

УДК 621.317.08

А.В. РУДИК

Національний авіаційний університет, м. Київ

ВИКОРИСТАННЯ СТЕЛС-ТЕХНОЛОГІЙ В МОБІЛЬНИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ КОМПЛЕКСАХ ТА МЕТОДИ ВІЯВЛЕННЯ МАЛОПОМІТНИХ ОБ'ЄКТІВ

В статті коротко розглянуто найсучасніші технології, які провідні світові виробники використовують при розробці мобільних робототехнічних комплексів малої помітності, а також перспективні заходи, спрямовані на підвищення якості компонентів та конструктивної досконалості таких об'єктів. Розглянуто методи виявлення об'єктів, в яких використовуються стелс-технології, та показано, що тільки за рахунок системного підходу можна технічними засобами радіолокаційних станцій компенсувати зменшення ефективної поверхні розсіювання малопомітних об'єктів. Показано, що основним методом збільшення дальності до радіогоризонту є використання РЛС повітряного базування. Для організації колективної роботи декількох РЛС при виявленні малопомітних об'єктів перспективними є методи виявлення об'єктів за слідами взаємодії їх з навколишнім середовищем.

Ключові слова: стелс-технології, мобільний робототехнічний комплекс, малопомітний об'єкт, радіолокаційна станція, методи виявлення, відношення сигнал/шум.

A.V. RUDYK

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

USE STEALTH TECHNOLOGY IN MOBILE ROBOTIC SYSTEMS AND STEALTH – OBJECTS DETECTION METHOD

Abstract – The article briefly considered the most advanced technologies that use the world's leading manufacturers in the development of mobile robotic systems of low visibility and long-term measures to improve the quality of components and structural perfection of such facilities. Methods of detecting objects that use stealth technology, and show that only through a systematic approach by technical means can compensate radar reducing the effective surface scattering subtle objects. It is shown that the main method of increasing distance to the radio horizon is the use of airborne radar. To organize the collective work of several radar in detecting subtle objects is a promising method for detection of traces of their interaction with the environment.

Keywords: stealth technology, mobile robotic systems, nearly invisible object, radar, detection methods, the signal/noise ratio.

Вступ

Стелс-технології є комплексом технічних рішень, в результаті застосування яких зменшується рівень сигналів, що потрапляють від об'єкту на приймальні пристрої системи виявлення об'єктів. Об'єкти, в яких ефективно використовуються стелс-технології, в радіолокації відносяться до класу малопомітних об'єктів. Створення малопомітних об'єктів є наслідком науково-технічного прориву в дорогих наукоємних та високоєфективних технологіях і є надбанням переважно економічно високорозвинених держав, доктрини яких ґрунтуються на гарантованій військово-технічній перевазі над іншими країнами.

На даний час в авіабудуванні, кораблебудуванні, машинобудуванні та мобільній робототехніці визначилися три напрямки використання засобів малої помітності [1]:

- максимально можливе на даний час впровадження стелс-технологій на об'єкти, що будуються та проектується;
- використання окремих елементів “невидимості”, що викликано відсутністю достатнього фінансування розробок (в більшості випадків відмовляються від протирадіолокаційного покриття та деяких інших елементів повноцінних стелс-технологій);
- конструювання та виготовлення малорозмірних засобів малої помітності (мобільних роботів), які можуть бути використані для проведення операцій на ворожій території.

