

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ЗАВАДОЗАХИСТУ ВИСОКОШВИДКІСНИХ КАНАЛІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ БЕЗЕКІПАЖНИХ МАЛОРОЗМІРНИХ СУДЕН

Забезпечення охорони підводного простору в межах територіального моря України є однією з функцій Збройних Сил України. Відповідальність за здійснення цих функцій покладена безпосередньо на Військово-Морські Сили ЗС України. Висвітлення обстановки в підводному просторі є однією із задач для кораблів ВМС, успішне розв'язання якої сприяє виконанню функцій забезпечення охорони підводного простору, підвищенню захищеності кораблів від підводних загроз на стоянках та під час виконання завдань у мінонебезпечних районах. На виконання зазначених функцій у статті проаналізований двоетапний метод додаткового стробування відліків аналого-цифрового перетворювача під час I/Q-демодуляції OFDM сигналів, розкрито та запропоновано більш значно відмінний спосіб додаткового стробування цифрових відліків сигналів в режимі "ковзного вікна". Викладені пропозиції можуть бути використані як основа подальших наукових досліджень з розробки теорії цифрової обробки сигналів, а також при виробництві цифрових сегментів систем управління і комплексів зв'язку безекіпажних малорозмірних надводних суден на базі сучасних технологій.

Ключові слова: безекіпажні малорозмірні надводні судна; цифрова обробка сигналів.

Вступ

Україна — морська держава, і Військово-Морські Сили Збройних Сил України є основним інструментом її захисту з морського напрямку. Проведена в рамках комплексного огляду сектору безпеки і оборони оцінка стану воєнної безпеки держави, а також набутий досвід участі Збройних Сил України у антитерористичній операції виявили низку проблем щодо розвитку військово-морського потенціалу держави в умовах існуючих та потенційних загроз.

За результатами оборонної реформи військово-морські спроможності України мають бути нарощені до рівня, достатнього для забезпечення:

- оборони морського узбережжя Чорного і Азовського морів;
- недоторканості державного кордону та охорони суверенних прав держави в її виключній (морській) економічній зоні;
- участі у міжнародних (спільних) операціях під проводом НАТО і ЄС;
- розвитку інфраструктури базування сил.

Конкретні заходи щодо виконання цих цілей на найближчу перспективу включені до Державної програми розвитку Збройних Сил України на період до 2020 року [2].

Постановка проблеми. Для визначення заходів розвитку Військово-Морських Сил на довгострокову перспективу продовжується робота щодо вивчення досвіду розбудови національних флотів країн-партнерів. Оснащення ВМС провідних морських країн світу безекіпажними засобами військово-морської техніки дає змогу констатувати, що на цей час активно розробляються нові та вдосконалюються існуючі автономні та прив'язні підводні апарати, а також створюються малорозмірні безекіпажні надводні судна (USV) та безпілотні літальні апарати морського базування чи застосування [7]. Досвід використання USV флотами провідних морських держав досить суттєвий, тому зазначений вид військової техніки є

перспективним і для ВМС ЗС України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У найближчій перспективі передбачається мати у складі ВМС ЗС України на Азовському морі берегову і морську компоненти сил. До їх складу будуть входити морська піхота та берегова артилерія, а також корабельні з'єднання, які будуть сформовані за рахунок новітніх бойових катерів вітчизняного виробництва. Тому формування практичних рекомендацій по способах застосування, експлуатації і напрямкам розвитку робототехніки в ВМС ЗС України є доволі актуальним. Використання безекіпажних катерів-апаратів у ВМС матиме на меті зниження втрат особового складу в небезпечних районах, а також збільшення дальності дії бойових засобів флоту при виконанні покладених на нього завдань.

Створення сучасних зразків USV та прийняття їх на озброєння надасть додаткові можливості для забезпечення:

- функціонування єдиної системи висвітлення морської (надводної, підводної та повітряної) обстановки з метою безперервного збору, вивчення та узагальнення даних обстановки;
- прийняття рішень; доведення наказів, розпоряджень та сигналів бойового управління до підлеглих військ;
- моделювання та планування проведення операцій (ведення бойових дій);
- видачі службовим особам пунктів управління довідкової інформації;
- організація та підтримка взаємодії;
- організація та проведення заходів з підтримки боєготовності військ;
- організація всебічного забезпечення;
- здійснення постійного контролю за виконанням поставлених завдань та надання підлеглим необхідної допомоги, виконання завдань протимінного та протидиверсійного забезпечення [1].

