

Ганношина І.М.

РОЗРОБЛЕННЯ ПРОПОЗИЦІЙ ЩОДО ПОБУДОВИ ЧАСТОТНИХ (ФАЗОВИХ) ДЕТЕКТОРІВ З ОДНОКАНАЛЬНИМИ АМПЛІТУДНИМИ МОДУЛЯТОРАМИ РІЗНИХ ТИПІВ І ГЕНЕРАТОРОМ ЗСУВУ ДЛЯ КОГЕРЕНТНИХ ДОПЛЕРІВСЬКИХ РЛС СУДНА

Метою статті є розробка пропозицій щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС для системи забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства. Проблема забезпечення безпеки мореплавства є актуальним і складним завданням, що вимагає комплексного підходу. Вирішення цієї проблеми має величезне значення для ефективної діяльності морського транспорту, що є невід'ємною частиною економіки країни. Особливо важливо підкреслити, що ця проблема охоплює різні заходи – нормативні, організаційні, технічні та технологічні. Важливою складовою вирішення завдання безпеки мореплавства та ефективної навігації є застосування технічних засобів судноводіння. Ці засоби відіграють критичну роль як на борту суден, так і в рамках берегової інфраструктури. Вони забезпечують організацію та управління рухом суден, що необхідно для забезпечення безпеки морської навігації. У зв'язку з актуальністю цієї проблеми проводять дослідження, спрямовані на розроблення нових технічних засобів судноводіння і поліпшення характеристик наявних. Застосовувані нині берегові імпульсні радіолокаційні станції недостатньо ефективно розрізняють швидко рухомі морські об'єкти від стаціонарних. У цьому контексті розроблення нових технічних засобів судноводіння на основі доплерівських радіолокаційних систем набуває особливої актуальності. Таким чином, ця наукова стаття досліджує проблему безпеки мореплавства і ролі технічних засобів судноводіння в її вирішенні. Також вона висвітлює напрямки досліджень, спрямованих на вдосконалення наявних систем і розроблення нових для забезпечення надійності навігації та безпеки морського транспорту.

Ключові слова: безпека мореплавства, технічні засоби судноводіння, ефективність навігації, морський транспорт, технологічний характер, радіолокаційні системи, радіоелектронні системи, навігаційна безпека, засоби водного транспорту, контроль, показники ефективності контролю, технічний стан.

Постановка проблеми. Вирішення проблеми безпеки мореплавства має величезне значення для ефективної роботи морського транспорту – важливої галузі економіки країни та її економічних зв'язків. Ця проблема є першорядною, комплексною і містить заходи нормативного, організаційного, технічного і технологічного характеру. Однією з найважливіших складових вирішення проблеми безпеки мореплавства та ефективності навігації є застосування технічних засобів судноводіння (ТЗС) як на судах, так і в рамках берегової інфраструктури, що вирішує завдання організації та забезпечення руху суден. До таких ТЗС, без яких немислиме функціонування сучасного морського флоту, належать судові радіолокаційні станції (РЛС), засоби автоматизованого радіолокаційного прокладення (ЗАРП), судові навігаційні автоматизовані комплекси (НАК), берегові системи управління рухом суден (СУРС), радіолокаційні маяки-відповідачі тощо.

У зв'язку зі сказаним вельми актуальними є дослідження, спрямовані як на розроблення нових перспективних ТЗС і методів їхнього застосування, так і на вдосконалення експлуатаційних характеристик наявних приладів і засобів забезпечення безпеки мореплавства. Проведення таких досліджень можливе за різними напрямками.

Сучасні берегові імпульсні РЛС, незважаючи на високий ступінь досконалості, мають основний недолік, що полягає в тому, що вони не здатні відрізнити морські об'єкти, які швидко рухаються, від нерухомих об'єктів і визначити оперативну швидкості та координати траєкторії їхнього руху. Огляд діючих сучасних берегових і суднових РЛС приводить до висновку, що на теперішній час у ТЗС не знаходять застосування доплерівські РЛС безперервної дії та імпульсно-когерентні. Тим часом із появою швидкохідних суден і швидкохідних морських катерів на повітряних подушках, підводних крилах і пластикових катерів глісуючого типу (малогабаритні морські об'єкти) навігаційна обстановка істотно ускладнилася на далеких і ближніх підступах до акваторії порту. У перспективі ця тенденція буде тільки розвиватися. Вирішення цієї проблеми можливе за допомогою когерентних доплерівських РЛС безперервної дії та імпульсно-когерентних, які не знаходять на цей час застосування у ТЗС.