Основними науково-технічними напрямками сучасних стелс-технологій є теорія дифракції на складних об'єктах та створення і дослідження радіопоглинаючих матеріалів і покриттів. Розробка стелс-технологій починається з математичного моделювання розсіювання електромагнітної хвилі на об'єкті, радіолокаційна помітність якого має бути зменшена. Даний етап є принциповим для попередньої оцінки досяжності результату і дозволяє оптимізувати форму та електрофізичні характеристики об'єкту. Математичні та розрахункові моделі базуються на розв'язанні граничних задач дифракції електромагнітних хвиль на об'єктах складної форми, до складу яких входять спеціальні матеріали та покриття. Можливості сучасної обчислювальної техніки дозволяють створювати програмне забезпечення для моделювання розсіювання електромагнітної хвилі на таких складних об'єктах, як літаки та кораблі, враховуючи велику кількість обладнання, щілин, люків та інших нескладних, на перший погляд, деталей конструкції. Результатом такого моделювання є отримання архітектури об'єкту, що має форми, які задовольняють умови малопомітності. Досягнення малопомітності об'єкту за рахунок вибору архітектурної форми ґрунтується на тому, що радіолокаційний сигнал за аналогією з світловими променями поширюється прямолінійно відповідно до законів геометричної оптики. Це означає, що архітектурні форми об'єкту вибираються таким чином, щоб унеможливити відбиття сигналу в напрямку приймальної антени радіолокаційної станції (РЛС) за рахунок перевідбиття у інших напрямках. Для того, щоб радіолокаційний сигнал згідно законів геометричної оптики відбивався від поверхні мобільного об'єкту, розміри його поверхонь відбиття мають

бути значно більші довжини хвилі сигналу РЛС. Для ускладнення радіолокаційного наведення засобів нападу на мобільний об'єкт розсіяний від усієї поверхні об'єкту радіолокаційний сигнал формується таким чином, щоб підсумковий миттєвий еквівалентний центр об'єкту був винесений за його геометричні розміри.

Дуже важливим фактором створення малопомітності є матеріал, з якого виконаний корпус такого об'єкту. В провідних дослідницьких лабораторіях створюються речовини із заданими властивостями дійсної та уявної частин діелектричної проникності в потрібному діапазоні частот відповідно до вимог фізичної реалізованості. Однак аналогічні дослідження, пов'язані з створенням речовин із заданим законом зміни магнітної проникності у визначеному діапазоні частот, на даний час наштовхуються на складності практичної реалізації.

Постановка задачі

В статті необхідно:

1) проаналізувати найсучасніші технології, які провідні світові виробники використовують при розробці МРТК малої помітності, а також перспективні заходи, спрямовані на підвищення якості компонентів та конструктивної досконалості таких об'єктів.

2) розглянути методи виявлення об'єктів, в яких використовуються стелс-технології, та показати, що проблема виявлення об'єктів стелс-технологій може бути розв'язана тільки при системному підході до реалізації всіх технічних засобів РЛС та розробці методів і алгоритмів виявлення об'єктів, що працюють при малому відношенні сигнал/шум.

Основна частина

З появою мобільних робототехнічних комплексів (МРТК) широкого спектру дії постійно зростає потреба в створенні нових матеріалів та їх технологій отримання для впровадження у створювані зразки МРТК [2]. Розвиток напрямку створення вітчизняних МРТК є одним з ключових пріоритетів технічної модернізації української армії. Впровадження нових матеріалів та технологій їх виробництва для розробки нових зразків МРТК також дозволяє створити можливості технічної модернізації виробництва для переходу на новий технічний рівень.

На даний час основна частина деталей корпусів МРТК (зокрема, безпілотних літальних апаратів) виготовляється з полімерних композиційних матеріалів (ПКМ). В процесі розробки МРТК провідні світові виробники використовують такі найсучасніші технології:

