

# ИССЛЕДОВАНИЕ, ИЗГОТОВЛЕНИЕ КОРАБЕЛЬНОГО ЦИФРОВОГО МАГНИТНОГО КОМПАСА И ПРИМЕНЕНИЕ ФИЛЬТРА КАЛМАНА ДЛЯ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАШУМЛЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ ДАННОГО КОМПАСА

Ву Суан Хау<sup>1,3</sup>, В. Э. Иванов<sup>1</sup>, С. И. Кумков<sup>1,2</sup>, Нгуен Динь Тхач<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт радиоэлектроники и информационных технологий (ИРИТ–РТФ),  
Уральский Федеральный Университет, г. Екатеринбург, ул. Мира, 32

<sup>2</sup> Институт математики и механики им. Н.Н. Красовского,

Уральское отделение Российской академии наук, г. Екатеринбург, Россия

<sup>3</sup> Вьетнамский морской университет (ВМУ), ул. Лакчай, 484, Хайфон, Вьетнам

Статья поступила в редакцию 14 мая 2019 г.

**Аннотация.** Компас – особо важное устройство на корабле. С помощью компаса оператор может определить правильное направление судна, что способствует экономии топлива и безопасности. Компас впервые был изобретён в Китае при династии Сун для указания направления движения по пустыням. В настоящее время применяются в разных целях различные типы компасов: электрический, спутниковый, магнитный компас и др. Современные многофункциональные компасы с высокой надёжностью выпускают производители из Японии, России, США и др. Несмотря на наличие значительно большого выбора компасов, существующие устройства не подходят для небольших судов, их цена в многих случаях является не доступной. В этой связи исследование и изготовление цифрового магнитного компаса (ЦМК), который может подключаться к другим бортовым системам, позволяет решению экономических трудностей.

В процессе изучения конструкции цифрового магнитного компаса возникла сложность, которая представляет собой проблему фильтрации шума для цифрового магнитного компаса. В ходе экспериментального исследования авторы использовали фильтр Калмана для фильтрации шумовой информации для цифрового магнитного компаса. В процессе тестирования авторы обнаружили, что использование фильтра Калмана для фильтрации информационного шума для компаса оказалось очень эффективным.

В статье описываются результаты исследований, изготовления корабельного ЦМК и применение фильтра Калмана для фильтрации зашумленной информации от данного компаса. Результаты практических испытаний показывают, что использование алгоритма Калмана обеспечивает существенное повышение точности фильтрации. Разработанный ЦМК (с фильтром Калмана) был сертифицирован и показана его готовность к работе в реальных условиях.

**Ключевые слова:** Цифровой магнитный компас, микроконтроллер, магнитный курс, реальная зашумленная информация, фильтрация, алгоритм Калмана, выходная информация, оценки точности, ИМО, азимут, протокол I2C, данные NMEA0183.

**Abstract.** The compass is a particularly important device on the ship. Using the compass, the operator can determine the correct direction of the vessel, which contributes to fuel economy and safety. The compass was first invented in China during the Song Dynasty to indicate the direction of movement in the deserts. Currently, different types of compasses are used for different purposes: electric, satellite, magnetic compass, etc. Modern multifunctional compasses are produced with high reliability by manufacturers from Japan, Russia, the USA, etc. Despite the presence of a significantly large selection of compasses, existing devices are not suitable for small vessels, their price in many cases is not affordable. In this regard, research and manufacture of digital magnetic compass (DMC), which can be connected to other onboard systems, allows the solution of economic difficulties.

In the process of studying the design of digital magnetic compass, a difficulty arose that poses the problem of filtering noise for a digital magnetic compass. In a pilot study, the authors used a Kalman filter to filter noise information for a digital magnetic compass. In the process of testing, the authors found that using the Kalman filter to filter out information noise for a compass was very effective.

The article describes the results of research, manufacturing the DMC, and the use of the Kalman filter to filtering the noisy information from this compass. The results of practical tests show that the use of the Kalman algorithm provides significantly better

accuracy of filtration. The manufactured DMC (with the Kalman filter) was certificated and its readiness was shown for operation under real conditions.

**Key words:** digital magnetic compass, microcontroller, magnetic course, real noisy information, filtering, Kalman algorithm, output information, accuracy estimates, IMO, azimuth, I2C protocol, data NMEA0183.

## 1. Введение

При разработке и эксплуатации ЦМК важной является проблема фильтрации информации магнитного курса, содержащей шум и наводки со стороны электрических систем корабля [1, 2]. В настоящее время существует несколько математических подходов к решению задач фильтрации, в том числе Калмановская фильтрация. Однако, внедрение алгоритма Калмана для подавления информационного шума в ЦМК до сих пор не находило свое отражение в научных исследованиях.

В состав ЦМК входят магнитный датчик HMC5883 и микроконтроллер. Датчик HMC5883 представляет собой мультичиповый модуль с цифровым интерфейсом для измерений слабых магнитных полей в таких приложениях как магнитометры, компасы и т. д [3, 11]. Микроконтроллер назначен для постоянного считывания данных из модуля HMC5883 по протоколу I2C.