У зв'язку з цим розроблення нових ТЗС на базі берегових когерентних доплерівських РЛС безперервної та імпульсної дії набуває особливої важливості й актуальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Багато вчених досліджують шляхи підвищення ефективності систем забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства, наприклад, які визначені в роботах [1-8].

Так, у науковому дослідженні [1] детектор фазової частоти (PFD) використовується для виявлення фази в системі фазового автопідстроювання частоти (PLL) і завжди є активним. PFD працює на більш високих частотах і споживає більше енергії. Щоб мінімізувати загальну потужність PFD у цій статті обговорюють проектування та реалізацію енергоефективного PFD, що працює на вищих частотах. Для зниження енергоспоживання PFD з низьким енергоспоживанням пропонуються такі методи, як логіка прохідного транзистора, адаптивний рівень напруги та видалення шляху скидання. Пропонований PFD працює на частоті до 2 ГГц, тоді як PFD без шляху скидання може працювати і на більш високих частотах. Існуючі та пропоновані PFD з низьким енергоспоживанням було спроектовано та реалізовано з використанням Cadence Virtuoso за технологією CMOS 180 нм і змодельовано за допомогою Cadence Spectre.

У статті [2] описується симетричний фазочастотний детектор (PFD). Симетрична структура PFD забезпечує функції фазового автопідстроювання частоти (ФАПЧ) з низьким джиттером. Найважливішим моментом під час проектування ЧФД є увага до їхньої мертвої зони, ступеня їхньої лінійності та частотного діапазону роботи. Оскільки мертва зона схеми фазового детектора менша, ця схема здатна виявляти меншу різницю фаз на високих частотах. У цій статті, враховуючи компроміс між мертвою зоною і максимальною робочою частотою, найвища робоча частота досягається за мінімальної конструкції мертвої зони. Моделювання після компонування технології TSMC 0,13 мкм виконується з використанням технології CMOS: отримані в такий спосіб результати потім порівнюються з наявною літературою. Ці результати вказують на споживану потужність менш як 90 мкВт і частотну характеристику 4,1 ГГц, а також мертвою зону менш як 25 пс у гіршому разі: це відповідна умова порівняно з попередніми відповідними роботами. Площа пропонованого симетричного контуру становить 250 мкм². Нарешті, запропонований PFD протестовано в системі ФАПЧ, і результати показують, що структура корисна для додатків синтезатора частоти.

У роботі [3] описано аналіз можливості частотного детектування фазового детектора. На основі аналізу запропоновано просту модифіковану реалізацію, що досягає одностороннього набуття частоти. Імовірність появи на виході і коефіцієнт виявлення частоти розраховуються і перевіряються методом моделювання. Криві посилення показують, що запропонований фазово-частотний детектор (PFD) має можливість одностороннього виявлення частоти частот без обмеження діапазону. Ця можливість демонструється шляхом перехідного моделювання годинника та відновлення даних (CDR) на основі PLL, використовуючи запропонований PFD. CDR досягає як фазових, так і частотних придбань, коли початкова тактова частота нижче, ніж швидкість передачі даних. Крім того, отримано плавний перехід від частотно-квентного замикання до фазового.

Метою статті є розробка пропозицій щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС для системи забезпечення безпеки плавання в сучасних умовах судноплавства.

Викладення основного матеріалу дослідження. До складу передавального пристрою надмалощумної когерентної доплерівської РЛС безперервної дії, окрім типових вузлів (задавального генератора надвисокої частоти (НВЧ), кінцевого підсилювача НВЧ та передавальної антени), входить запропонований додатковий каскад, призначенням якого є кардинальне зниження (на десятки децибелів) фазових флуктуацій НВЧ-збуджувача, та надмалощумний кінцевий підсилювач НВЧ з компенсатором фазових шумів. Приймальний пристрій містить новий тип надмалощумного приймача фазомодульованих коливань.

До складу передавального пристрою надмалощумної когерентно-імпульсної РЛС входять задавальний генератор НВЧ, згаданий вище надмалощумний додатковий каскад більшої потужності, кінцевий модульований підсилювач НВЧ і приймально-передавальна антена. Приймальний пристрій містить згаданий вище новий тип надмалощумного приймача фазомодульованих коливань.

