

Зв'язок, радіотехніка, радіолокація, акустика та навігація

УДК 621.396.969.12

О.І. Кравченко¹, В.В. Печенін², О.М. Денисов¹

¹ Філія "Дельта-Лоцман" ДП "Адміністрація морських портів України", Миколаїв,

² Національний аерокосмічний університет ім. М.Є Жуковського «ХАІ», Україна

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПОЛІПШЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ АЗИМУТАЛЬНОЇ КООРДИНАТИ СУДЕН ОГЛЯДОВИМИ СИСТЕМАМИ НАВИГАЦІЇ

Запропоновано метод інтегральної оцінки координати азимута морського судна оглядовою береговою РЛС, який враховує координатну інформацію, яка знаходиться від модуля морської автоматичної ідентифікаційної системи (АІС). Одержана аналітична залежність масиву середньозважених оцінок систематичних азимутальних похибок, які виникають за рахунок вад механічного монтажу азимутальних датчиків обертання антени РЛС. Наведені результати експериментальних досліджень сумісної обробки координатної інформації АІС і оглядової РЛС. Зменшення інтегральної похибки складо приблизно 3 рази у порівнянні з вимірюваннями лише оглядової РЛС.

Ключові слова: метод, координати, азимут, похибка, оглядова РЛС, ідентифікаційна, система, автоматична.

Вступ

Прибережна морська інфраструктура різних країн світу містить мережу берегових постів регулювання руху суден (ПРПС), які забезпечують мореплавання у заданому районі. Зазвичай, такі пости оснащують засобами навігаційного спостереження, головними інформаційними датчиками яких є навігаційні РЛС кругового огляду, що працюють у 3-см діапазоні радіохвиль [1 – 3]. Це некогерентні імпульсні РЛС з частотою зондування 1-3 кГц та періодом кругового огляду у 3-4 с, призначені для встановлення на морських судах.

На сучасних ПРПС берегові РЛС та модулі обробки радіолокаційних даних є складниками автоматизованих радіотехнічних систем (АРТС) інформаційної підтримки поста [4 – 6].

Поширена практика застосування суднових РЛС на берегових постах регулювання руху суден зумовлена чинниками комерційного характеру. І саме через це користувачам доводиться стикатися з певними проблемами, що є несуттєвими у разі застосування РЛС за їх прямим призначенням, проте істотними для ПРПС. Зокрема, азимут надходження зворотних радіолокаційних сигналів у суднових оглядових РЛС визначають амплітудним методом [1, 7, 8]. Для цього РЛС оснащено антенними системами, що формують вузьку (близько 0.45°) діаграму спрямованості у азимутальній площині, яку потім обертають у цій же площині із зазначеним вище періодом. Обертально-привідний пристрій такої антени оснащено датчиком кута повороту, код якого фіксують водночас із над-

ходженням зворотного радіолокаційного сигналу і трактують як азимут надходження цього сигналу.

Природні вади конструкції чи механічного монтажу датчиків стають істотним джерелом систематичних похибок у визначенні поточних координат азимута суден береговими РЛС.

За останній час на судах використовуються модулі морської автоматичної ідентифікаційної системи (АІС) [9-10], які визначають координати суден незалежними від оглядової РЛС способом – за даними глобальної системи позиціонування (GPS).

У зв'язку з цим виникає можливість суттєвого поліпшення точності визначення азимутальної координати оглядовими береговими РЛС за рахунок використання координатної інформації, яка вимірюється модулем морської АІС.

Мета роботи: розробка та експериментальне дослідження адаптивного методу поліпшення точності визначення азимутальної координати суден береговими оглядовими РЛС за рахунок використання незалежної координатної інформації, яка вимірюється модулем морської автоматичної ідентифікаційної системи.