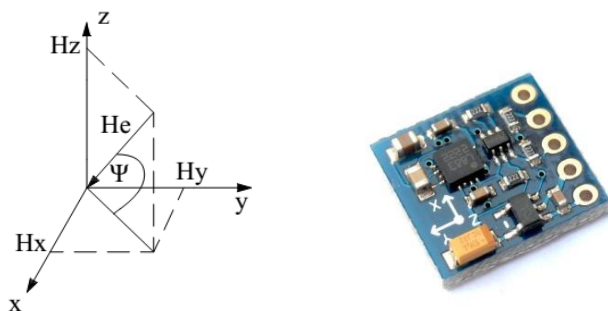


Рис. 1. Измерительная система координат и модуль HMC5883.

На рис. 1 показана измерительная система координат и общий вид модуля HMC5883.

Модуль HMC5883 включает в себя встроенный магниторезистивный датчик высокого разрешения серии HMC118x и интегральную схему

специального назначения (ASIC), содержащую: усилитель, драйвер автоматического размагничивания, схему сброса смещения и 12-битный АЦП. Это позволяет обеспечить точность определения азимута не лучше 2 градусов [3]. В модуле НМС5883 используются три датчика измерения напряженности магнитного поля Земли. Азимут компаса определяется по формуле

$$\Psi = \begin{cases} 90 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi} & \text{if } H_y > 0. \\ 270 - \arctan\left(\frac{H_x}{H_y}\right) * \frac{180}{\pi} & \text{if } H_y < 0. \\ 180 & \text{if } H_y = 0, H_x < 0. \\ 0 & \text{if } H_y = 0, H_x > 0. \end{cases} \quad (1)$$

Значение  $\Psi$  – измеренный азимут на выходе модуля НМС5883, содержит измерительную погрешность (шум), а его величина при этом описывается формулой  $\Psi = \psi + e$ , где  $\psi$  – значение измеряемого истинного азимута,  $e$  – значение погрешности.

Во время работы микроконтроллер постоянно (с заданным временным тактом) считывает выходное значение  $\Psi$  из модуля НМС5883 по протоколу I2C. При этом задачей встроенного микроконтроллера является подавление шумовой составляющей и получение отфильтрованного значения азимута. Программная память микроконтроллера содержит программу с применением формул фильтра Калмана.

Поясним общий порядок обработки с алгоритмами дискретной (по времени) фильтрации Калмана цифрового сигнала [9, 10]. При этом: измерения азимута считываются из модуля НМС5883, обрабатываются микроконтроллером по соответствующим алгоритмам, отфильтрованные данные формируются в соответствии со стандартами NMEA0183 и передаются на коммуникационный модуль RS485 внутри цифрового магнитного компаса. Блок связи RS485 передает пакет данных NMEA0183, содержащий информацию о азимуте судна, на внешние устройства индикатора (рис. 2) [12]. Общая структура ЦМК показана на рис. 2.

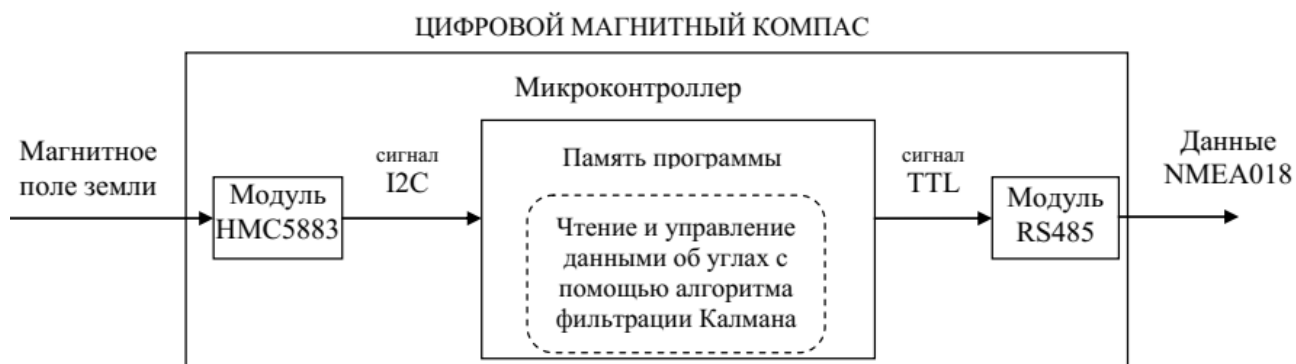


Рис. 2. Общая структура ЦМК.

В цифровом компасе фильтр Калмана производит оценивание текущего сигнала, так что среднее отклонение (между реальным значением и оценочным значением) минимально. Реализация этого алгоритма фильтрации выполняется по соответствующим уравнениям [9, 10].

Реальные эксперименты на судах с применением фильтра Калмана в разработанных ЦМК дали хорошие результаты [6, 7, 8]. По фактическим измерениям на судне было обнаружено, что если магнитный компас не использовал фильтр, то погрешность в его выходных данных могла превышать 2 градуса. При использовании фильтра Калмана погрешность выходных данных становилась менее 1 градуса. Этот уровень погрешности удовлетворяет, стандартам Международной Морской Организации (ИМО).