У статті пропонуються нові частотні (фазові) детектори з амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву, які є ключовими елементами. На їхній основі розробляють і створюють малощумні вузли приймально-передавальних пристроїв когерентних доплерівських РЛС.

Побудова функціональних схем частотних (фазових) детекторів заснована на двох основних принципах:

1. Використання в схемі частотного (фазового) детектора амплітудного модулятора замість гетеродина.

2. Використання прямого і непрямого способів формування опорної напруги фазового детектора.

Застосування першого принципу дає змогу реалізувати частотні (фазові) детектори різних типів: з амплітудним модулятором (АМ), балансним амплітудним модулятором (БАМ) і односмуговим амплітудним модулятором (ОАМ).

Застосування другого принципу призводить до двоканальної схеми частотного (фазового) детектора. Використання в одноканальному і двоканальному частотному (фазовому) детекторі БАМ, як буде показано далі, призводить до компенсації фазових шумів НВЧ-змішувача, які є найбільш інтенсивними його власними шумами.

Використання ОАМ у двоканальному частотному (фазовому) детекторі призводить до компенсації його фазових шумів, оскільки вони синфазно впливають на входи фазового детектора.

Всі зазначені властивості частотних (фазових) детекторів у подальшому використовуються для розроблення та створення високочутливих вимірників частотних (фазових) флуктуацій і частотних (фазових) детекторів, що використовуються в приймально-передавальних пристроях когерентних доплерівських РЛС.

Аналіз флуктуації проводиться квазістатичним методом з урахуванням власних фазових шумів елементів функціональних схем частотних (фазових) детекторів.

Пропозиції щодо побудови частотних (фазових) детекторів з одноканальними амплітудними модуляторами різних типів і генератором зсуву для когерентних доплерівських РЛС судна включають реалізацію таких підходів:

– одноканальний частотний (фазовий) детектор з амплітудним модулятором і генератором зсуву;

– одноканальний частотний (фазовий) детектор із балансним амплітудним модулятором і генератором зсуву;

– одноканальний частотний (фазовий) детектор з односмуговим амплітудним модулятором і генератором зсуву.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор з амплітудним модулятором і генератором зсуву. Функціональну схему розглянутого одноканального частотного (фазового) детектора наведено на рис. 1.

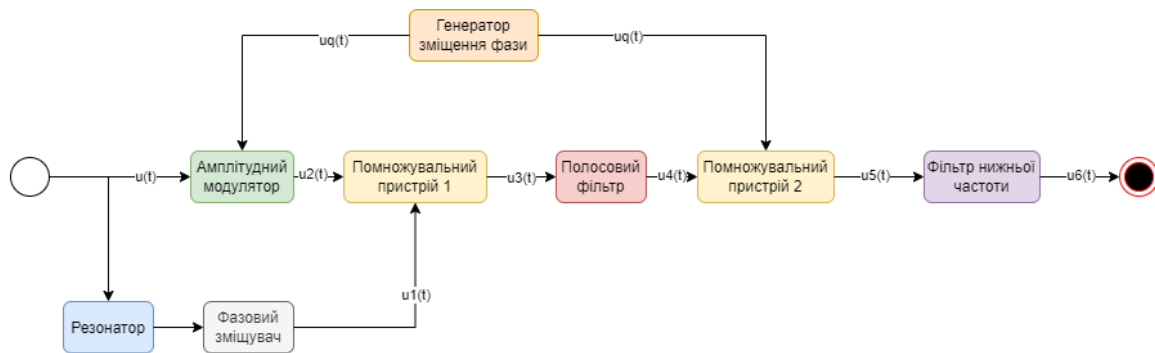


Рисунок 1 – Функціональна схема одноканального частотного (фазового) детектора

На відміну від частотного детектора Паунда розглянутий детектор має гнучкіше конструктивне рішення і вищу чутливість, якщо використовується частотний дискримінатор інтерференційного типу. Тут як гетеродин використовується амплітудний модулятор (АМ) і прями́й спосіб формування опорної напруги: опорною напругою є вихідна напруга генератора зсуву (ГЗ). Напруга досліджуваного автогенератора задається виразом

$$u(t) = \cos \left[\bar{\omega}t + \int_{-\infty}^t v(t)dt \right], \quad (1)$$

де $\bar{\omega}$ – середнє значення $u(t)$;

$v(t)$ – флуктуації кутової частоти напруги $u(t)$.