Викладення основного матеріалу

Головним складником конструкції більшості датчиків кута повороту антени є напівпрозоре вимірювальне кільце (зовнішній діаметр 4.0-4.5 см), на поверхню якого рівномірно по колу нанесено риски (зазвичай 1024, 2048 або 4096 штук на коло), одна з яких має певну особливість, котру легко розпізнати та використати як мітку початку відліку.

Кільце датчика насаджують на один з вертикальних валів обертально-привідного пристрою антени і під час роботи воно обертається разом із валом. Окрім того, пристрій містить два нерухомих ортогональних фотодатчики, які фіксують проходження перед ними зазначених рисок вимірювального кільця. Надалі тривіальна обробка сигналів фотодатчиків дозволяє одержати умовний цифровий код кута повороту антени та напрямку її обертання.

Потенційно така конструкція приладу здатна визначати азимут надходження зворотного радіолокаційного сигналу з точністю до ширини діаграми спрямованості антени РЛС у горизонтальній площині (0.45°). Однак для цього має бути забезпечена ідеальна точність механічного монтажу датчика кута повороту антени до її обертально-привідного пристрою, що виключає будь-які механічні перекося та зсуви зазначених складників.

На практиці така ідеальність є недосяжною, оскільки на ПРПС усі роботи з первинного монтажу, ремонту та профілактичного обслуговування антен виконують вручну у висотних умовах, часто за несприятливих метеорологічних умов та часового дефіциту, пов'язаного з потребою вимкнути усі РЛС поста на час виконання робіт. Датчики кута повороту антени іншої конструкції, наприклад, індуктивні, мають дещо інші конструктивні вади, проте зрештою вони зумовлюють аналогічні проблеми.

Як наслідок, природні вади конструкції чи механічного монтажу датчиків стають джерелом істотних, виходячи із задач ПРПС, додаткових систематичних похибок у визначенні поточних координат азимута суден береговими РЛС. Покажемо це.

Проаналізуємо можливий вплив однієї з очевидних вад механічного монтажу типового датчика кута повороту антени – горизонтального зсуву центрів обертання вала та вимірювального кільця датчика. Такий зсув є цілком імовірним, оскільки конструкція та технологія монтажу приладу передбачають наявність теплового зазору між його складниками.

Припустимо, що осі обертання вимірювального кільця та привідного вала антени є паралельними, але не збігаються на величину d під кутом F_0 ("початкова фаза" зсуву) у горизонтальній площині, як це показано на рис. 1, де окрім того позначено: O' – геометричний центр вимірювального кільця; R – його радіус; O – центр обертання вимірювального кільця на валу обертально-привідного пристрою антени РЛС; A – напрямок на ціль.

Із рис. 1 видно, що у такій, цілком природній ситуації, вимірювальне кільце датчика кута повороту антени обертається з певним ексцентриситетом відносно нерухомих складників приладу. Внаслідок цього вимірюваний датчиком напрямок на ціль F' практично ніколи не збігається з фактичним напрямком F на неї. Із трикутників OAC , $O'AB$ та ODO'

випливає, що ці напрямки (азимуту) пов'язані між собою співвідношенням

$$F = \arctg\left(\frac{AC}{OC}\right) = \arctg\left(\frac{AB - O'D}{O'B + OD}\right) = \arctg\left[\frac{R \sin(F') - d \sin(F_0)}{R \cos(F') - d \cos(F_0)}\right]. \quad (1)$$