- трансгенні біополімери при розробці ультралегких, надміцних та еластичних матеріалів з підвищеними характеристиками малопомітності для корпусів МРТК [3];
- вуглецеві нанотрубки, що використовуються в електронних системах МРТК, а також композитах для послаблення електромагнітного випромінювання [4];
- мікроелектромеханічні системи, які поєднують мікроелектронні та мікромеханічні елементи [5];
- водневі двигуни, які дозволяють істотно зменшити рівень шуму [6];
- інтелектуальні матеріали, що змінюють свою форму або виконують деяку задану функцію під впливом зовнішніх дій [7];
- інтелектуальні композити або особливим чином структуровані системи, що складаються з підсистем зчитування сигналу (дії), його обробки, формування відгуку, а також механізмів зворотного зв'язку, самодіагностування та самовідновлення;
- самовідновні матеріали: полімери, кераміка, метали та матеріали структури на основі графену [8];
- магнітні наночастинки, що забезпечують стрибок в розробці пристроїв зберігання інформації, істотно розширивши обчислювальні можливості роботизованих та безпілотних систем; потенціал технології, що досягається за рахунок використання спеціальних наночастинок розміром від 10 до 20 нм – 400 Гбіт/см².

В США завершуються роботи над волокном з нанесеним на нього тонкоплівковим покриттям, в яке інтегровані сонячні елементи. Таке волокно планується використовувати для виготовлення конструкційної тканини, здатної генерувати електроенергію для МРТК та його корисного навантаження. За умови успішного завершення проекту розробники отримають новий конструктивний матеріал, який дозволить створювати легкі малорозмірні МРТК з тривалим часом автономності [9].

Стратегічними напрямками для створення вітчизняних МРТК мають бути:

- розробка матеріалів для корпусу та двигуна;
- удосконалення технологій зменшення помітності;
- розробка полімерних композиційних матеріалів на основі вуглецевих та скляних наповнювачів, що мають унікальний комплекс властивостей: високі пружно-міцнісні характеристики (міцність до 2.5 ГПа, модуль пружності до 160 ГПа), низька вартість виробництва виробів, забезпечення високих характеристик радіопрозорості, низьке вологопоглинання та висока стійкість до ударних навантажень (міцність вуглепластику при стисканні після удару не менше 200 МПа).

Необхідно зазначити, що розробка та виробництво сучасного МРТК не є задачею машино-, корабле- або авіабудування у їх традиційному розумінні – виробництво наземного, плавального або літального апарату. Відмінною особливістю МРТК є його орієнтованість на виконувану задачу. Апарат в даному випадку виконує важливу, однак одну з багатьох функцій – засіб транспортування, а ключовим є слово «комплекс».

При виробництві вітчизняних МРТК нового покоління необхідно провести такі заходи, спрямовані на підвищення якості компонентів та конструктивної досконалості:

- розробку та виробництво сучасних конструкційних матеріалів: композиційних, в тому числі з використанням нанопокриттів, а також зварюваних, корозійностійких алюміній-літійових сплавів пониженої густини, технологій зварювання у твердій фазі [10];

- фізичне комплексування та інтеграція в корпусі МРТК бортового обладнання та різних систем;
- вдосконалення сучасних комп'ютерних технологій, включаючи багатопроекторні системи збору, обробки та зберігання даних;
- створення систем автоматичного управління, спряжених з системами передавання інформації, шифрування та стискання даних;
- розробку технологій високостійких та заводозахисних засобів зв'язку, включаючи космічні;
- вдосконалення технологій дистанційного зондування навколишнього середовища (радіолокація, оптоелектронні системи, багатфункціональні давачі);
- розробку та використання енергетичних технологій, використання альтернативних джерел енергії: акумулятори надвеликої ємності, сонячна енергія, паливні елементи великої ємності;
- впровадження засобів та систем супутникової навігації GPS, ГЛОНАСС (з можливостями обмеження до розв'язання поточного конфлікту на сході України) та геоінформаційних систем для забезпечення точного позиціонування МРТК;
- вдосконалення технології обробки зображень та розпізнавання образів;
- вдосконалення технології людино-машинного інтерфейсу та систем штучного інтелекту;
- розробку технологій швидкодіючих систем керування для забезпечення курсової стійкості та керованості МРТК з метою виключення негативної дії сил різної природи та стохастичних навантажень при переміщенні;
- створення силової установки з високим ККД для забезпечення вимог щодо енергетичної ємності та питомої потужності при забезпеченні максимальної тривалості та скритності переміщення, що потребує використання нових матеріалів та технологій;
- розробку покращеної технології зменшення помітності – реалізація особливої форми конструкції МРТК та широке застосування радіопоглинаючих, радіорозсіюючих та адаптивних матеріалів і покриттів у конструкції МРТК.