Напруга автогенератора надходить через діляник напруги на входи вимірювального резонатора (Р) й амплітудного модулятора.

Напруга генератора зсуву задається виразом:

$$u_q(t) = \cos[\bar{\omega}t + \varphi_q(t)], \quad (2)$$

де $\varphi_q(t)$ – фазові флуктуації ГЗ.

Амплітудний модулятор, на модуляційний вхід якого надходить напруга генератора зсуву, є звичайним БАМ або ОАМ.

Далі під АМ будемо мати на увазі балансний амплітудний модулятор та односмуговий амплітудний модулятор, оскільки шумові властивості детекторів з АМ і БАМ схожі. Тут і далі для стислості амплітуди напруг вважаються рівними одиниці.

З виходу фазообертача напруга $\varphi_l(t)$ з фазовими флуктуаціями $\varphi_v(t)$, перетвореними резонатором із частотних флуктуацій, і фазовим зсувом φ_o , який вноситься фазообертачем Φ , надходить на один із входів змішувача (СМ), який моделюють пристроєм ПУ, що перемножує, та з послідовно ввімкненим смуговим фільтром СФ.

Резонатор (Р) – це пристрій, який посилює сигнал певної частоти. Резонатор працює на основі явища резонансу, коли енергія сигналу підсилюється при певній частоті.

Фазовий змішувач (Ф) – це пристрій, який змінює фазу сигналу. Фазовий змішувач може використовуватися для управління фазою сигналу в радіочастотних системах.

Амплітудний модулятор (АМ) – це пристрій, який змінює амплітуду несучого сигналу відповідно до амплітуди модулюючого сигналу. Амплітудний модулятор використовується для передачі інформації шляхом зміни амплітуди несучого сигналу за допомогою модулюючого сигналу.

Генератор зміщення фази (ГЗФ) – це пристрій, який генерує сигнал з постійною частотою та змінною фазою. Генератор зміщення фази використовується в системах зв'язку для модуляції сигналу.

Помножувальний пристрій (ПП) – це пристрій, який множить два сигнали. Помножувальний пристрій використовується в різних застосуваннях, таких як радіочастотні системи, обробка сигналів та комп'ютерна графіка.

Смуговий фільтр (СФ) – це пристрій, який пропускає сигнали певної частоти та блокує сигнали інших частот. Смуговий фільтр використовується для виділення сигналів певної частоти з мішанки сигналів.

Фільтр нижньої частоти (ФНЧ) – це тип смугового фільтра, який пропускає сигнали з частотою нижче певного значення та блокує сигнали з частотою вище цього значення. ФНЧ часто використовується для приглушення шуму та перешкод.

Балансовий амплітудний модулятор (БАМ) – це пристрій, який перетворює сигнал на сигнал з постійною амплітудою та змінною частотою. Балансовий амплітудний модулятор використовується в системах зв'язку для модуляції сигналу.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор із балансним амплітудним модулятором і генератором зсуву. У цьому випадку на функціональній схемі рис. 1 амплітудним модулятором є балансний амплітудний модулятор. Тоді вихідна напруга змішувача визначається виразом

$$u_{zm}(t) \approx u_1(t)u_2(t) = \cos[\bar{\omega}_q t - \varphi_o - \varphi_v(t) + \varphi_q(t) + \varphi_{bam}(t) + \varphi_3(t)] + \cos[\bar{\omega}_q t + \varphi_o + \varphi_v t + \varphi_q t - \varphi_{bam} t + \varphi_3 t], \quad (3)$$

де $\varphi_{bam}(t)$ і $\varphi_3(t)$ – флуктуації фази балансного амплітудного модулятора і змішувача.

