

## **Локальная навигационная система для автоматического причаливания судна**

Широков И. Б., Скорик И. В., Аблякимов И. С.

*Институт радиоэлектроники и информационной безопасности,  
Севастопольский государственный университет  
ул. Университетская, 33, Севастополь, 299053, Российская Федерация  
shirokov@ieee.org*

Статья поступила 31 октября 2016 г.

**Аннотация:** В работе показано, что для автоматического причаливания судна к причальной стенке необходимо решить задачу его точного позиционирования. Решить эту задачу с помощью глобальных навигационных систем не представляется возможным, поскольку последние не обладают необходимой точностью. Рассмотрены принципы и методы построения локальной навигационной системы, работа которой основана на измерении дальности между антеннами радиоэлектронного оборудования, устанавливаемого на борту судна и на причальной стенке. Для измерения дальности используется микроволновое распространение с последующим гомодинным преобразованием микроволновых сигналов и измерением разности фаз низкочастотных сигналов. Предложена структурная схема дальномера и описано его функционирование. Приведены основные соотношения, определяющие функционирование системы. Рассмотрена процедура определения дальности по измеренным разностям фаз сигналов, обозначены при этом некоторые ограничения метода. Обсуждены некоторые аспекты функционирования системы, связанные с выбором ее рабочих частот. Показано, что с использованием предложенной структурной схемы возможно создание эффективной локальной навигационной системы для обеспечения автоматического причаливания судна.

**Ключевые слова:** роботизированное судно, автоматическое причаливание, навигационная система, относительное позиционирование, фазовый дальномер, гомодинное детектирование.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008):** Широков И. Б., Скорик И. В., Аблякимов И. С. Локальная навигационная система для автоматического причаливания судна // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2018. Т. 1, № 2. С. 168—182.

**Для цитирования (ГОСТ 7.0.11—2011):** Широков, И. Б. Локальная навигационная система для автоматического причаливания судна / И. Б. Широков, И. В. Скорик, И. С. Аблякимов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2018. — Т. 1, № 2. — С. 168—182.

# Local navigation system for automatic ship berthing

I. B. Shirokov, I. V. Skorik, and I. S. Ablyakimov

*Institute of Radio Electronics and Information Security,  
Sevastopol State University*

*33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation  
shirokov@ieee.org*

Received on October 31, 2016

**Abstract:** *This paper shows that it is necessary to solve the problem of accurate ship positioning to provide automatic ship berthing. It is impossible to solve this problem using global positioning systems since they do not provide the proper precision. The principles and methods of development of a local navigation system are discussed. The system operation is based on measurement of the distance between the antennas of radio equipment installed on a ship and at the quay. Microwave propagation analysis is used for distance measurements. It is followed by a homodyne procession of microwave signals and the phase difference measurements on low-frequency signals. The block diagram of the rangefinder and its operation principles are described. The main equations that determine functioning of the system are given. The procedure of the range finding by measuring the phase difference between signals is analyzed; some limitations of the method are shown. Some aspects of system operation concerning selection of its operating frequencies are discussed. It is shown that using the proposed block diagram gives possibility to create an effective local navigation system to provide automatic ship berthing.*

**Keywords:** *robotic ship, automatic mooring, navigation system, reference positioning, phase rangefinder, homodyne detection.*

**For citation (IEEE):** I. B. Shirokov, I. V. Skorik, and I. S. Ablyakimov, "Local navigation system for automatic ship berthing," *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 1, no. 2, pp. 168–182, 2018. (In Russ.). doi: 10.15826/icrt.2018.01.2.13

## 1. Введение

Автоматизированные и роботизированные системы находят все более широкое применение в промышленности и других сферах. Это обусловлено стремлением оградить человека от опасных и тяжелых условий труда, а также повысить безопасность в отрасли, исключив из операционных процессов человеческий фактор. Необходимость автоматизации технологических процессов обусловлена и экономическим фактором.