Як видно з літературних джерел [11], за рахунок використання архітектурного захисту мобільного об'єкту та радіопоглинаючих матеріалів і покриттів досягається зменшення ефективної відбивальної поверхні об'єкту в 10 та більше разів. Тому що інтенсивність прийнятого сигналу РЛС є функцією відстані до об'єкту в четвертому степені [12], то це приводить до зменшення дальності виявлення у $1.5 \div 2$ рази.

Таким чином, з точки зору радіолокаційних засобів виявлення малопомітні об'єкти мають такі характерні особливості:

- суттєво зменшений рівень відбитого радіолокаційного сигналу в напрямку приймальної антени за рахунок радіопоглинання та перевідбиття в інших напрямках, результатом чого є зменшення відношення корисного сигналу до шуму;
- перевідбиття радіолокаційного сигналу від плоских поверхонь відносно великих розмірів відбувається з формуванням вузької діаграми спрямованості та наявністю бічних пелюсток;
- зменшення відстані до радіогоризонту за рахунок вибору відповідних архітектурних форм малопомітного об'єкту.

З вищенаведеного можна визначити такі напрямки розробки методів виявлення малопомітних об'єктів в радіолокації:

- розробка методів виявлення об'єктів за прямим відбитим радіолокаційним сигналом, що надходить на приймальну антену РЛС;
- збільшення відстані до радіогоризонту для стійкого виявлення об'єктів;
- організація радіолокаційної системи спостереження таким чином, щоб для виявлення можна було використовувати перевідбитий від об'єкту радіолокаційний сигнал.

Згідно першого напрямку необхідно з рівняння дальності радіолокації визначити потужність прийнятого відбитого сигналу P_D в залежності від параметрів РЛС для спільної антени для передачі та прийому:

$$P_D = \frac{P_B G_A S_A \sigma}{16\pi^2 D^4} = \frac{P_B S_A^2 \sigma}{4\pi D^4 \lambda^2}, \quad (1)$$

де множник $\frac{P_B G_A}{4\pi D^2}$ – потужність випромінювання зондуючого імпульсу на відстані D від РЛС з потужністю

випромінювання РЛС P_B ; $G_A = \frac{4\pi S_A}{\lambda^2}$ – коефіцієнт підсилення антени; σ – ефективна площа розсіювання малопомітного об'єкту; S_A – ефективна площа апертури антени; λ – довжина хвилі, на якій відбувається випромінювання зондувального імпульсу.

Таким чином, зменшення ефективної площі розсіювання малопомітного об'єкту приводить до пропорційного зменшення потужності прийнятого відбитого сигналу. Зменшити вплив цього чинника можна технічними засобами за рахунок збільшення потужності зондувального імпульсу передавача, збільшення чутливості приймача, а також вибору оптимальної конструкції антени.

Тому що зменшення ефективної площі розсіювання малопомітного об'єкту приводить до зменшення відношення сигнал/шум приймача, то ефективність виявлення малопомітних об'єктів залежить від використовуваних методів та алгоритмів обробки радіолокаційної інформації.

Розглянемо методи підвищення ефективності виявлення, основані на використанні апаратних засобів. Очевидним, однак практично важко реалізуваним методом є підвищення енергетики зондувального сигналу РЛС за рахунок збільшення потужності імпульсу та часу його випромінювання (для

підвищення в десятки разів енергії зондувального сигналу РЛС за рахунок збільшення потужності імпульсу на даний час немає відповідних технічних засобів, а збільшення тривалості зондувального імпульсу τ_{3I} приведе до погіршення розділової здатності РЛС за дальністю $\Delta D = 0.5c\tau_{3I}$, де c – швидкість світла.