В цілому автоматизація зазначених процесів,

або їх елементів покликана підвищити якість управління, особливо в частині оперативності, скорочення циклу управління та прийняття рішення, що забезпечить захоплення та утримання ініціативи, максимально ефективне використання наявних сил та засобів вогневого ураження, оперативне застосування і нарощування бойових спроможностей військових частин (підрозділів). Аналіз висвітлених досліджень різними авторами та науковцями [1, 3, 6] зосереджують увагу на питаннях автоматизації процесів управління USV. У результаті аналізу джерел з'ясовано, що в той же час, суттєвим недоліком залишається забезпечення завадо захищеності каналу управління зазначеними USV, як частини загальної проблеми яким присвячена стаття.

Таким чином, метою статті є визначення переваг та доцільності методу додаткового стробування цифрових відліків сигналів в режимі “ковзного вікна” з подальшим додатковим стробування його відліків одразу в обох квадратурних каналах сигналів.

Виклад основного матеріалу дослідження

На сьогоднішній день бойовий потенціал Чорноморського флоту Російської Федерації забезпечує повне панування на морі і дозволяє йому протягом доби блокувати всі морські перевезення України, безкарно наносити ракетні удари по кораблях, пунктах базування та берегових об'єктах України. Прикладом реальності цих загроз є дії щодо витіснення тактичних груп морської охорони шляхом знищення українського прикордонного катеру поблизу с. Безіменне 31 серпня 2014 р. із застосуванням протитанкових комплексів. 23-26 вересня 2015 р. поблизу н.п. Мелекіне були зафіксовані демонстраційно-залякувальні та провокаційні дії з бойовим маневруванням та підходом до українського узбережжя групи кораблів з керованою ракетною зброєю та десантно-висадочних катерів та інше.

Україна не може дозволити собі втратити доступ до Чорного моря та перетворитись на країну без виходу до нього, оскільки це матиме великий вплив на її безпеку, економічний розвиток та суверенітет. Але в сучасних умовах спроби доступу кораблів України до кримської В(М)ЕЗ та Керченської протоки, які Росія вважає своєю територією, потенційно може призвести до початку воєнних дій ЧФ РФ на морі. Тому, враховуючи досвід скритого застосування провідними морськими державами світу USV, аналізуючи перспективні розробки в галузі вдосконалення безпілотних надводних платформ, вивчення міжнародних керівних документів, що регламентують їх призначення і завдання є надзвичайно актуальним залучити безекіпажні малорозмірні надводні судна та безпілотні літальні апарати морського базування для виконання спільних завдань підрозділами морської піхоти, спеціального призначення та берегових ракетно-артилерійських військ ВМС ЗС України [3].

Більшість зарубіжних фахівців в якості ключового компонента військово-морських сил майбутнього розглядають надводні безпілотні транспортні засоби, іменовані як Unmanned Surface Vehicles (USV), Autonomous Surface Crafts (ASCs) або Autonomous Surface Vehicles (Vessels) (ASV). Через багатофункціональність за призначенням,

USV здатні виконувати різні функції, основними з яких є протичовнова війна, протимінна боротьба, патрулювання і захист акваторій, інші важливі функції [6].

Сьогодні USV належать до ефективних видів морської робототехніки, яка широко застосовується військово-морськими силами провідних морських країн світу. Подібні системи забезпечують використання сучасних технологій у діяльності ВМС, не потребують безпосереднього залучення людей у ролі екіпажу на борту судна, значно дешевші за традиційні корабельні технічні засоби й мають значно менші обмеження щодо гідрометеорологічних умов застосування. Не зважаючи на такі переваги, ЗСУ не мають у своєму складі USV, проте позитивний досвід застосування дослідних зразків цивільної техніки в Україні є – у Національному університеті кораблебудування ім. адмірала Макарова та в НДЦ “Державний океанаріум” ЗСУ. Це засвідчує можливість і доцільність програмно-цільового створення і впровадження такої техніки в інтересах ВМС ЗСУ.

Багатофункціональність USV обумовлює потребу використання високошвидкісних каналів передачі даних. Тому в якості сигналів фізичного рівня відповідних каналів зв'язку, аналогічно наземним роботизованим платформам та БПЛА [4, 8, 9], доцільно обрати сигнали OFDM.

Оскільки високі частоти дискретизації OFDM сигналів в аналого-цифрових перетворювачах (АЦП) накладають доволі жорсткі вимоги до швидкодії цифрового сегменту обробки даних, для спрощення цих вимог необхідно використовувати децимацію відліків АЦП.