Статья организована следующим образом. В разделе 2 кратко рассматривается общая структура цифрового магнитного компаса, включающая фильтр Калмана. В разделе 3 описываются основные алгоритмические соотношения фильтра. Раздел 4 посвящен приборной реализации алгоритмов фильтра Калмана. В разделе 5 приводятся результаты оценки работы фильтра в составе ЦМК. Дается Заключение по работе и приводится список цитированных источников.

## 2. Структурная схема цифрового магнитного компаса

Структурная схема разработанного цифрового магнитного компаса (ЦМК) показана на рис. 3.



Рис. 3. Структура цифрового магнитного компаса (ЦМК).

ЦМК содержит следующие блоки (рис. 3):

- 1) Модуль HMC5883 измеряет магнитное поле Земли, выход модуля представляет собой зашумленные измерения азимута [3]. Модуль связывается с микроконтроллером с использованием протокола I2C.
- 2) Микроконтроллер ATMEGA8 [13] постоянно (с заданным тактом) считывает данные угла из модуля HMC5883, затем эти значения угла обрабатываются в фильтре Калмана по соответствующим алгоритмам внутри программы управления. Все необходимые программы загружены в память микроконтроллера.
- 3) Блок связи NMEA0183. Этот блок имеет основной компонент – чип Max485. Блок эффективно подавляет линейные помехи путем преобразования напряжения TTL в дифференциальное напряжение. Выходной сигнал блока представляет собой сообщение в стандартах NMEA0183, передаваемое индикаторным устройствам. На рис. 4. показан типичный пример сети связи с использованием микросхемы RS485.
- 4) Источник питания используется для преобразования судового питания 24В постоянного тока в стабильное питание 5В для микроконтроллеров и внутренних компонентов компаса.

В памяти микроконтроллера ATMTGA8 содержатся также программы управления измерениями.

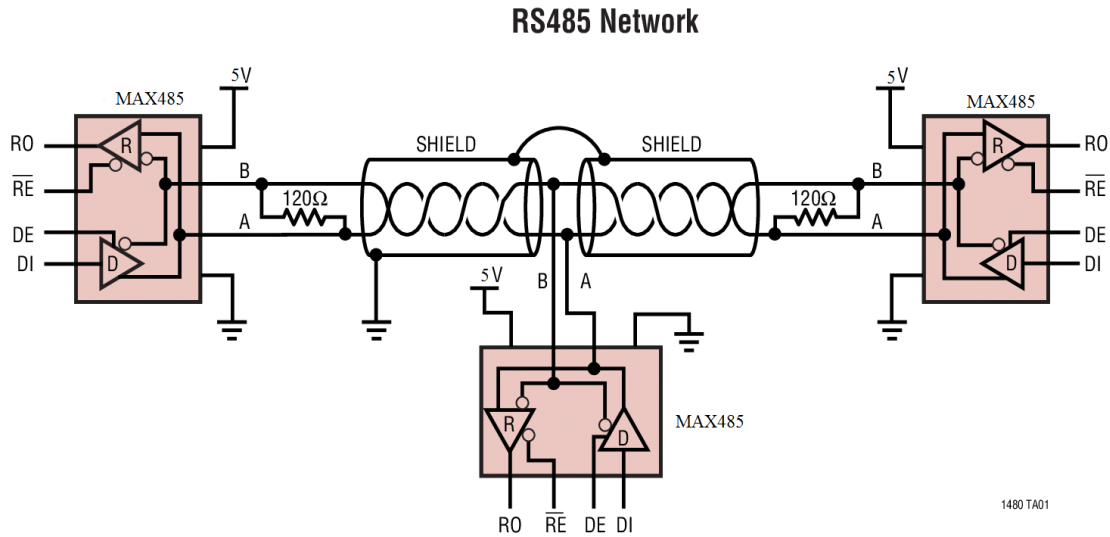


Рис. 4. Интерфейс сети связи RS485.

### 3. Результаты проектирования и реализации оборудования ЦМК

Электрическая схема ЦМК и общий вид его приборной реализации показаны на рис. 5.

].