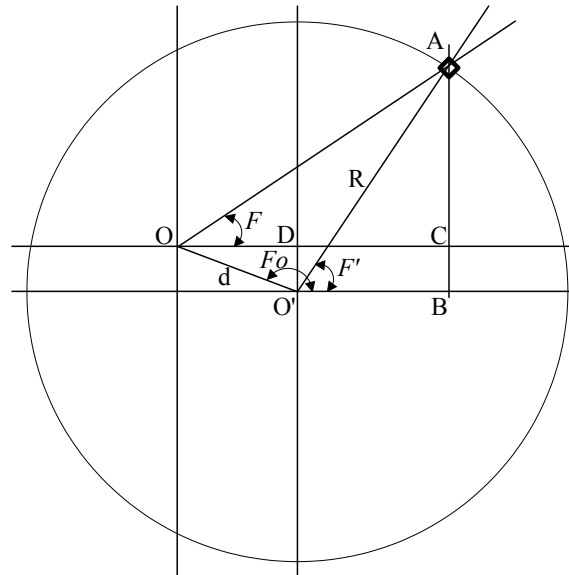


Рис. 1. Конфігурація горизонтальної площини кільця та привідного вала

Різниця між фактичним та вимірним значеннями азимута цілі $\Delta\varphi$ є систематичною похибкою азимутальних радіолокаційних вимірювань. З (1) видно, що ця похибка є функцією поточного вимірюваного кута повороту антени РЛС F' та умов монтажу, які тут описано параметрами зсуву d та F_0 , тобто

$$\Delta\varphi = (F - F') = f(F', d, F_0). \quad (2)$$

Записавши та розв'язавши рівняння $[\partial(\Delta\varphi)/\partial F'] = 0$, нескладно переконатися у тому, що максимум систематичної похибки припадає на ті вимірювані азимуту F' , які є ортогональними до напрямку зсуву геометричного центру O' відносно центру його обертання O . Зокрема, при $F_0 = 0^\circ$ це відповідає значенням $F' = 90^\circ$ та $F' = -90^\circ$.

Припустивши, що похибка ручного монтажу вимірювального кільця на вал антени РЛС може становити близько 0.1 мм ($d \approx 0.0001$ м), враховуючи, що середній радіус цього кільця складає близько 2.125 см ($R \approx 0.02125$ м) та використовуючи (1), (2), можна оцінити можливий максимум систематичної похибки азимутальних радіолокаційних вимірювань.

Виконавши розрахунок, переконуємося у тому, що навіть за зазначених тут доволі жорстких умов механічного монтажу антени, максимум систематичної похибки азимутальних вимірювань сягає $\Delta\varphi \approx 0.27^\circ$. Тобто, при відстані до судна вже у $j = 5$ морських миль (9260 м) лінійна похибка визначення

його позиції $\Delta l = (\pi/180) \cdot (\Delta\varphi) \cdot j$, що зумовлена лише зазначеною похибкою азимутальних вимірювань, може сягати 44 м.

З багатьох причин такі похибки є доволі проблемними, оскільки істотно впливають на можливість ПРРС забезпечувати мореплавство (хоча б, наприклад, тому, що типова півширина морських підхідних каналів становить 50-70 м, а робочі дальності берегових РЛС сягають 15-18 морських миль [1-4]).

Можна показати, що існують й інші, можливо менш впливові чинники (наприклад, певна "не горизонтальність" площини обертання антени), які діють незалежно й зумовлюють аналогічні негативні ефекти.

Тож оцінка та компенсація систематичних похибок азимутальних радіолокаційних вимірювань, зумовлених інтегральним впливом низки незалежних та неконтрольованих чинників, зокрема й проаналізованим вище горизонтальним зсувом центрів обертання вала антени берегової РЛС та вимірювального кільця датчика кута її повороту, є однією з актуальних задач морської радіолокації у площині забезпечення мореплавства.

Здобутки теоретичних та експериментальних досліджень

Якщо умови механічного монтажу датчика кута повороту антени РЛС до її обертально-привідного пристрою протягом достатньо тривалого часу залишаються не змінними (тобто, значення параметрів зсуву d та F_0 є сталими), то таку систематичну похибку можна оцінити й компенсувати.

На практиці, простіше виконати певне калібрування модуля азимутальних вимірювань РЛС, ніж намагатися безпосередньо оцінити значення згаданих вище параметрів похибок монтажу d та F_0 . Для цього треба порівняти виміряний азимут спостереження судна з невідомим фактичним, який слід визначити у незалежний спосіб.