Серед можливих підходів щодо реалізації проріджування інформаційного потоку заслуговує на увагу метод додаткового стробування відліків АЦП, запропонований в [10]. Сутність його полягає у двоетапній обробці даних, коли на першому етапі у режимі “ковзного вікна” здійснюється I/Q-демодуляція OFDM сигналів за виразами [10]:

$$U_t^c = U_t - 11 \cdot U_{t+2} + 15 \cdot U_{t+4} - 5 \cdot U_{t+6},$$

$$U_t^s = 5 \cdot U_{t+1} - 15 \cdot U_{t+3} + 11 \cdot U_{t+5} - U_{t+7}, \quad (1)$$

де t – порядковий номер відліку АЦП, а на другому етапі – додаткове стробування отриманих у такий спосіб відліків квадратурних складових сигналів:

$$W_y^c = \sum_{t=y-N}^{(y+1)N-1} \left\{ U_t^c \cdot \cos(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) + U_t^s \cdot \sin(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) \right\}$$

$$W_y^s = \sum_{t=y-N}^{(y+1)N-1} \left\{ U_t^s \cdot \cos(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) - U_t^c \cdot \sin(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) \right\} \quad (2)$$

де $U_t^{c(s)}$ – квадратурні складові сигналу на виході операції «ковзного вікна», $y = 0, Y-1$ – порядковий номер стробу, N – кількість відліків, над якими здійснюється операція додаткового стробування, ω_0 – центральна частота фільтру додаткового стробування, τ – період дискретизації в операції аналого-цифрового перетворення.

Враховуючи важливість завадозахищеного управління USV, слід вказати, що метод [10] підвищує завадозахищеність каналу зв'язку за рахунок зменшення рівнів бічних пелюсток амплітудно-частотної характеристики (АЧХ) операції додаткового стробування цифрових відліків, однак відповідне зниження не завжди

можливо вважати суттєвим, оскільки для першої бічної пелюстки воно не перевищує 16,7 дБ.

Більш значну завадозахищеність у зазначеному сенсі дозволяє отримати метод, описаний в [11]. Відмінність його полягає у тому, що цифрову I/Q-демодуляції відліків АЦП в режимі “ковзного вікна” та подальше додаткове стробування його відліків здійснюють одразу в обох квадратурних каналах сигналів, утворюючи масивів цифрових відліків за виразами:

$$W_{my}^c = \sum_{t=y \cdot N}^{(y+1)N-1} \left\{ U_{mt}^c \cdot \cos(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) + U_{mt}^s \cdot \sin(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) \right\},$$

$$W_{my}^s = \sum_{t=y \cdot N}^{(y+1)N-1} \left\{ U_{mt}^s \cdot \cos(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) - U_{mt}^c \cdot \sin(\omega_0 \cdot \tau \cdot t) \right\},$$
(3)

де $U_{mt}^{(s)}$ - квадратурні складові сигналів на виході операції “ковзного вікна” m-го квадратурного каналу (m=1; 2), для остаточного формування часткових сум цифрових відліків користуються формулами:

$$C_y = W_{1y}^c + W_{2y}^s, S_y = W_{1y}^s - W_{2y}^c. \quad (4)$$

При цьому в якості цифрових відліків напруг сигналів, над якими в квадратурних каналах здійснюють цифрову I/Q-демодуляцію в режимі “ковзного вікна”, використовують квадратурні відгуки першого каскаду I/Q-демодуляції безквадратурних вихідних сигналів єдиного АЦП. Структурна схема відповідних перетворень наведена на рис. 1.

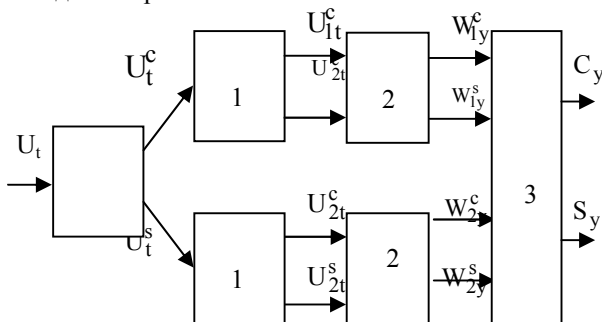


Рис. 1. Структурна схема додаткового стробування відліків АЦП [11], де цифрами позначено: “1” – цифрова I/Q-демодуляція в режимі “ковзного вікна” (1), “2” – додаткове стробування цифрових відліків сигналів за виразами (3), “3” – формування вихідних відліків за виразами (4).