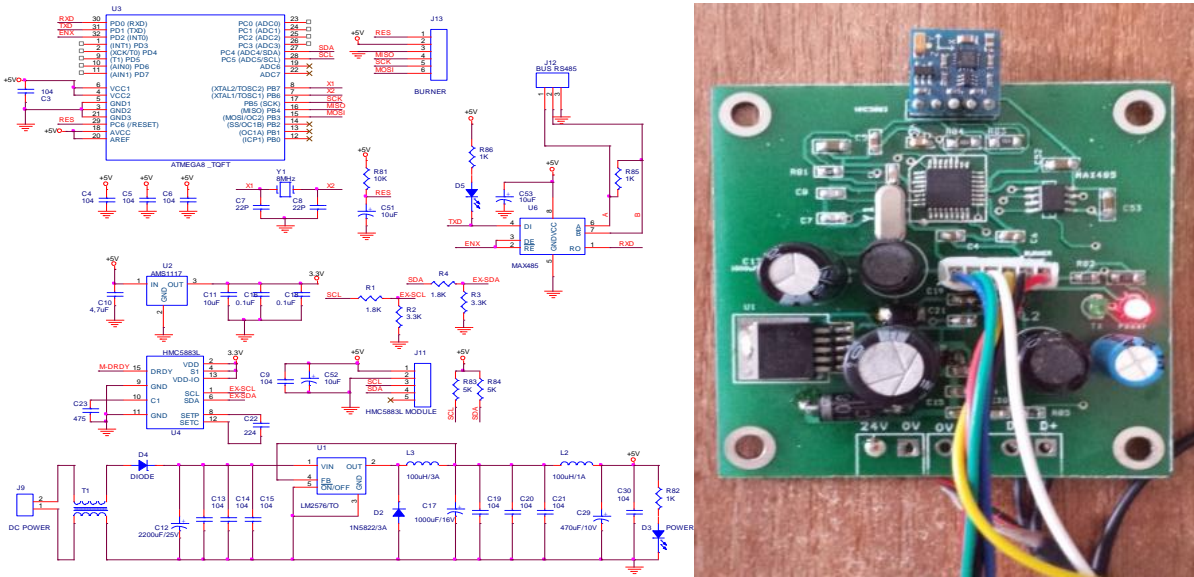


Рис. 5. Электрическая схема и общий вид приборной реализации ЦМК.

По результатам испытаний ЦМК был официально сертифицирован [6, 7]. Устройство содержит модуль датчика магнитного поля НМС5883, обычно используемый в таких устройствах, как сотовые телефоны, навигационные устройства и т.д. Чип Max485 внутри устройства преобразует данные

NMEA0183 TTL-сигнала от микроконтроллера в двухпроводный сигнал, который затем передается на другие устройства [14]. Целью использования микросхем Max485 является увеличение дальности передачи и устранение помех при передаче данных [14].

Внутри устройства используется компонент LM2576 для выработки стабильного напряжения 5В с потреблением тока до 5А [15].

Реализация механической конструкции корпуса прибора показана на рис. 6. Оборудование было изготовлено и испытано на борту морских судов в жестких условиях реальной эксплуатации.

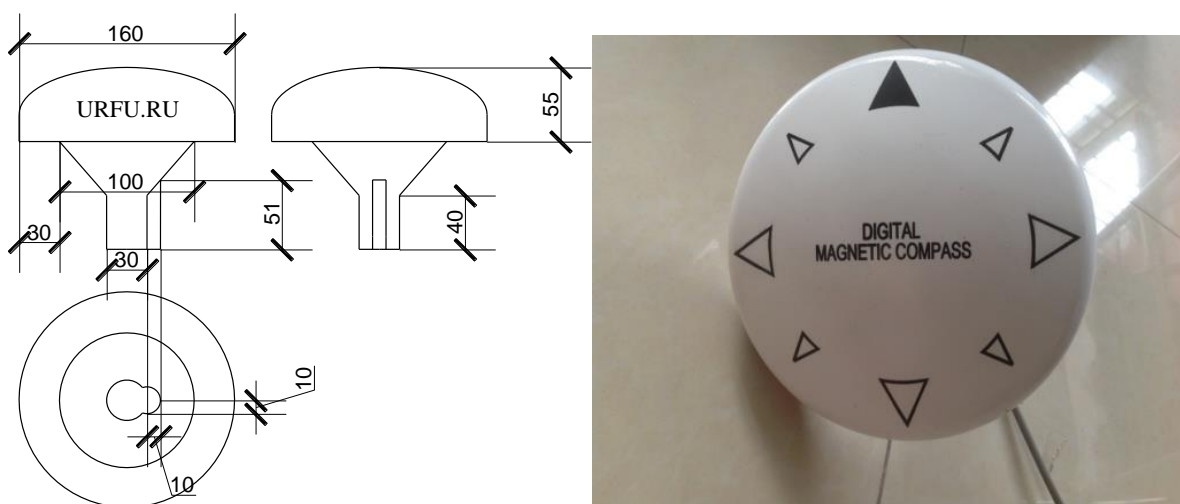


Рис. 6. Устройство цифрового магнитного компаса после изготовления

#### 4. Фильтр Калмана

Фильтр Калмана использует: динамическую модель системы (физический закон движения судна по измеряемому каналу азимута), известные управляющие воздействия и совокупность последовательных измерений для формирования оптимальной оценки состояния. Алгоритм состоит из двух циклически повторяющихся шагов: предсказание и корректировка. На первом шаге рассчитывается предсказание состояния в следующий момент времени (с учетом неточности их измерения). На втором шаге, с помощью новой информации с датчика корректируется предсказанное значение (напомним, что данная информация зашумлена измерительными погрешностями) [10]. Общая структура разработанного алгоритма фильтрации Калмана показана на рис. 7.





Рис. 7. Общая структура разработанного алгоритма фильтрации.

Уравнения представлены в матричной форме. В случае с одной фильтруемой переменной, матрицы вырождаются в скалярные величины.

Подстрочный индекс обозначает момент времени:  $k$  — текущий,  $(k-1)$  — предыдущий; знак «минус» в верхнем индексе переменных обозначает, что это предсказанное значение. Подробное описание структуры фильтра и описание его переменных представлены на рис. 8. Как показано на рис. 7 и 8, фильтрация циклически выполняется в два шага.