Особенно остро в последнее время стоит вопрос безопасности и эффективности в судовождении. В настоящее время наблюдается тенденция к

уменьшению количества экипажа и внедрению автоматических средств управления на морских судах. Кроме сокращения расходов на содержание экипажа, использование автоматизированных судов несет в себе и другие преимущества: потенциально они будут легче обычных и предоставят больше пространства для грузов, так как их разработчики могут позволить себе отказаться от мостика и системы жизнеобеспечения и спасения экипажа судна.

Кроме того, роботизированные суда могут найти широкое применение в оборонной сфере. Автоматизация управления судном позволит минимизировать риски для людей при выполнении опасных заданий.

Наибольшую сложность представляет автоматизированное управление судном в порту [1]. Акватория порта ограничена и опасность столкновения с другими судами и сооружениями достаточно высока. Одна из важных задач управления судном в порту — обеспечение безопасного причаливания [2]. Для решения этой задачи требуется точное позиционирование судна вблизи причальной стенки, обеспечивающее соблюдение необходимых параметров движения судна.

Мировая практика показывает, что использование глобальных навигационных систем при решении таких задач не обеспечивает должного уровня безопасности [3], поэтому их дополняют локальными навигационными системами различного принципа действия.

## **2. Существующие локальные навигационные системы**

На сегодняшний день существует ряд локальных навигационных систем, которые потенциально могут быть использованы для автоматического причаливания. В частности, широко применяются оптические системы. Доказательством этому служит широкое распространение лазерных дальномеров в портах, где они используются как вспомогательные средства. Система лазерного причаливания и швартовки судов предназначена для гарантированного повышения безопасности швартовых операций и исключения риска навала судна на причал. Лазерная система швартовки актуальна в первую очередь для портов, осуществляющих погрузку и перевалку опасных грузов — нефти, сланцев, угля и др. Автоматическая лазерная швартовка — вспомогательная система докования, обеспечивающая контроль и безопасность швартовки судна путем лазерного измерения расстояния, скорости и угла расположения судна в критическом диапазоне дистанций от 200 м до нуля линии швартовки. Благодаря системе лазерной швартовки можно предотвратить и избежать аварийной ситуации в случае подхода судна к причалу на слишком большой скорости или под слишком большим углом.

Однако система лазерной швартовки работоспособна только при падении борта судна на линию лазерного луча. Кроме того, система носит исключительно информативный характер и не влияет на процесс причаливания непосредственно. Собственно, управление судном в момент причаливания осуществляет экипаж, работающий в штатном режиме и руководствующийся показаниями системы причаливания, выводимыми на информационное табло (или несколько таких табло). При этом на протяжении всей процедуры причаливания борт судна должен пересекать несколько лазерных лучей, как минимум два. В большинстве случаев такая процедура причаливания предполагает ход судна поперек его продольной оси. Такое движение возможно только лишь при наличии на самом судне специальных подруливающих устройств, либо же предполагается использование внешних буксировочных устройств. В последнем случае сам процесс причаливания затруднен, поскольку корпус причаливаемого судна загораживает сами информационные табло, устанавливаемые на причальной стенке.

В любом случае вспомогательная система лазерного причаливания не предполагает автоматического управления движением судном, поскольку информативные параметры этой системы не могут быть введены в систему управления судном непосредственно. При формировании команд для подруливающих устройств должны учитываться не только мореходные качества судна в целом, но и степень его загрузки, распределение груза на судне, наличие внешних факторов (ветер, волнение, течения) и их влияние с учетом ориентации самого судна.

Вместе с тем существуют системы автоматического лазерного причаливания, позволяющие управлять судном непосредственно. Одна из оптических систем позиционирования, представленных на рынке, это *CyScan*<sup>1</sup>. Она обладает хорошими характеристиками по точности и дальности, но такие явления, как дождь, снег, туман, значительно их ухудшают. Также элементы этой системы должны всегда содержаться в чистоте, так как загрязнения препятствуют распространению оптического излучения. В реальных условиях это может быть проблематично.

Обычно, для получения адекватных сведений о дальности от лазерного дальномера, требуется обеспечить наведение луча на определенную точку. Для обеспечения пространственной селекции активная часть комплекса *CyScan* оборудована механизмом наведения на ответчик. Известно, что любые механизмы требуют технического обслуживания и снижают надежность. Также очевидно, что присутствие каких-либо препятствий на пути распространения лазерного луча недопустимо.