Підвищення завадозахисту від дії позасмугових завад у методі [11] обумовлене, перш за все, використанням двох каскадів I/Q-демодуляції. Саме це дозволило, як зазначено в [11], досягти при 8-відліковому “ковзному вікні” (1) та 8-відліковому стробі пригнічення першої бічної пелюстки до 26,56 дБ (21,27 раз) замість 16,7 дБ (6,8 раз), що дає спосіб [10]. Для більш високих рівнів завадозахисту доцільно збільшити порядок (розмірність) процедури I/Q-демодуляції, а також тривалість стробів.

Для ілюстрації ефективності зазначеного способу додаткового стробування відліків АЦП було проведено дослідження АЧХ відповідної процедури децимації шляхом її математичного моделювання у програмному середовищі Mathcad.

В результаті моделювання були визначені АЧХ сукупності операцій розглянутих вище методів обробки сигналів.

На рис. 2 наведено порівняння графіків АЧХ, отриманих за результатами моделювання, що відповідають сукупності операцій:

попередньої 8-відлікової цифрової I/Q-демодуляції за виразом (1) (лінія 1);

відомого з [10] методу додаткового стробування (лінія 3) при тривалості стробу 8 відліків АЦП;

пропонованого для використання у каналах зв'язку з USV методу [11] (штрихова лінія 3) для 8-відлікового стробу;

традиційної процедури додаткового стробування за виразами [11] (лінія 2):

$$U_i^c = \sum_{t=i \cdot 8}^{(i+1)8-1} U_t \cdot \cos\left(\frac{\pi}{2} \cdot t\right),$$

$$U_i^s = \sum_{t=i \cdot 8}^{(i+1)8-1} U_t \cdot \sin\left(-\frac{\pi}{2} \cdot t\right), \quad (5)$$

де i=0, 1, ... - номер стробу, t – порядковий номер відліку АЦП.

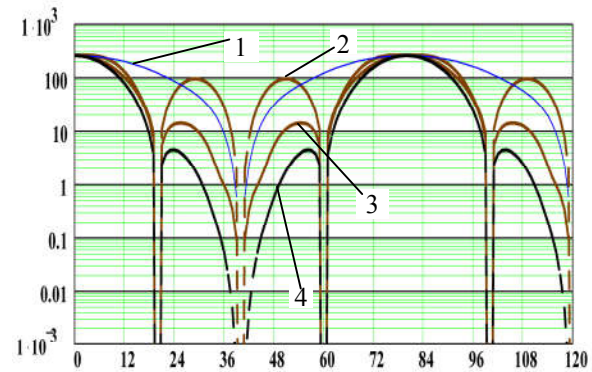


Рис. 2. Порівняння АЧХ що відповідають попередній цифровій I/Q-демодуляції відліків АЦП (лінія 1), способу [10] (вирази (2), лінія 2), способу [11] (вирази (3), (4), лінія 4).

Слід зазначити, що замість багатокаскадної схеми рис. 1 може бути використаний еквівалентний децимаційний фільтр. Наприклад, як зазначено в [12], відгук такого 11-відлікового еквівалентного фільтру, що відповідає сукупності 8-відлікового I/Q-демодулятора і 4-відлікового додаткового стробування за методом [11], має вигляд:

$$W^c = 6u_1 - 32u_3 + 52u_5 - 32u_7 + 6u_9;$$

$$W^s = u_0 - 17u_2 + 46u_4 - 46u_6 + 17u_8 - u_{10}. \quad (6)$$

Демодуляція OFDM сигналів у приймальному пристрої USV та пункту управління ним має здійснюватися таким чином, щоб врахувати АЧХ та фазочастотну характеристику процедури додаткового стробування відліків АЦП.

Для посилення завадозахисту від активних завад, що діють у смузі головної пелюстки АЧХ, наведених на рис. 2, необхідно переходити до застосування у складі пункту управління та USV

технології цифрових антенних решіток з формуванням прогалін у їх діаграмах спрямованості у напрямках знаходження постановників завад.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Таким чином, у статті представлено пропозиції, щодо перспектив розвитку безкіпажних малорозмірних надводних суден у складі ВМС ЗС України із викладенням напрямів та шляхів розв'язання проблеми забезпечення високої завадозахищеності каналу управління USV на основі використання сучасних радіотехнологій та

методів цифрової обробки сигналів. Представлені пропозиції доцільно використовувати під час розробки та виробництва вітчизняних перспективних USV з підвищеною завадозахищеністю каналу управління USV. Подальші дослідження будуть направлені на вирішення часткових наукових і науково-практичних завдань, основними з яких є розробка методів та способів обробки сигналів у цифровому сегменті системи управління USV, а також методів оцінки параметрів середовища розповсюдження радіосигналів.

