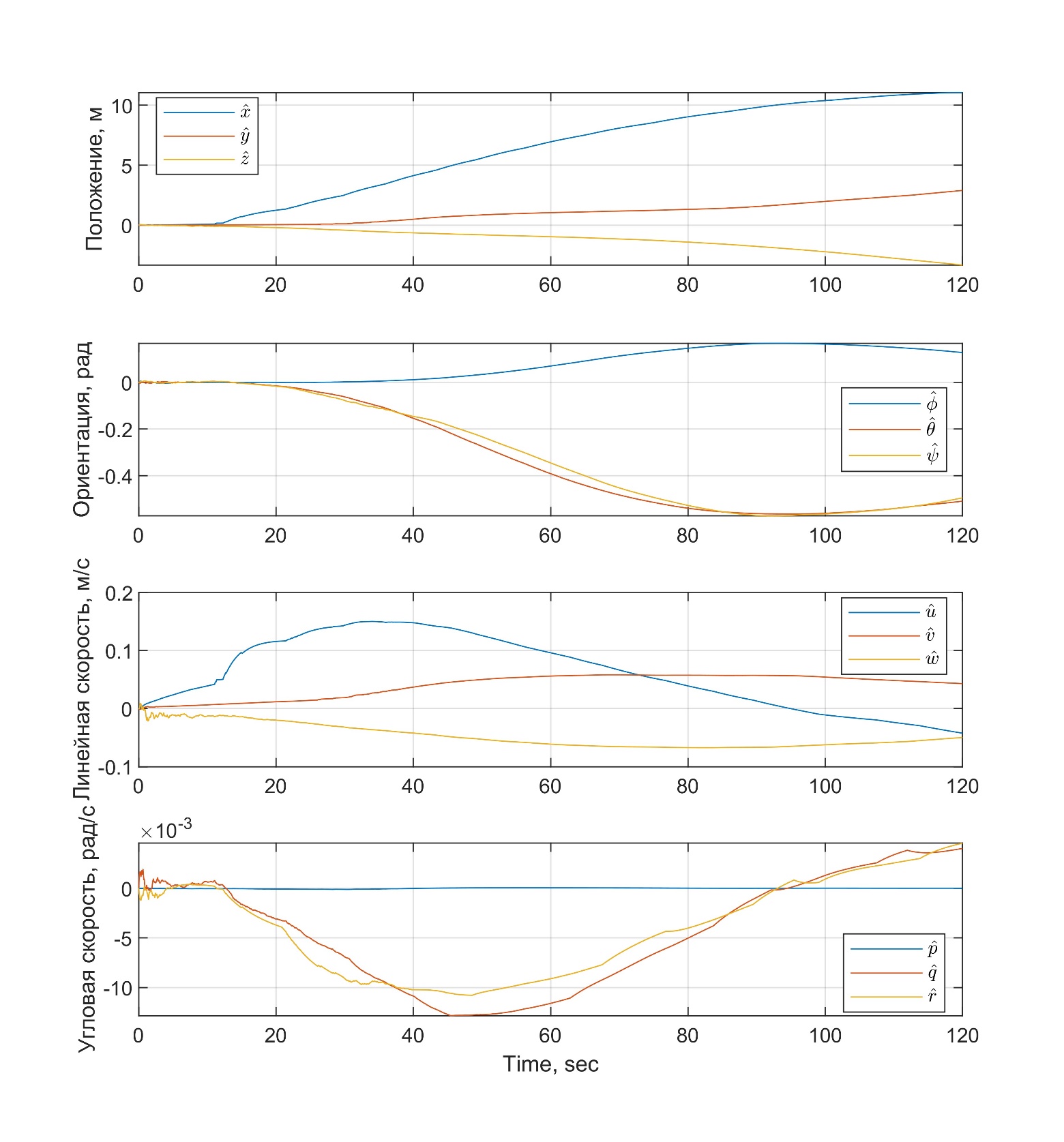


Рисунок 12 – Графики оценки EKF

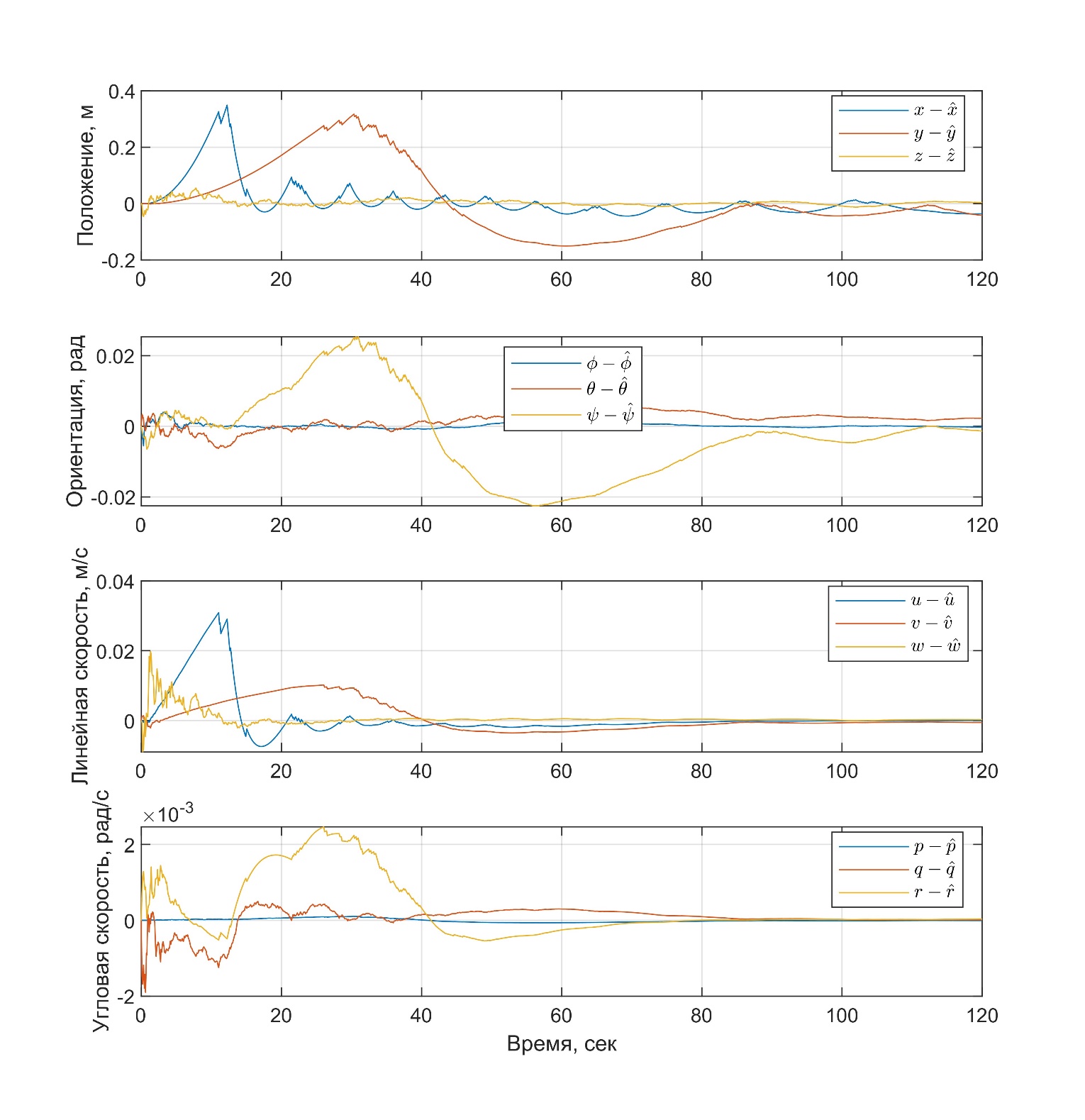


Рисунок 13 – Графики ошибок оценки EKF относительно действительных данных

Таблица 6 – Метрики качества

|  |  |
| --- | --- |
| Метрика | Величина |
| MSE () |  |
| MSE () |  |
| MAE () |  |
| MAE () |  |
| RMSE () |  |
| RMSE () |  |

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Основная цель настоящего исследования заключалась в разработке подходов и решений, позволяющих обеспечить качественную навигацию в автономном режиме с использованием ИНС на базе MEMS-датчиков грубого класса точности. В ходе выполнения исследования была разработана имитационная модель движения подводного робота. Все предложенные алгоритмы и подходы были протестированы с помощью средств имитационного моделирования и с использованием натурных данных.

Поставленная цель была достигнута: показана практическая возможность достижения приемлемого качества навигации в автономном режиме с использованием ИНС грубого класса точности. Ошибка позиционирования оказывается ограниченной на длительном временном интервале даже при условии начала движения из большой области начальной неопределенности.