---

<sup>1</sup> Offshore & Marine Solutions from Guidance Marine [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.guidance.eu.com/home> (дата обращения: 3.10.16).

Наряду с оптическими системами позиционирования для задач управления судном широко применяются радиотехнические системы. Один из распространенных методов измерения дальности, широко используемый в системах такого рода, — импульсный. Но его недостатки хорошо известны: это невысокая точность измерения дальности, обширная «мертвая зона» и значительная импульсная мощность передатчика.

Примером другой системы позиционирования судна может служить представленная на рынке система *RadaScan* [4], в основе работы которой лежит хорошо известный частотный метод измерения дальности. Указанная система и аналогичные ей обладают хорошими характеристиками и широко применяются в практике судовождения. Однако эти системы имеют серьезный недостаток, заложенный в самом принципе их работы, — неспособность измерять малые расстояния. В частности, упомянутая система *RadaScan* обеспечивает определение дальности на дистанциях от 10 м и более<sup>2</sup>. Этого расстояния вполне достаточно для решения задач обеспечения, например, подхода танкера к буровой платформе. Однако для решения рассматриваемой задачи автоматического причаливания судна, когда требуется контролировать расстояния порядка единиц и долей метра, вплоть до нуля, использование такой системы и такого подхода не представляется возможным.

Вместе с тем, фазовые радиотехнические системы являются самыми точными из всех известных. Помимо высокой точности измерения расстояний фазовая радиотехническая система лишена также указанных выше недостатков, связанных с наличием мертвой зоны измерений. Использование фазового метода измерения дальности обеспечит, с одной стороны, высокую точность позиционирования судна в диапазоне от нуля до сотен метров от причальной стенки. Кроме того, работа всей системы будет менее подвержена влиянию атмосферных явлений. При этом возможен «твердотельный» вариант реализации системы, не предполагающий использования подвижных частей оборудования.

Использование активных ответчиков в системе обеспечит требуемую энергетику линии связи на требуемых дальностях в сотни метров и позволит существенно уменьшить мощность излучения радиоэлектронного оборудования.

### **3. Фазовая радиотехническая система измерения дальности**

Для решения задачи локальной навигации судна относительно причальной стенки предлагается использовать фазовую радиотехническую си-

---

<sup>2</sup> RadaScan Microwave Radar Sensor for Dynamic Positioning Operations. IMCA M209, April 2011.

стему измерения дальности, аналог которой описан в [5]. В состав системы входят два считывателя, размещенные на судне, и два транспондера, установленные на причальной стенке. Расположение считывателей и транспондеров показано на рис. 1. Каждый считыватель измеряет расстояние до каждого транспондера, в результате чего получается четыре дистанции  $d_{ij}$ .

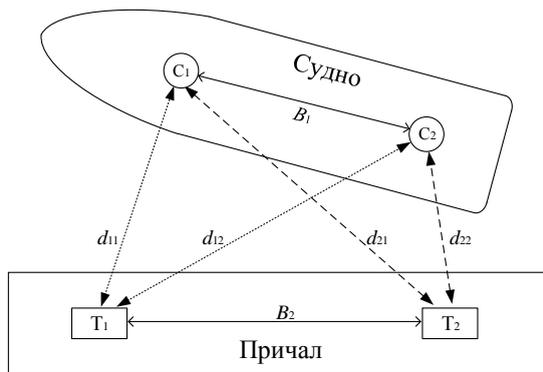


Рис. 1. Размещение элементов системы.

Fig. 1. System elements' placement

Зная расстояние между считывателями  $B_1$ , а также между транспондерами  $B_2$  и используя элементарные геометрические выражения, можно однозначно определить положение судна относительно причальной стенки с высокой точностью.

Рассмотрим упрощенные структурные схемы считывателя и транспондера [6], показанные на рис. 2.

Считыватель состоит из генератора высоких частот (ГВЧ), направленного ответвителя (НО), микроволнового смесителя (СМ), селективного усилителя ограничителя (СУО), фазового детектора (ФД), генератора низкой частоты считывателя (ГНЧС), передающей микроволновой антенны, приемной микроволновой антенны.