Для оцінки фактичного азимута цілі ми пропонуємо скористатися координатною інформацією, що надходить від модуля морської автоматичної ідентифікаційної системи (АІС), яка зазвичай також є складником АРТС інформаційної підтримки ПРРС [9-10]. Координати суден в АІС, як відомо, визначають незалежним від РЛС способом – за даними глобальної системи позиціонування (GPS).

Зважаючи на те, що координатна інформація АІС по суті є оціночною, а також на те, що систематична похибка (2) є функцією кута повороту антени РЛС, калібрування модуля азимутальних вимірювань РЛС, вочевидь, має ґрунтуватися не на окремих порівняльних радіотехнічних вимірах, а на їх певній статистиці у секторі робочих азимутів РЛС.

Для практичної реалізації метода діапазон робочих азимутів РЛС слід поділити на певну кіль-

кість суміжних секторів ($1..N$), наприклад так, як це показано на рис. 2. Далі, під час перетинання суднами робочої зони РЛС, треба у кожному із зазначених секторів по кожному із суден здійснювати безпосередню вибірку оцінку систематичної похибки азимутальних вимірювань (2) та запам'ятовувати її.

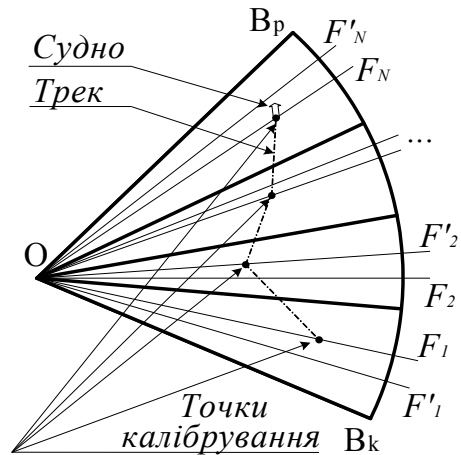


Рис. 2. Розподіл суміжних амплітудних кілець

Таким чином, з плином часу, буде нагромаджено досліду статистику калібрувальних даних у вигляді двомірного масиву оцінок систематичних азимутальних похибок $\Delta\varphi_{m,n}$, де $n \in (1 \div N)$ – номер азимутального сектора робочої зони РЛС; $m \in (1 \div M_n)$ – номер калібрувального виміру (2) у n -ому секторі; M_n – загальна кількість нагромаджених калібрувальних вимірів у n -ому секторі.

Треба також зважати на те, що кожен окрему оцінку $\Delta\varphi_{m,n}$ доведеться здійснювати у різний час, за різних умов радіолокаційного спостереження судна, за різної якості координатної інформації АІС тощо. Через це вибірки $\Delta\varphi_{m,n}$, вочевидь, не будуть рівноцінними. Це має сенс врахувати, наприклад, додавши до статистики $\Delta\varphi_{m,n}$ статистику $W_{m,n}$, що описує відносну вагу кожної калібрувальної оцінки, яку можна визначити виходячи із загальноприйнятих у статистичній радіотехніці підходів [11, 12 та ін.].

Вочевидь, достатність статистики оцінок $\Delta\varphi_{m,n}$ визначається шляхом раціонального вибору мінімально припустимих значень параметрів M_n та N – задача, яку ми тут не розглядаємо.

Таким чином, маючи достатню статистику вибіркової оцінки $\Delta\varphi_{m,n}$, можемо одержати масив середньозважених оцінок систематичних азимутальних похибок берегової РЛС

$$\Delta\bar{\varphi}_n = \frac{\sum_{m=1}^M (\Delta\varphi_{m,n} W_{m,n})}{\sum_{m=1}^M (W_{m,n})}, \quad (3)$$

що фактично відображає її дослідну залежність від поточного вимірюваного кута повороту антени РЛС F' , який тут представлено індексом номера азимутального сектора n .

Зауважимо, що під час практичної реалізації (3), доречно чисельник та знаменник цього виразу визначати нарізно за рекурентним алгоритмом, що істотно зменшить потребу у обчислювальному ресурсі.