1) **Предсказание.** Предсказание  $\hat{x}_k^-$  состояния системы в текущий момент времени. Это значение рассчитывается на основе предыдущего отфильтрованного значения  $\hat{x}_{k-1}$  и параметров фильтра  $F, B, u_{k-1}$  по формуле

$$\hat{x}_k^- = F\hat{x}_{k-1} + Bu_{k-1}. \quad (2)$$

На первом шаге вычисляется также предсказание ошибки  $P_k^-$ . Ее расчет выполняется на оценке  $P_{k-1}$  ошибки в предыдущий момент времени с помощью матриц  $F, Q$  по формуле

$$P_k^- = FP_{k-1}F^T + Q. \quad (3)$$

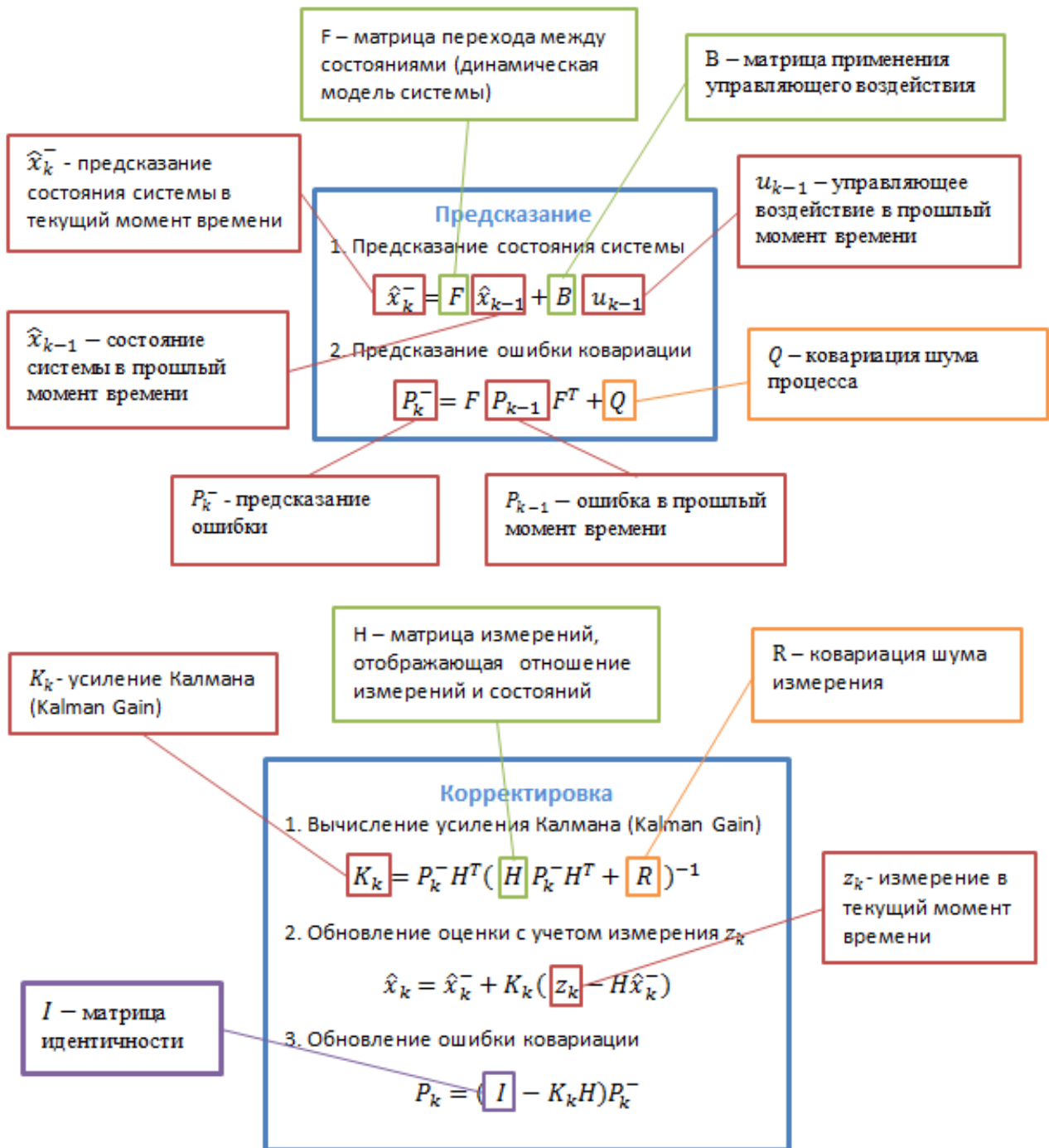


Рис. 8. Подробная структура и переменные фильтра Кальмана.

2) **Корректировка.** На этом шаге первой задачей является вычисление усиления  $K_k$ . Расчет выполняется по предсказанному значению  $P_k^-$  и параметрам фильтра  $H$ ,  $R$  по формуле

$$K_k = P_k^- H^T (H P_k^- H^T + R)^{-1}. \quad (4)$$

При этом выходное значение отфильтрованного сигнала обновляется по формуле

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - H \hat{x}_k^-), \quad (5)$$

где  $z_k$  – измеренное значение;  $\hat{x}_k^-$  – предсказанное значение сигнала.