Транспондер состоит из приемо-передающей микроволновой антенны, управляемого фазовращателя проходного типа (УФВ), однопортового усилителя (ОУ), генератора низкой частоты транспондера (ГНЧТ).

Работает система следующим образом.

Генератор высоких частот формирует микроволновые колебания заданной частоты, которые посредством передающей микроволновой антенны считывателя излучаются в направлении расположения транспондеров. При этом часть энергии излучаемого сигнала с помощью направленного

ответителя подается на микроволновый смеситель для обеспечения гомодинного преобразования, принятого приемной микроволновой антенной считывателя сигнала.

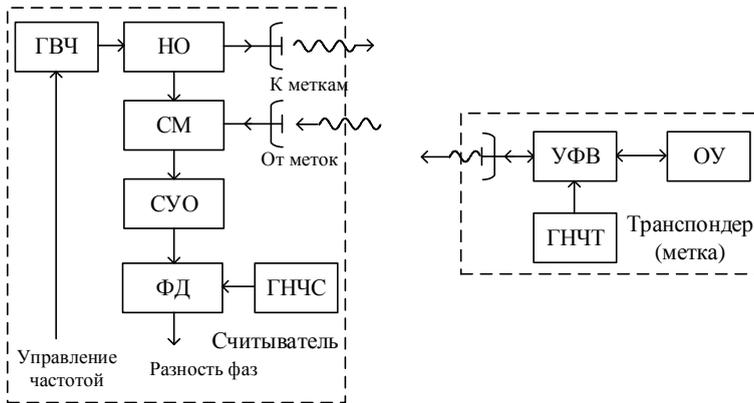


Рис. 2. Структурная схема считывателя и транспондера.

Fig. 2. Reader and transponder block diagrams

Сигнал, принятый приемо-передающей микроволновой антенной транспондера, проходит через управляемый фазовращатель и усиливается однопортовым усилителем. Усиленный сигнал проходит в обратном направлении и приобретает дополнительный фазовый сдвиг в управляемом фазовращателе. Генератор низких частот транспондера управляет фазовым сдвигом, который вносит управляемый фазовращатель. При этом излучаемый транспондером сигнал оказывается сдвинутым по частоте относительно принимаемого микроволнового сигнала на частоту генератора низкой частоты транспондера.

Принятый от транспондера сигнал поступает на микроволновый смеситель совместно с исходным микроволновым сигналом. В результате перемножения на выходе смесителя получают колебания разностной частоты, равной частоте генератора низкой частоты транспондера. Эти колебания усиливаются селективным усилителем-ограничителем.

Усиленный низкочастотный сигнал поступает на один вход фазового детектора, на другой вход которого поступает сигнал генератора низкой частоты считывателя. Надо понимать, что частоты обоих низкочастотных генераторов считывателя и транспондера должны быть одинаковыми.

Выходной сигнал фазового детектора пропорционален разности фаз низкочастотных сигналов. Этот сигнал содержит информацию о расстоянии между считывателем и транспондером.

#### 4. Основные соотношения

Рассмотрим более подробно процесс преобразования сигналов, осуществляемый в различных блоках системы.

Считыватель излучает сигнал, который описывается выражением

$$u_1(t) = U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $U_0$  — амплитуда,  $\omega_0$  — частота,  $\varphi_0$  — начальная фаза микроволнового сигнала. При этом сигнал, принимаемый антенной транспондера, описывается как

$$u_2(t) = U_0 A \sin(\omega_0 t + \varphi_0 + kd), \quad (2)$$

где  $A$  — обобщенный коэффициент, учитывающий ослабление микроволнового сигнала при распространении в свободном пространстве,  $kd$  — набег фазы, обусловленный распространением микроволнового сигнала с постоянной распространения  $k$  от антенны считывателя до антенны транспондера на расстояние  $d$ .

В транспондере с помощью управляемого фазовращателя микроволновый сигнал сдвигается по частоте и фазе под действием управляющего напряжения генератора низкой частоты транспондера и дополнительно усиливается однопортовым усилителем. Преобразованный сигнал можно выразить как

$$u_3(t) = U_0 A G \sin[(\omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 + kd + \varphi_1], \quad (3)$$

где  $G$  — коэффициент усиления однопортового усилителя,  $\Omega_1$  и  $\varphi_1$  — соответственно частота и начальная фаза колебаний, вырабатываемых генератором низкой частоты транспондера.