Дальнейшие исследования будут направлены на формирование управляющих законов для роя подводных аппаратов относительно ведущего, т.к. основной проблемой кооперативной навигации и позиционирования до сих пор остается оценка состояния, и точный сбор информации о наблюдениях, в особенности для ведущего элемента.

**СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Miller A., Miller B., Miller G. Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System // Drones. 2021. Т. 5. № 3. С. 83.
2. Li J. и др. Research on Error Correction Technology in Underwater SINS/DVL Integrated Positioning and Navigation // Sensors. 2023. Т. 23. № 10. С. 4700.
3. Otero P. и др. Underwater Positioning System Based on Drifting Buoys and Acoustic Modems // JMSE. 2023. Т. 11. № 4. С. 682.
4. Li P. и др. A Robust INS/USBL/DVL Integrated Navigation Algorithm Using Graph Optimization // Sensors. 2023. Т. 23. № 2. С. 916.
5. González-García J. и др. Autonomous Underwater Vehicles: Localization, Navigation, and Communication for Collaborative Missions // Applied Sciences. 2020. Т. 10. № 4. С. 1256.
6. Kebkal K. G., Mashoshin A. I. AUV acoustic positioning methods // Gyroscopy Navig. 2017. Т. 8. № 1. С. 80–89.
7. Pacini F. и др. Integrated comunication network for underwater applications: the SWARMs approach // 2018 Fourth Underwater Communications and Networking Conference (UComms). Lerici: IEEE, 2018. С. 1–5.
8. Zhao L. и др. An Adaptive Filtering Method for Cooperative Localization in Leader–Follower AUVs // Sensors. 2022. Т. 22. № 13. С. 5016.
9. Zhang F., Wu X., Ma P. Consistent Extended Kalman Filter-Based Cooperative Localization of Multiple Autonomous Underwater Vehicles // Sensors. 2022. Т. 22. № 12. С. 4563.
10. Sheng G. и др. Cooperative Navigation Algorithm of Extended Kalman Filter Based on Combined Observation for AUVs // Remote Sensing. 2023. Т. 15. № 2. С. 533.
11. Almeida J. и др. Underwater Localization System Combining iUSBL with Dynamic SBL in ¡VAMOS! Trials // Sensors. 2020. Т. 20. № 17. С. 4710.
12. Huang J. An Underwater Target Tracking Algorithm Based on Extended Kalman Filter // Mobile Information Systems. 2023. Т. 2023. С. 1–12.
13. Kabanov A. и др. Cooperative Control of Underwater Vehicle–Manipulator Systems Based on the SDC Method // Sensors. 2022. Т. 22. № 13. С. 5038.
14. Kabanov A., Kramar V. Marine Internet of Things Platforms for Interoperability of Marine Robotic Agents: An Overview of Concepts and Architectures // JMSE. 2022. Т. 10. № 9. С. 1279.
15. Luo Q. и др. A SINS/DVL/USBL Integrated Navigation and Positioning IoT System with Multiple Sources Fusion and Federated Kalman Filter. : In Review, 2021.
16. Miller A., Miller B., Miller G. Navigation of Underwater Drones and Integration of Acoustic Sensing with Onboard Inertial Navigation System // Drones. 2021. Т. 5. № 3. С. 83.
17. Morvan P.-Y., Bagot G. Innovative software solutions for subsea positionings. : pico, 2021.
18. Caiti A. и др. Experimental results with a mixed USBL/LBL system for AUV navigation // 2014 Underwater Communications and Networking (UComms). Sestri Levante, Italy: IEEE, 2014. С. 1–4.
19. Kebkal K. G. и др. Experimental Performance of a Hydro-Acoustic USBL-Aided LBL Positioning and Communication System // IFAC Proceedings Volumes. 2012. Т. 45. № 5. С. 249–254.
20. Antonelli G. Underwater Robots. Cham: Springer International Publishing, 2014.
21. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control =: Vademecum de navium motu contra aquas et de motu gubernando. Hoboken, NJ: Wiley, 2021. Вып. Second edition.
22. Blevins R. D. Applied fluid dynamics handbook. Malabar, Fla: Krieger Pub, 2003. Вып. Reprint ed. with corrections. 558 с.
23. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19930091586>
24. Quinchia A. и др. A Comparison between Different Error Modeling of MEMS Applied to GPS/INS Integrated Systems // Sensors. 2013. Т. 13. № 8. С. 9549–9588.