Далее производится обновление оценки ошибки. Расчет производится по формуле

$$P_k = (I - K_k H) P_k^-, \quad (6)$$

где  $P_k^-$  — предсказанное значение ошибки;  $K_k$  и  $H$  — параметры фильтра.

## 5. Программирование алгоритмов ЦМК с использованием фильтра Калмана

Таким образом, алгоритм Калмана описывается формулами (2) – (6). Для реализации фильтра необходимо задать параметры  $F$ ,  $B$ ,  $Q$ ,  $H$ ,  $R$ . В рассматриваемом конкретном случае ЦМК имеется только один вход (измеренный зашумленный азимутальный сигнал) и один выход (результат фильтрации). Поэтому данные параметры могут быть выбраны и рассчитаны достаточно просто.

Примем переменную  $F = 1$ , т.е. предсказываемое значение будет равно предыдущему состоянию. В ЦМК отсутствует управляющий вход, поэтому полагаем  $u = 0$ . Полагаем значение  $H = 1$ , поскольку измерение является скалярной величиной. Для простоты начальные значения угла полагается  $\Psi = 0$ , а начальное значение оценки погрешности полагается  $P = 0$ . Засылается значение параметра  $Q = 0.003$ . Это дает нам большую гибкость в настройке фильтра. Поскольку в ЦМК управляющих воздействий нет, принимается  $B = 0$ .

Наиболее важным является выбор параметра  $R$  фильтра. Если  $R$  выбрано слишком большим, то это уменьшит расчетную скорость сходимости выходного сигнала фильтра (но при этом выходной процесс фильтра

получается весьма гладким). И наоборот, если значение параметра  $R$  слишком мало, скорость сходимости оценки фильтра будет выше, но выходной сигнал будет менее гладким. Отметим, что угловая скорость поворота корабля относительно невелика. При этом для ЦМК, установленного на судне, было выбрано разумное значение  $R = 2$ . Расчетные формулы времени и выходного сигнала в реализованном фильтре Калмана приведены в Таблице 1.

Таблица 1. Формулы Калмана для ЦМК.

Предсказание	Корректировка
$\hat{x}_k^- = \hat{x}_{k-1}$ $P_k^- = P_{k-1} + Q = P_{k-1} + 0.003$	$K_k = \frac{P_k^-}{P_k^- + R} = \frac{P_k^-}{P_k^- + 2}$ $\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k (z_k - \hat{x}_k^-)$ $P_k = (1 - K_k) P_k^-$

Таким образом, общие формулы (2)–(6) конкретизируются следующим образом.

1) **Корректировка.** На этом шаге программа вычисляет значение коэффициента  $K_k$  по формуле (4), где  $H^T = H = 1$ ,  $R = 2$ , затем микроконтроллер считывает значение угла из модуля НМС5883 и переносит полученное значение в параметр  $z_k$  ( $z_k = \Psi$ ), далее, вычисляет значение  $\hat{x}_k^-$  по формуле (5), и, наконец, по формуле (6) вычисляется значение  $P_k$ . Величина  $\hat{x}_k^-$  является выходным фильтрованным сигналом. Она формируется по стандартам NMEA0183 и передается в коммуникационный модуль RS485. В этом процессе по уравнению (6) обновляется также оценка ошибки  $P_k^-$ .

2) **Предсказание.** На основе предыдущего значения  $\hat{x}_{k-1}$  по формуле (2) вычисляется предсказанное значение  $\hat{x}_k^-$ .

Блок-схема алгоритмов разработанного фильтра Кальмана для ЦМК показана на рис. 9.