Вторично излученный приемо-передающей антенной транспондера и принятый антенной считывателя сигнал описывается выражением

$$u_4(t) = U_0 A^2 G \sin[(\omega_0 + \Omega_1)t + \varphi_0 + 2kd + \varphi_1], \quad (4)$$

где  $2kd$  — характеризует набег фазы в результате двойного распространения микроволнового сигнала от антенны считывателя до антенны транспондера и обратно. Строго говоря, необходимо учитывать изменение  $k$  при обратном распространении микроволновых колебаний вследствие сдвига частоты микроволнового сигнала в транспондере. Однако относительное изменение частоты микроволновых колебаний  $(\omega_0 + \Omega_1)$  пренебрежимо мало и изменением  $k$  можно пренебречь.

Принятый считывателем сигнал (4) перемножается в смесителе с исходным сигналом (1), в результате чего получается компонента разностной частоты, описываемая выражением

$$u_s(t) = U_0 K \sin(\Omega_1 t + 2kd + \varphi_1), \quad (5)$$

где  $K$  — обобщенный амплитудный коэффициент. В выражении (5) исходная частота  $\omega_0$  и начальная фаза  $\varphi_0$  микроволнового сигнала отсутствуют, поскольку взаимно вычитаются.

Сигнал (5) выделяется и усиливается селективным усилителем-ограничителем, и далее осуществляется измерение разности фаз между полученным сигналом, частота которого равна частоте генератора низкой частоты транспондера и опорным сигналом низкой частоты считывателя.

На рис. 2 показана упрощенная схема считывателя, которая не отражает процесс обработки сигналов от нескольких транспондеров, сигналы которых одновременно присутствуют на входе микроволнового смесителя (в нашем случае их два). Реально эта задача может быть решена двумя способами.

Способ 1. В тракт считывателя после микроволнового смесителя включается второй избирательный усилитель-ограничитель, настроенный на частоту сдвига микроволнового сигнала вторым транспондером. Соответственно, в схему добавляется второй фазовый детектор и второй генератор низкой частоты считывателя. При этом процесс обработки сигналов транспондеров осуществляется параллельно.

Способ 2. Оба сигнала разностной частоты от обоих транспондеров, получаемые на выходе микроволнового смесителя, приводятся с помощью дополнительного низкочастотного перемножителя и одного дополнительного перестраиваемого гетеродина к одному сигналу промежуточной частоты, который затем избирательно усиливается одним усилителем и детектируется одним фазовым детектором. При этом процесс обработки сигналов транспондеров осуществляется последовательно во времени.

Таким образом, после смесителя сигнал каждого транспондера может быть выделен и обработан независимо.

Видно, что искомое расстояние до транспондера содержится в соотношении для фазового сдвига (набега фазы)  $\psi = 2kd$  сигнала (5) и может быть выражено через полную фазу сигнала

$$d = \psi c / 2\omega_0. \quad (6)$$

Однако использовать данное выражение для определения непосредственно дальности  $d$  не представляется возможным, поскольку значение полной фазы сигнала (набега фазы)  $\psi$  содержит большое число фазовых циклов.

## 5. Определение дальности

Рассмотрим процесс определения расстояния между антенной считывателя и антенной транспондера.

Сигнал с полной фазой  $\psi = 2kd$ , описываемый (5) подают на один вход фазового детектора, на другой вход которого подают сигнал генератора низкой частоты считывателя, описываемый выражением

$$u_6(t) = U_1 \sin(\Omega_2 t + \varphi_2), \quad (7)$$

где  $\Omega_2$  и  $\varphi_2$  — соответственно частота и начальная фаза колебаний генератора низкой частоты считывателя. Помним, что частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  равны между собой, по крайней мере в первом приближении.