Література

1. Блінцов В.С. Развитие безкипажной военно-морской техники в интересах защиты национальных интересов Украины на море. / Морская стратегия державы. Развитие та реализация морского потенциала Украины : материалы международного научного форума, 24-25 травня 2016 року. - К.: НУОУ ім. Івана Черняховського, 2016. - 216с.
2. Державна програма розвитку Збройних Сил України на період до 2020 року.. **3. Блінцов В.С.,** Кирилюк О.М., Красних О.В., Яким'як С.В. Безкіпажна військово-морська техніка – стан та оснащення ВМС ЗС України // Наука і оборона. – 2012. - №4. – С.61 – 64. **4. Слюсар В. И.** Радиолінії зв'язу с БПЛА: примеры реализации. //Електроника: наука, технологія, бізнес. – 2010. - № 5. - С. 56 - 60. **5. Слюсар В.И.** Военная связь стран НАТО: проблемы современных технологий.//Електроника: Наука, Технологія, Бізнес. – 2008. - № 4. – С. 66 - 71. **6. Amit Motwani.** A Survey of Uninhabited Surface Vehicles.//Technical report MIDAS.SMSE.2012.TR.001. – Marine and Industrial Dynamic Analysis School of Marine Science and Engineering Plymouth University. - 22 April, 2012. **7. Слюсар В.И.** Электроника в борьбе с терроризмом: защита гаваней. Часть 1. //Електроника: наука, технологія, бізнес. – 2009. - № 5. - С. 68 - 73. **8. Слюсар В.И.,** Сердюк П.Е. Средства связи с наземными

роботизированными системами: современное состояние и перспективы.//Электроника: наука, технологія, бізнес. - № 7 (139). – 2014. - С. 66 - 79. **9. Слюсар В. И.** Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО. //Электроника: наука, технологія, бізнес. – 2010. - № 3. - С. 80 - 86. **10.** Патент України на корисну модель № 46666. МПК (2006) G01S 7/36, H03D 13/00. Спосіб додаткового стробування відліків аналого-цифрового перетворювача. // Слюсар В.І., Малирчук М.В. - Заявка на видачу патенту України на корисну модель № u200909210 від 07.09.2009. - Патент опубліковано 25.12.2009, бюл. № 24. **11.** Патент України на корисну модель № 66359. МПК G01S 7/36 (2006.01), H03D 13/00 (2006.01). Спосіб додаткового стробування цифрових відліків сигналів. /Слюсар В.І., Копієвська В.С., Живило Є.О. - Заявка на видачу патенту України на корисну модель № u201110521 від 30.08.2011. - Патент опубліковано 26.12.2011, бюл. № 24. **12. Слюсар В.И.,** Живило Е.А. Цифровая фильтрация, эквивалентная тандемному квадратурному дециматору. //VI Международный научно-технический симпозиум «Новые технологии в телекоммуникациях» (ГУИКТ-Карпаты '2013), 21 - 25 января 2013. - Карпаты, Вышков.- С. 41 – 43. - http://slyusar.kiev.ua/VYSHKIV_2013_2.pdf.

МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТИ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ КАНАЛОВ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ БЕЗКИПАЖНЫХ МАЛОРАЗМЕРНЫХ СУДОВ

Евгений Александрович Живило

Военный институт телекоммуникаций и информатизации, Киев, Украина

Обеспечение охраны подводного пространства в пределах территориального моря Украины является одной из функций Вооруженных Сил Украины. Ответственность за осуществление этих функций возложена непосредственно на Военно Морские Силы Украины. Освещение обстановки в подводном пространстве является одной из задач для кораблей ВМС, успешное решение которой способствует выполнению функций обеспечения охраны подводного пространства, повышению защищенности кораблей от подводных угроз на стоянках и во время выполнения задач в малоопасных районах. На выполнение указанных функций в статье проанализирован двухэтапный метод дополнительного стробирования отсчетов аналого-цифрового преобразователя при I / Q-демодуляции OFDM сигналов, раскрыто и предложено более значительно отличный способ дополнительного стробирования цифровых отсчетов сигналов в режиме «скользящего окна». Изложенные предложения могут быть использованы в качестве основы дальнейших научных исследований по разработке теории цифровой обработки сигналов, а также при производстве цифровых сегментов систем управления и комплексов связи безкипажных малоразмерных надводных судов на базе современных технологий.