Для подальшої фільтрації похибок дослідних вимірювань та, водночас, для створення умов щодо зручнішого практичного використання залежності (3), її можна апроксимувати певною періодичною функцією, скориставшись, наприклад, методом найменших квадратів.

Для прикладу, на рис. 3 наведено один із результатів експериментальних оцінок систематичних похибок азимутальних вимірювань, що виконані авторами в запропонований спосіб протягом січня-лютого 2014 року на ПРРС "Руська Коса" (м. Миколаїв) під час радіолокаційного проведення декількох суден. Тут шкала осі абсцис відображає реальні азимуту надходження зворотних радіолокаційних сигналів у градусах, а кожна мітка шкали ординат відповідає

приблизно одній десятій долі градуса систематичних похибок азимутальних вимірювань. На рисунку показані миттєві оцінки ансамблю систематичних похибок (тонкі лінії), їх медіанні значення на кожному градусі осі абсцис (стовщена темна лінія) та результат апроксимації (стовщена світла лінія). Як бачимо, миттєві оцінки похибок мають істотний розкид і практично не придатні для безпосереднього застосування, у той час, як результати їх статистичної обробки мають істотно ліпші перспективи щодо можливостей їх реалізації у діючих системах.

Якщо процес калібрування модуля азимутальних вимірювань РЛС здійснювати у реальному часі та організувати його таким чином, щоб масив оцінок (3) постійно оновлювався, то, вочевидь, запропонований метод одержить адаптивні властивості. Це зробить його стійкішим в умовах практичного застосування, оскільки не виключена можливість повільного дрейфу параметрів вад монтажу, зокрема, значень d та F_0 датчика кута повороту антени РЛС.

Окрім того, запропонований адаптивний метод, вочевидь, автоматично враховує інтегральний вплив й інших чинників утворення систематичних похибок азимутальних вимірювань засобами берегових РЛС.