Сигнал на выходе фазового детектора пропорционален фазовому сдвигу  $\psi = 2kd + \varphi_1 - \varphi_2$ , и для того, чтобы получить значение  $2kd$  в чистом виде, необходимо знать значения начальных фаз низкочастотных генераторов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ . Это представляет проблему, так как генераторы, формирующие соответствующие низкочастотные колебания, не синхронизированы в принципе, поскольку разнесены в пространстве. Частоты  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  также не могут быть равны между собой в точности по тем же самым соображениям. Но если, как ниже будет показано, разность начальных фаз  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$  не влияет на точность, поскольку она взаимно вычитается в процессе измерений, разность частот  $\Delta\Omega = \Omega_1 - \Omega_2$  необходимо учитывать, поскольку эта разность дает ошибку измерения фазы за время проведения измерения  $\Delta t$ , равную

$$\Delta\varphi = \Delta\Omega\Delta t. \quad (8)$$

Однако этой ошибкой можно пренебречь, если интервал измерений  $\Delta t$  будет мал и разность частот  $\Delta\Omega$  будет также невелика. Оценим величину этой ошибки. Пусть  $F_1 = \Omega_1 / 2\pi \approx F_2$  равно 1 кГц. Пусть относительная нестабильность частот обоих генераторов составляет  $10^{-6}$ . Тогда при времени выполнения измерений  $\Delta t = 10$  мс величина ошибки составит

$$\Delta\varphi = 1000 \cdot 2\pi \cdot 10^{-6} \cdot 10^{-2} = 6,28 \cdot 10^{-5} \text{ рад или } 0,0036^\circ .$$

Понятно, что такой ошибкой измерений фазы можно пренебречь. ×

Далее, однозначное измерение максимальной дальности до объекта фазовым методом возможно только при условии, когда фазовый сдвиг  $2kd$  не превышает величины  $2\pi$ . Исходя из этого, максимальная дальность измерения, с учетом двойного распространения радиоволн до транспондера и обратно, ограничена и составляет

$$d_{\max} = \lambda/2,$$

где  $\lambda$  — это длина волны микроволнового сигнала, который используется для измерений. При частоте измерений, например, равной 1 ГГц максимальная однозначно измеряемая дальность не будет превышать 15 см.

Для решения указанных проблем целесообразно использовать двухчастотный метод измерения дальности [7]. Суть метода заключается в том, что измерения проводятся последовательно с использованием двух близких частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . В результате получается два соответствующих фазовых сдвига, обусловленных набегом фазы,  $\psi_1$  и  $\psi_2$ , которые можно записать в следующем виде

$$\begin{aligned} \psi_1 &= 2k_1d + \varphi_1 - \varphi_2, \\ \psi_2 &= 2k_2d + \varphi_1 - \varphi_2. \end{aligned} \quad (9)$$

Понятно, что на выходе фазового детектора формируется напряжение, пропорциональное разности фаз сигналов, изменяющейся в пределах от 0 до  $2\pi$ . Другими словами, набег фаз можно представить в виде

$$\psi_i = 2k_id + \varphi_1 - \varphi_2 = n \cdot 2\pi + \Delta\varphi_{\text{meas}} + \varphi_1 - \varphi_2,$$

где  $\Delta\varphi_{\text{meas}}$  — измеренная разность фаз на выходе фазового детектора,  $n$  — целое число, которое может достигать тысяч и более единиц.

В то же время разность фаз между величинами  $\psi_1$  и  $\psi_2$  вычисляется как

$$\Delta\psi = \psi_1 - \psi_2 = 2k_1d - 2k_2d = \Delta\varphi_{\text{meas}1} - \Delta\varphi_{\text{meas}2}, \quad (10)$$

где  $\Delta\varphi_{\text{meas}i}$  — измеренные разности фаз сигналов, получаемые на выходе фазового детектора для различных значений частот несущих колебаний  $\omega_1$  и  $\omega_2$ . Из выражения видно, что неизвестные составляющие фазы  $\varphi_1$  и

$\varphi_2$  взаимно сокращаются, равно как сокращаются значения набегов фазы  $n \cdot 2\pi$ , при условии, что для обеих частот  $\omega_1$  и  $\omega_2$  количество фазовых циклов  $n$  одинаково. Важно понимать, что это утверждение основывается на предположении, что частоты обоих низкочастотных генераторов достаточно стабильны и их начальные фазы фиксированы.