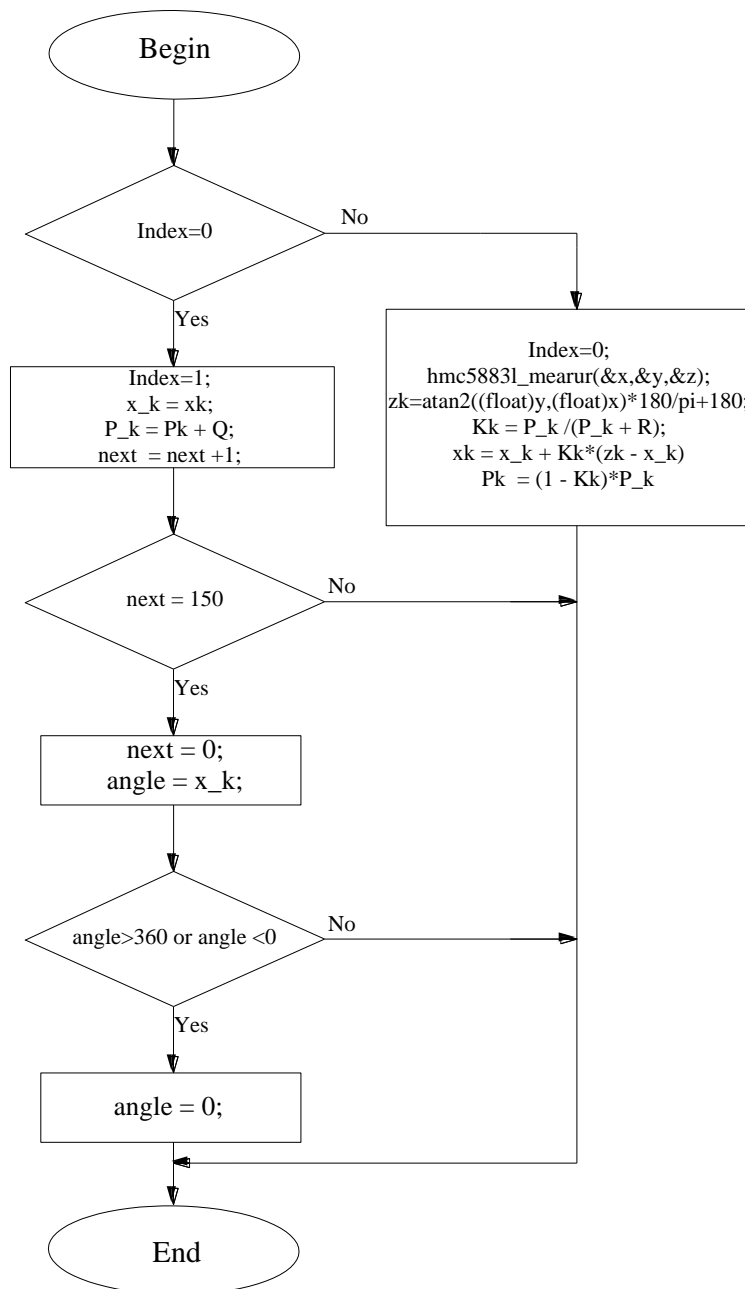


Рис. 9. Блок-схема алгоритмов разработанного фильтра Кальмана

В алгоритмах (рис. 9) используется переменная **Index** с целью управления шагами алгоритмов. Если **Index** = 0, то реализуются формулы предсказания. Если **Index** = 1, то реализуются формулы корректировки. Далее микроконтроллер считывает направленный угол из модуля HMC5883 и вычисляет коэффициент  $K_k$ , используя соответствующие формулы. Значение переменной **next** используется в расчете времени для обновления данных из фильтра в программах, работающих с прерыванием времени. Когда значение

переменной **next** = 150, то выходной сигнал фильтра обновляется через каждые 3 секунды. Значение переменной **angle** является выходным значением фильтра с подавлением измерительного шума. Это значение формируется по стандартам NMEA0183 и поступает в блок RS485 для передачи на устройства отображения.

## 6. Результаты реальных испытаний ЦМК на корабле

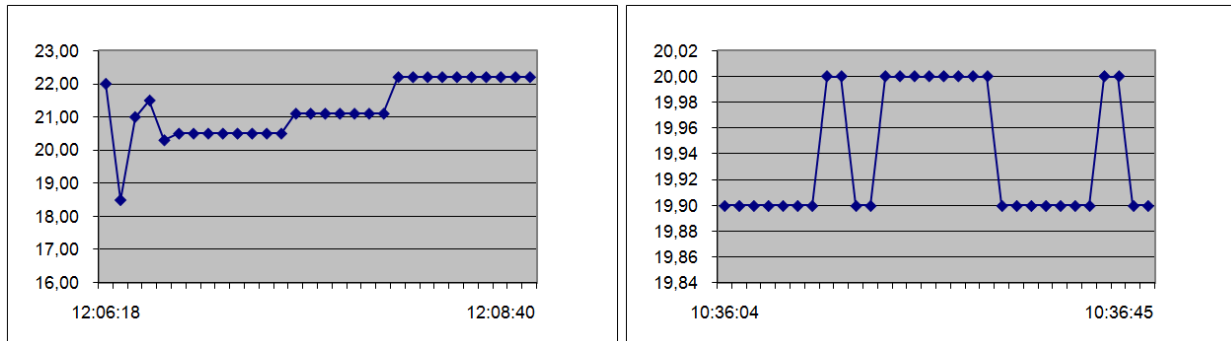
В готовый ЦМК производится загрузка программы (содержащей формулы фильтра Калмана) в память микроконтроллера ЦМК. Были проведены реальные испытания оборудования на борту корабля в течение длительного времени эксплуатации ЦМК (во Вьетнаме). Результаты показывают, что использование фильтра Калмана в ЦМК дало хорошие результаты с высоким подавлением измерительных шумов [6, 7, 8].

Реальные тесты выполнялись на корабле, для фиксации результатов использовался компьютер, подключенный к ЦМК. На компьютере с установленным прикладным программным обеспечением постоянно считывалось значение угла курса, полученное от ЦМК, и затем производилось его сравнение с фильтрованным сигналом.

Система была испытана, когда корабли находились в разных положениях и разных режимах движения. Было установлено, что без использования фильтра Калмана ошибка достигала большой величины (иногда более 2 градусов). При использовании фильтра Калмана ошибка в выходном сигнале минимизируется и становится менее 1 градуса [6, 7, 8]. Такой уровень ошибки полностью удовлетворяет требованиям стандартов ИМО. Рассмотрим некоторые результаты реальных испытаний оборудования на судах (во Вьетнаме).

На рис. 10 показаны результаты, когда корабль стоит у пирса с постоянным курсом 20 градусов.