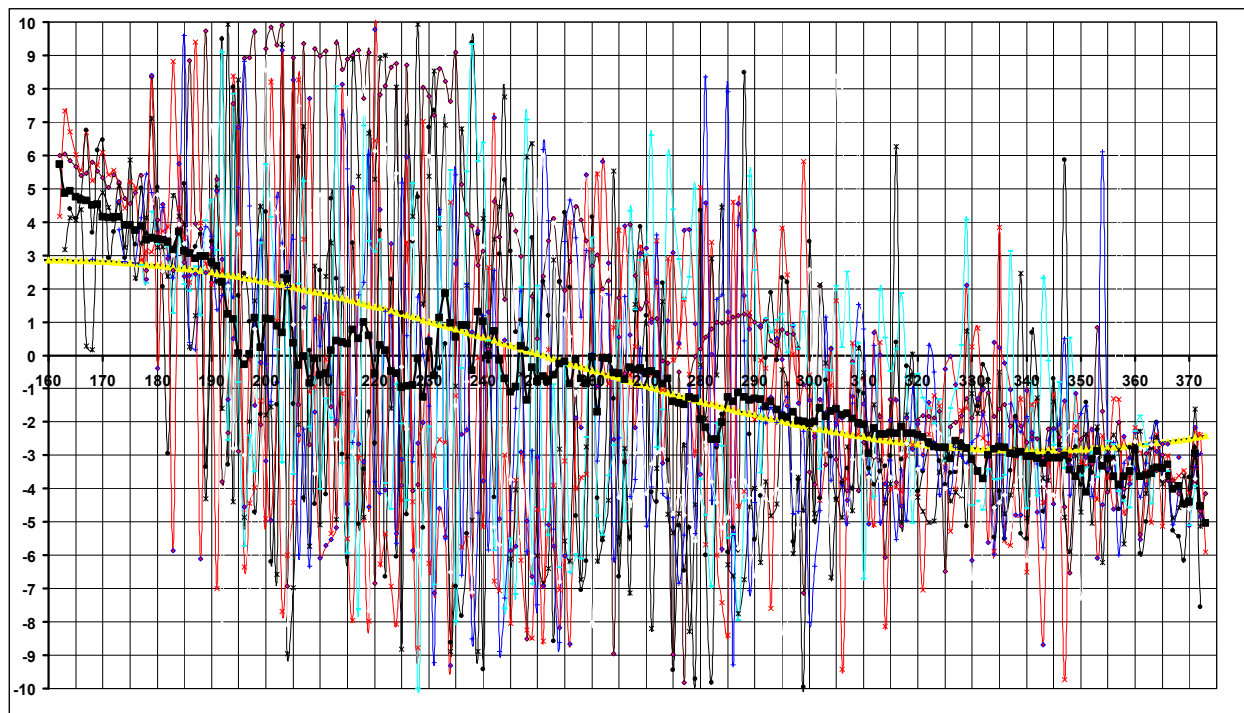


Рис. 3. Результати експериментальних оцінок систематичних похибок азимутальних вимірювань

Висновок

1. Для оцінки фактичної координати азимута морського судна, яка вимірюється береговою РЛС, запропоновано використання координатної інформації, яка надходить від модуля морської автоматичної ідентифікаційної системи (АІС).

2. Калібрування модулю азимутальних вимірювань оглядової РЛС, має ґрунтуватися на певній статистиці вимірювань в робочому секторі азимутів РЛС, а не на окремих радіотехнічних вимірах.

3. Одержана аналітична залежність масиву середньозважених оцінок систематичних азимутальних похибок оглядової РЛС, яка відображає її

дослідну залежність від поточного вимірюючого кута.

4. Наведено експериментальний результат сумісної обробки азимутальних даних автоматичної ідентифікаційної системи і оглядової РЛС, який підтверджує суттєве зменшення інтегральної похибки вимірювання азимутальної координати (приблизно з 3 рази) в порівнянні з вимірюваннями лише оглядової РЛС.

Список літератури

1. IALA Recommendation V-128. On Operational and Technical Performance Requirements for VTS Equipment. Edition 3.0, June 2007 [Електронний ресурс]. – International Association of Lighthouse Authorities (IALA) – 2007. – 68 p. – Режим доступу: http://www.ialathree.org/chap/publications/documentspdf/doc_200_eng.pdf (01.10.2012).
2. Бездольний, В.В. Система інформаційно-навігаційного забезпечення для регіональних служб регулювання руху суден [Текст] / В.В. Бездольний, О.І. Кравченко // Проблеми автоматики та електрообладнання транспортних засобів (ПАЕТС-2005): всеукраїнська НТК: зб. наук. пр. 19–20 травня 2005 р. – Миколаїв, 2005. – Ч. 1. – С. 9–17.
3. Парфентьев, О.С. Системы управления движением судов и их роль в современном судоходстве [Текст] / О.С. Парфентьев, О.Б. Причкин // Морские вести России. – 2001. – № 13–14. – С. 8–9.
4. Pillich, B. Developing e-Navigation, the early stages [Електронний ресурс] // BMT Ports and Logistics. – 2007. – 13 p. – Режим доступу: http://www.google.com.ua/url?sa=t&rct=j&q=Pillich+B.+Developing+e-Navigation.+BMT+Ports+and+Logistics.&source=web&cd=1&ved=0CC4QFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.thsoa.org%2Fhy07%2F09_01.pdf&ei=ZHJ_UfLAK4mJtAaU8YDYAw&usq=AFQjCNFXMifUxv6N3oHIPbJMVeG_FVEHNQ (09.09.2014). – Назва з екрану.
5. Кравченко, О.І. Класифікація задач та методологічні особливості побудови й функціонування сучасних систем інформаційної підтримки СРПС / О.І. Кравченко //

Судовождение: сборник научных трудов ОНМА. – Одесса : ИздатИнформ, 2009. – Вып. 17. – С. 90–99.