При этом расстояние  $d$  может быть определено согласно выражению [7]

$$d = \frac{\Delta\psi c}{2(\omega_1 - \omega_2)}. \quad (11)$$

Максимальная дальность, которая может быть измерена с использованием двухчастотного метода, определяется выражением

$$d_{\max} = \frac{c}{2(f_1 - f_2)} = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2(\lambda_1 - \lambda_2)}. \quad (12)$$

Иначе говоря, результат измерений соответствует тому, который получился бы при использовании разностной частоты  $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ .

## 6. Выбор рабочих частот

Выбор рабочих частот во многом определяет эффективность системы позиционирования в целом. Слишком низкая частота приведет к необходимости использования габаритных антенн для приема и передачи измерительных сигналов. С другой стороны, использование высоких частот позволит сделать элементы системы более компактными, но формирование и обработка таких сигналов сложнее, затраты на аппаратную реализацию больше. Понятно также, что точность определения расстояний в системе привязана к длине волны излучения.

Исходя из указанных соображений, оптимальной представляется рабочая частота порядка 1 ГГц, поскольку она позволит применять компактные микрополосковые антенны, а формирование сигналов таких частот не представляет трудности при использовании современной элементной базы. При длине волны излучения 30 см точность определения расстояний будет высокой.

Предполагается, что судно будет приведено в зону причаливания стандартными методами, например по сигналам GPS. При самых неблагоприятных условиях линейный размер зоны причаливания будет составлять приблизительно 500 м. Далее причаливание и швартовка будут осуществ-

ляться автоматически, с использованием разрабатываемой системы. Как было показано выше, максимальная однозначно определяемая дальность зависит от разности измерительных частот  $\Delta f = f_1 - f_2$ . Для однозначного измерения разности фаз и однозначного определения дальности порядка 500 м, исходя из выражения (12), разность частот должна составлять не более

$$\Delta f = \frac{c}{2d_{\max}} = \frac{3 \cdot 10^8}{2 \cdot 500} = 300 \text{ кГц.} \quad (13)$$

Таким образом, можно выбрать пару рабочих частот порядка 1 ГГц и 1,0003 ГГц.

Однако, по мере сокращения дистанции между судном и причальной стенкой, относительная погрешность измерения дальности будет возрастать, поскольку абсолютная погрешность измерения фазы остается неизменной, а измеряемый фазовый сдвиг уменьшается. Для повышения точности измерений во всем диапазоне расстояний целесообразно применить многошкальный метод.

Суть метода заключается в том, что по мере уменьшения измеряемой дальности разность частот  $\Delta f$  должна увеличиваться таким образом, чтобы измеряемый фазовый сдвиг постоянно был близок к значению  $2\pi$ , но не превышал его. Например, на дальности 100 м, исходя из (13), величина  $\Delta f$  должна составлять 1,5 МГц, а в непосредственной близости судна у причальной стенки, на расстоянии порядка 5 м, разность частот должна составлять  $\Delta f = 30$  МГц. При выборе изменения  $\Delta f$  следует использовать итерационный алгоритм приближения, который в процессе причаливания будет обеспечивать режим слежения за измеряемой дальностью и поддерживать значение  $\Delta f$  на максимально возможном уровне, но обеспечивающем однозначное определение дальности.

Понятно, что указанные значения диапазона изменения рабочих частот системы накладывают определенные ограничения на частотные характеристики используемых в системе антенн. Так, если на предельной дальности в 500 м относительная перестройка рабочих частот составляет всего 0,03 %, то у причальной стенки относительная перестройка увеличивается до 3 % и более по мере приближения судна к причальной стенке и его окончательной швартовки. Но, несмотря на значительное относительное увеличение диапазона рабочих частот системы на малых дальностях, падением энергетики микроволновой линии связи за счет частотных характеристик антенн можно пренебречь, поскольку эти уменьшения энер-

гетики с лихвой компенсируются уменьшением затухания микроволновых сигналов при их распространении в свободном пространстве на малых расстояниях. Другими словами, можно эффективно использовать узкополосные (и даже резонансные) микроволновые антенны, которые можно устанавливать в считывателях и транспондерах системы. Использование резонансных микрополосковых антенн является лучшим решением этой проблемы.