Напруга різницевої проміжної частоти, що дорівнює частоті генератора зсуву $\bar{\omega}_q$, містить протифазні складові φ_o , $\varphi_v(t)$, $\varphi_{bam}(t)$ і синфазні складові фазових флуктуацій $\varphi_q(t)$ та $\varphi_3(t)$ генератора зсуву і змішувача. В отриманому виразі перший доданок відповідає процесу фазового детектування в околиці робочої точки $+\varphi_o$, а другий доданок – аналогічному процесу в околиці робочої точки $-\varphi_o$ періодичної характеристики фазового детектора. Протифазні вимірювані фазові шуми $\varphi_v(t)$, зумовлені частотними шумами $v(t)$, і протифазні фазові шуми $\varphi_{bam}(t)$ балансного амплітудного модулятора подвоюються, оскільки детектування відбувається на різних схилах періодичної характеристики фазового детектора з протилежним знаком крутості, а синфазні фазові флуктуації змішувача $\varphi_3(t)$ віднімаються на виході фазового детектора (ФД) (щонайменше 20 дБ).

Напруга на виході фазового детектора з урахуванням його власних шумів $u_{fdsh_0}(t)$ записується таким чином:

$$u_{fd}(t) \approx \cos \varphi_o - \sin \varphi_o [\varphi_v(t) - \varphi_{bam}(t)] + u_{fdsh_0}(t). \quad (4)$$

Якщо $\varphi_o = \pi/2$, то напруга шумів фазового детектора максимальна і прямо пропорційна вимірюваним флуктуаціям фази $\varphi_v(t) \sim v(t)$ і власним шумам вимірювача (фазові флуктуації БАМ і шуми ФД).

Фазові шуми НВЧ змішувача частотного (фазового) детектора не впливають на кінцевий результат вимірювання, оскільки їхні перетворення відбуваються на різних схилах періодичної характеристики фазового детектора, що відрізняються знаком крутизни.

Розглянемо одноканальний частотний (фазовий) детектор з односмуговим амплітудним модулятором і генератором зсуву. У розглянутому випадку на функціональній схемі (див. рис. 1) амплітудним модулятором є односмуговий амплітудний модулятор, і перетворення фазових (частотних) флуктуацій відбувається на одному схилі характеристики фазового детектора. Напруга на виході фільтра нижніх частот фазового детектора одноканального

частотного (фазового) детектора з урахуванням тільки однієї бічної складової виражається таким чином:

$$u_{fd}(t) \approx \cos \varphi_0 - \sin \varphi_0 [\varphi_v(t) - \varphi_{oam}(t) - \varphi_3(t)] + u_{fdsh_0}(t), \quad (5)$$

де власними шумами вимірювача є шуми фазового детектора $u_{fdsh_0}(t)$, фазові шуми НВЧ-змішувача й односмугового амплітудного модулятора $\varphi_3(t)$ і $\varphi_{oam}(t)$.

Висновки. Таким чином, у статті досліджено механізм фазового детектування в частотному (фазовому) детекторі з БАМ і ГС. Завдяки такому підходу відбувається компенсація власних фазових шумів НВЧ змішувача та підсилювача проміжної частоти. Це має велике значення для створення малошумних приймачів когерентних доплерівських РЛС як неперервної, так і імпульсної дії.

Розроблено пропозиції щодо побудови високочутливих одноканальних вимірювачів частотних (фазових) флуктуації джерел малопотужних НВЧ-коливань. Можливості підвищення чутливості вимірювання, що впливають з нового принципу побудови частотного (фазового) детектора, в якому як основа використовується амплітудний модулятор і частотний дискримінатор інтерференційного типу, дають змогу вимірювати частотні (фазові) флуктуації джерел малопотужних НВЧ-коливань з вихідною потужністю від десятків мкВт до сотень мВт.

ЛІТЕРАТУРА

1. Aneesh Bharadwaj, D., Parashar, V.S., Dhanush, T.N., Premananda, B.S. (2022). Design and Implementation of Phase Frequency Detectors for Low-Power PLL. In: Dhawan, A., Tripathi, V.S., Arya, K.V., Naik, K. (eds) Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 777. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_36.
2. Sofimowloodi, S., Razaghian, F. & Gholami, M. Low-Power High-Frequency Phase Frequency Detector for Minimal Blind-Zone Phase-Locked Loops. Circuits Syst Signal Process 38, 498–511 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00034-018-0887-4>
3. Park, K. and Jeong, D.-K. (2020), Analysis of frequency detection capability of Alexander phase detector. Electron. Lett., 56: 180-182. <https://doi.org/10.1049/el.2019.3488>
4. M.K. Abdul, J.K. Binsu, Low power, high frequency, free dead zone PFD for a PLL design, in 2013 IEEE Faible Tension Faible Consommation IEEE (2013).
5. A. Tiwari, A review on design and analysis of low power PLL for digital applications. IJRASET 6, 1677–1684 (2018).
6. S.K. Garg, B. Singh, A novel design of an efficient low power phase frequency detector for delay locked loop, in 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (IEEE, 2016).
7. K. Arshak, O. Abubaker, E. Jafer, Design and simulation difference types cmos phase frequency detector for high speed and low jitter PLL, in Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (2004).
8. S. Praseetha, M. Tephila, A.S. Benedict, Implementation of phase frequency detector in phase locked loop using present able modified TSPC D flip-flop. Int J. Innov. Technol. Explor. Eng. 8, 977–980 (2019).