Ключевые слова: безкипажные малоразмерные надводные суда; цифровая обработка сигналов.

METHODS OF INCREASING THE INTERFERENCE OF HIGH-SPEED CHANNELS OF DATA TRANSMISSION OF UNMANNED SURFACE VEHICLE

Evgeny A. Zhivilo

Protection of the underwater space within the territorial sea of Ukraine is one of the functions of the Armed Forces of Ukraine. Responsibility for the exercise of these functions lies directly with the Naval Forces of the Armed Forces of Ukraine. The illumination of the situation in the underwater space is one of the tasks for the Navy's ships, the successful solution of which contributes to the functions of ensuring the protection of the underwater space, increasing the protection of ships from underwater threats in the parking lots and during tasks in less dangerous areas. In order to perform these functions, the article analyzes the two-step method of additional gating of analogue-digital converter counters during I / Q-demodulation of OFDM signals, and more significantly different way of additional gating of digital signal counts in a "sliding window" mode is offered. The above proposals can be used as a basis for further scientific research on the development of the theory of digital signal processing, as well as in the production of digital segments of control systems and communication complexes of small scale surface vessels based on modern technologies.

Keywords: *unmanned surface vehicle ; digital signal processing.*

References

1. Blintsov V.S. (2016), The development of non-lethal naval equipment in the interests of protecting Ukraine's national interests at sea. [Marine strategy of the state. Development and realization of the sea potential of Ukraine: materials of the international scientific forum], NUOU, Kiev, 216p. **2.** State Program of Development of the Armed Forces of Ukraine for the period up to 2020. **3. Blintsov V.S., Kirilyuk O.M., Krasnyh O.V., Yakymyak S.V.** (2012), Unmanned Naval Engineering - Condition and Equipment of the Navy of the Armed Forces of Ukraine. [Science and Defense], NUOU, Kiev, 61 - 64 p. **4. Slyusar V.I.** (2010), Communication lines from the UAV: examples of implementation. [Electronics: science, technology, business], Moscow, 56-60p. **5. Slyusar V.I.** (2008), NATO Military Links: Modern Technology Challenges. [Electronics: Science, Technology, Business], Moscow, 66 – 71p. **6. Amit Motwani** (2012) A Survey of Uninhabited Surface Vehicles . [Technical report MIDAS.SMSE.2012.TR.001], MIDAS, Plymouth. **7. Slyusar V.I.** (2009) Electronics in the fight against terrorism: protection of harbors. Part 1. [Electronics: science, technology, business], Moscow, 68 – 73p. **8. Slyusar V.I., Serdyuk P.E.** (2014), Means of communication with terrestrial robotized systems: current state and prospects.

[Electronics: science, technology, business], Moscow, 66 – 79p. **9. Sliusar V.I.** (2010), Data transmission from the UAV board: NATO standards. [Electronics: science, technology, business], Moscow, 80 – 86p. **10. Patent** of Ukraine for Utility Model No. 46666. IPC (2006) G01S 7/36, H03D 13/00. The method of additional gating analogue-digital converter samplers. / / Slyusar V.I., Malyarchuk M.V. - Application for the issuance of a patent of Ukraine to utility model No. u200909210 dated 07.09.2009. - The patent was published on December 25, 2009, by the bulletin. No. 24 **11. Patent** of Ukraine for Utility Model No. 66359. IPC G01S 7/36 (2006.01), H03D 13/00 (2006.01). The method of additional gating of digital signal counts. / Slyusar VI, Kopievskaia VS, Zhivilo Ye.O. - Application for issuance of the patent of Ukraine to utility model № u201110521 dated August 30, 2011. - The patent was published on December 26, 2011, by the bulletin. No. 24. **12. Slyusar V.I., Zhivilo E.A.** (2013), Digital filtering, equivalent to a tandem quadrature decimator. [Cifrovaya filtraciya, ekvivalentnaya tandemnomu kvadraturnomu decimatoru], available at [www http://slyusar.kiev.ua /VYSHKIV_2013_2.pdf](http://www.slyusar.kiev.ua/VYSHKIV_2013_2.pdf).