## 7. Заключение

Предложенная структурная схема позволяет создать систему, определяющую положение судна относительно причальной стенки. Относительные координаты судна вычисляются исходя из измеренных разностей фаз низкочастотных сигналов и определенных далее расстояний между антеннами каждого считывателя и каждого транспондера. Система определения расстояний является фазовой радиотехнической системой и, соответственно, обладает высокими показателями точности. В системе используется гомодинное преобразование сигналов, характеризующееся повышенными метрологическими характеристиками и известной простотой реализации, что существенно повышает эффективность системы в целом.

Получаемые координатные данные могут быть использованы системой управления судном и его автоматического причаливания, поскольку они обладают достаточной точностью в требуемом диапазоне определяемых расстояний, эти данные формируются на борту судна и легко могут быть интегрированы в его систему управления.

Описанный подход к проектированию системы является базовым и предполагает различные варианты практической реализации, которые будут рассмотрены и использованы в дальнейшем.

## Источники финансирования

Работа выполнена при государственной поддержке в рамках выполнения работ по теме № 3961 базовой части Государственного задания РФ.

## Список литературы

1. Ahmed Y. A., Hasegawa K. Artificial neural network based automatic ship berthing combining PD controlled side thrusters — A combined controller for final approaching to berth // 13<sup>th</sup> International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision, Singapore, 10—12<sup>th</sup> December 2014. С. 1304—1309.
2. A Study on Automatic Ship Berthing System Design / Bui V. P., Kim Y. B., Choi Y. W., Kawai H. // IEEE Proceedings of the 2009 International Conference on Networking, Sensing and Control, Japan, March 26—29, 2009. С. 181—184.

3. Russell D. DGNSS Position Quality Information for DP Applications // Dynamic Positioning Conference, October 9—10, 2007. С. 1—10.
4. Miles R. Performance modelling for local position reference sensors applied to RadaScan // Dynamic Positioning Conference, October 15—16, 2013. С. 1—15.
5. Shirokov I. B. Precision Indoor Objects Positioning based on Phase Measurements of Microwave Signals // Evaluating AAL Systems Through Competitive Benchmarking, Indoor Localization and Tracking. Berlin: Springer-Verlag, 2012. С. 80—91.
6. Shirokov I. B. The Multitag Microwave RFID System // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2009. Т. 57, вып. 5, ч. 2. С. 1362—1369.
7. Широков И. Б. Пат. 2584976 (РФ). Способ измерения дальности. Опубл. в Бюл. № 14, 2016.

### References

- [1] Y. A. Ahmed and K. Hasegawa, “Artificial neural network based automatic ship berthing combining PD controlled side thrusters – A combined controller for final approaching to berth,” in *13th International Conference on Control, Automation, Robotics & Vision*, 2014, pp. 1304–1309.
- [2] V. P. Bui, Y. B. Kim, Y. W. Choi, and H. Kawai, “A study on automatic ship berthing system design,” in *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, ICNSC 2009*, 2009, pp. 181–184.
- [3] D. Russell, “DGNSS Position Quality Information for DP Applications,” in *Dynamic Positioning Conference*, 2007, pp. 1–10.
- [4] R. Miles, “Performance modelling for local position reference sensors applied to RadaScan,” in *Dynamic Positioning Conference*, 2013, pp. 1–15.
- [5] I. B. Shirokov, “Precision Indoor Objects Positioning based on Phase Measurements of Microwave Signals,” in *Evaluating AAL Systems Through Competitive Benchmarking, Indoor Localization and Tracking*, 2012, pp. 80–91.
- [6] I. B. Shirokov, “The Multitag Microwave RFID System,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 57, no. 5, pp. 1362–1369, May 2009. doi: 10.1109/TMTT.2009.2017315
- [7] I. B. Shirokov, “The method of distance measurement,” RF Pat. 2584976, May 20, 2016.

### Acknowledgement

This work was supported by the state as part of the work on the base number 3961.