6. Кравченко, А.И. Общие принципы системного описания и реализации автоматизированных радиотехнических систем информационной поддержки служб регулирования движения судов в прибрежных морских регионах / А.И. Кравченко // Радиотехника и компьютерные системы. – 2011. – №2(50). – С. 14–17.
7. Vessel Traffic Management and Information System VTMS 5060 [Електронний ресурс] // Kongsberg Norcontrol IT. – 2006. – Режим доступу: <http://www.kongsberg.com/en/KDS/KNCIT/AboutUs/KongsbergNorcontrolITDownloads/~media/ECECB852322445CEB1659CC530B95786.ashx> (09.09.2014).
8. New VTS Radar from Atlas Elektronik [Електронний ресурс]. – Hydro International. – 2011. – Режим доступу: http://www.hydro-international.com/news/id390-New_VTS_Radar_from_Atlas_Elektronik.html (22.04.2011).
9. Resolution A.917(22), Adopted on 29 November 2001. Guidelines for the Onboard Operational Use of Shipborne Automatic Identification Systems (AIS) [Електронний ресурс]. – IMO. – 2002. – Режим доступу: [http://www.classnk.or.jp/hp/SMD/ism/pdf/09_IMO/A.917\(22\).pdf](http://www.classnk.or.jp/hp/SMD/ism/pdf/09_IMO/A.917(22).pdf) (09.09.2014).
10. Автоматическая идентификация судов (АИС) [Електронний ресурс]. – Одесская национальная морская академия (ОНМА). – 2009. – Режим доступа: <http://www.gmdss.odessa.ua/ais.php> (09.09.2014).
11. Кузьмин, С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С.З. Кузьмин. – М.: Радио и связь, 1986. – 352 с.
12. Фалькович, С.Е. Статистическая теория измерительных радиосистем / С.Е. Фалькович, Э.Н. Хомяков. – М.: Радио и связь, 1981. – 288 с.

Поступила в редколлегию 15.10.2014

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.К. Волосюк, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків.

АДАПТИВНЫЙ МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АЗИМУТАЛЬНОЙ КООРДИНАТЫ СУДЕН СИСТЕМАМИ НАВИГАЦИИ

А.И. Кравченко, В.В. Печенин, О.М. Денисов

Предложен метод интегральной оценки координаты азимута морского судна обзорной береговой РЛС, который учитывает координатную информацию, получаемую от модуля морской автоматизированной идентификационной системы (АИС). Получена аналитическая зависимость массива средневзвешенных оценок систематических азимутальных погрешностей, которые возникают за счет неточностей механического монтажа азимутальных датчиков вращения РЛС. Приведены результаты экспериментальных исследований совместной обработки координатной информации АИС и обзорной РЛС. Приведены результаты экспериментальных исследований совместной обработки координатной информации АИС и обзорной РЛС. Уменьшение интегральной погрешности составило приблизительно 3 раза в сравнении с измерениями только обзорной РЛС.

Ключевые слова: метод, координаты, азимут, погрешность, обзорная РЛС, идентификационная, система, автоматическая.

ACCURACY IMPROVEMENT ADAPTIVE METHOD TO CALCULATE VESSEL AZIMUTH COORDINATES BY NAVIGATION SYSTEM

A.I. Kravchenko, V.V. Pechenin, O.M. Denisov

The integral calculation method to determine the marine vessel azimuth coordinates by coastal watching radars is suggested. It takes into account the coordinate information from the maritime Automated Information System (AIS). Analytical dependence of the weighted average evaluations of the systematic azimuth errors due to inaccuracies in the azimuth rotation sensors mechanical installation of the Surveillance Radar Station (SRS) is determined. Experimental results of the coordinate information analysis obtained from the AIS and SRS are given. There was observed an approximately three-fold reduction in the integral error as compared to the results analysis of the coordinate information taken only from SRS.

Keywords: method, coordinates, azimuth, errors, surveillance radar station, information, system, automated.