REFERENCES

1. Aneesh Bharadwaj, D., Parashar, V.S., Dhanush, T.N., Premananda, B.S. (2022). Design and Implementation of Phase Frequency Detectors for Low-Power PLL. In: Dhawan, A., Tripathi, V.S., Arya, K.V., Naik, K. (eds) Recent Trends in Electronics and Communication. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol 777. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2761-3_36.

2. Sofimowloodi, S., Razaghian, F. & Gholami, M. Low-Power High-Frequency Phase Frequency Detector for Minimal Blind-Zone Phase-Locked Loops. *Circuits Syst Signal Process* 38, 498–511 (2019). <https://doi.org/10.1007/s00034-018-0887-4>

3. Park, K. and Jeong, D.-K. (2020), Analysis of frequency detection capability of Alexander phase detector. *Electron. Lett.*, 56: 180-182. <https://doi.org/10.1049/el.2019.3488>

4. M.K. Abdul, J.K. Binsu, Low power, high frequency, free dead zone PFD for a PLL design, in 2013 IEEE Faible Tension Faible Consommation IEEE (2013).

5. A. Tiwari, A review on design and analysis of low power PLL for digital applications. *IJRASET* 6, 1677–1684 (2018).

6. S.K. Garg, B. Singh, A novel design of an efficient low power phase frequency detector for delay locked loop, in 2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES) (IEEE, 2016).

7. K. Arshak, O. Abubaker, E. Jafer, Design and simulation difference types cmos phase frequency detector for high speed and low jitter PLL, in Proceedings of the Fifth IEEE International Caracas Conference on Devices, Circuits and Systems (2004).

8. S. Praseetha, M. Tephila, A.S. Benedict, Implementation of phase frequency detector in phase locked loop using present able modified TSPC D flip-flop. *Int J. Innov. Technol. Explor. Eng.* 8, 977–980 (2019).

Hannoshyna I.M.

DEVELOPMENT OF PROPOSALS FOR THE CONSTRUCTION OF FREQUENCY (PHASE) DETECTORS WITH SINGLE-CHANNEL AMPLITUDE MODULATORS OF VARIOUS TYPES AND A SHIFT GENERATOR FOR COHERENT DOPPLER RADAR OF A SHIP

The aim of the article is to develop proposals for the construction of frequency (phase) detectors with single-channel amplitude modulators of different types and a shift generator for coherent Doppler radars for the system of ensuring navigation safety in modern shipping conditions. The problem of ensuring navigation safety is an urgent and complex task requiring a complex approach. The solution of this problem is of great importance for the efficient operation of maritime transport, which is an integral part of the country's economy. It is especially important to emphasise that this problem includes various measures - regulatory, organisational, technical, and technological. An important part of solving the problem of safety of navigation and efficient navigation is the use of technical means of navigation. These aids play a critical role both on board ships and within the shore infrastructure. They provide organisation and control of vessel traffic, which is necessary to ensure safe navigation at sea. Due to the relevance of this problem, research is being carried out to develop new ship navigation aids and improve the performance of existing ones. Currently used coastal pulse radar stations are not efficient enough to distinguish fast moving marine objects from stationary ones. In this context the development of new technical means of ship navigation based on Doppler radar systems acquires special urgency. Thus, this scientific article investigates the problem of navigation safety and the role of technical means of ship navigation in its solution. It also highlights the directions of research aimed at improving the existing systems and developing new ones to ensure the reliability of navigation and safety of maritime transport.

Keywords: navigation safety, technical means of navigation, navigation efficiency, maritime transport, technological character, radar systems, navigation safety.