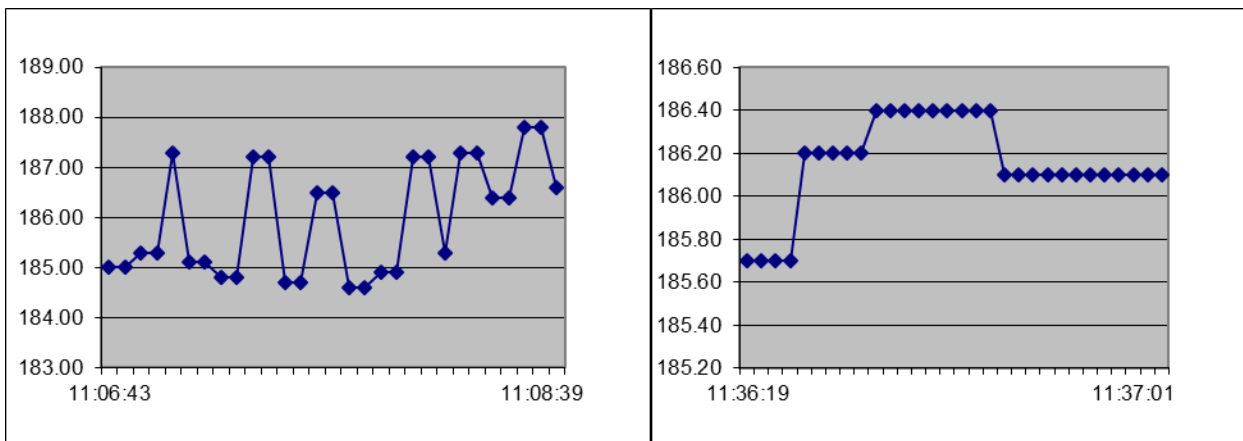
На рис. 11 показаны результаты, когда судно движется с курсом около 186 градусов.



а) без фильтра Калмана

б) с фильтром Калмана

Рис. 10. Результаты испытаний; судно стоит у пирса с курсом 20 градусов.



а) без фильтра Калмана

б) с фильтром Калмана

Рис. 11. Результаты при движении корабля с курсом около 186 градусов.

#### 4. Заключение

По результатам практических испытаний оборудования ЦМК на вьетнамских судах было установлено, что использование фильтра Калмана для фильтрации шума на оборудовании является полезным, и качество информации с ЦМК существенно улучшается.

Разработанный прибор был сертифицирован и может эксплуатироваться на морских судах.

#### Литература

1. *Performance Standards For Gyro-compasses*. Resolution A.424 (XI), IMO, 1979.
2. *Magnetic Compasses Carriage and Performance Standards*, IMO. 1977.

3. HMC5883 Database Sheet [online]. Site “DatabasesheetdPDF”. Available at [www.datasheetspdf.com/datasheet/HMC5883.html](http://www.datasheetspdf.com/datasheet/HMC5883.html)
4. Vu Xuan Hau, Nguyen Dinh Thach, Pham Ky Quang, Nguyen Xuan Phuong. Researching, Designing and manufacturing the digital compass system for Fishing and Inland Vessels in Vietnam. *Journal of Maritime Science and Technology*, Vietnam Maritime University, 2016, January 45, pp. 60-64.
5. Vu Xuan Hau, Ivanov V. E. Results of the Development and Experimental Studies of the Digital Magnetic Compass System. *Proceedings - 2018 Ural Symposium on Biomedical Engineering, Radioelectronics and Information Technology*, USBEREIT 2018. Yekaterinburg, May 2018, pp. 359-362.
6. *Certificate - Maritime Trading and Service Technology Co., Ltd (MTS). Test results and assessment of the Digital Magnetic Compass system*. Hai Phong, Viet Nam, August 2017.
7. *Certificate - Thao Linh DMTCO.,Ltd. Test results and assessment of the Digital Magnetic Compass system*. Hai Phong, Viet Nam, September 2017.
8. Vu Xuan Hau. *Tables of measurements of the digital magnetic compass system on ships in Vietnam*. Haiphong, Vietnam, September 2017.
9. Kalman filter Wikipedia [online]. Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman\\_filter](https://en.wikipedia.org/wiki/Kalman_filter)
10. Фильтр Калмана — Введение. Available at: <https://habr.com/post/140274/>
11. M.J. Caruso. Applications of magnetoresistive sensors in navigation systems. *SAE Trans.*, 1997, Vol. 106, pp. 1092-1098.
12. The NMEA0183 Protocol. Available at: <https://www.tronico.fi/OH6NT/docs/NMEA0183.pdf>
13. Datasheet Atmega8L. Available at: [https://www.mouser.com/datasheet/2/268/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8\\_L\\_dat-1315266.pdf](https://www.mouser.com/datasheet/2/268/Atmel-2486-8-bit-AVR-microcontroller-ATmega8_L_dat-1315266.pdf)
14. Datasheet Max485. Available at: <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/73463/MAXIM/MAX485.html>
15. Datasheet LM2576. Available at: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf>

**Для цитирования:**

Ву Суан Хау, В. Э. Иванов, С. И. Кумков, Нгуен Динь Тхач. Исследование, изготовление корабельного цифрового магнитного компаса и применение фильтра Калмана для фильтрации зашумленной информации данного компаса. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 5. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/may19/6/text.pdf>  
DOI 10.30898/1684-1719.2019.5.6