Реальним способом збільшення енергії є випромінювання за період зондування не одного, а декількох імпульсів, що розрізняються за кодовими ознаками. Це дозволяє для деякої кількості імпульсів в пакеті без уповільнення огляду позбавитися від неоднозначності визначення дальності за прийнятим сигналом. Даний метод реалізується в [13], де пропонується побудована за когерентним принципом імпульсна РЛС, що використовує сигнали з внутрішньоімпульсною фазовою маніпуляцією.

Енергію прийнятого сигналу також можна збільшити за рахунок збільшення кількості відбитих сигналів в пакеті, тобто часу накопичення ансамблю відбитих сигналів. Однак пряма реалізація такого підходу приводить до уповільнення огляду контрольованої зони та, відповідно, до необхідності використання більшої кількості РЛС. Для виключення цього недоліку в роботі [1] запропонована модифікація даного підходу, в якій відбувається збільшення відношення сигнал/шум практично без збільшення енергії відбитого сигналу. Також даний метод виконує стискання первинної радіолокаційної інформації без втрати інформативності, що особливо важливо тому, що обробка радіолокаційної інформації має відбуватися в реальному масштабі часу.

Як видно з основного рівняння радіолокації (1), потужність прийнятого відбитого сигналу P_D пропорційна квадрату ефективної площі апертури антени S_A , а від ефективної площі розсіювання малопомітного об'єкту залежить лінійно. Тому за рахунок розробки або вибору відповідної конструкції антени можна суттєво компенсувати вплив зменшення ефективної площі розсіювання малопомітного об'єкту. Необхідно зазначити, що ефективним буде тільки системний підхід до вибору конструкції антени, який враховує збільшення енергії відбитих імпульсів при збільшенні відношення сигнал/шум за рахунок розкриття діаграми спрямованості антени.

Таким чином, можна зробити висновок, що тільки при системному підході до вибору та розробки технічних засобів, а також наявності відповідних методів та алгоритмів обробки радіолокаційних сигналів, що працюють при малих відношеннях сигнал/шум, можна в значній мірі нейтралізувати дію стелс-технологій, які основані на зменшенні рівня відбитого сигналу, та підвищити ймовірність виявлення малопомітного об'єкту.

Відстань до радіогоризонту залежить тільки від висоти установки антени та висоти об'єкту виявлення. Тому при зменшенні висоти об'єкту виявлення доводиться збільшувати величину підняття антени РЛС, яка залежить від задач, що виконуються станцією [14]:

$$D_{np} \cong 4.12(\sqrt{h_a} + \sqrt{h_u}), \quad (2)$$

де D_{np} – дальність прямої видимості, км; h_a – висота підняття електричного центру антени, м; h_u – висота цілі, м.

Таким чином, зменшення висоти цілі з 3 м до 1.5 м при незмінній висоті підняття електричного центру антени приводить до зменшення дальності прямої видимості на 2 км. З іншого боку, для неперервного моніторингу зони шириною до 200 км при мінімальній висоті цілі 1 м необхідно підняти антену на висоту не менше 2300 м, що можливо тільки при розміщенні антени або РЛС на борту літального апарату. Використання РЛС повітряного базування залежить від якості розв'язання задач врахування динамічно складних умов роботи та наявності методів і алгоритмів виявлення об'єктів на фоні відбитих від земної або водної поверхні сигналів.

Необхідно зазначити, що опромінення об'єкту під кутом до горизонтальної площини змінює ефективну площу розсіювання, що може підвищити ефективність виявлення малопомітних об'єктів. Крім того, з'являється можливість виявлення об'єктів за слідами взаємодії їх з водним середовищем (хвилі, що розходяться за об'єктом, турбулізація поверхневих шарів води, збудження у воді хвильових процесів, зміна фізико-хімічних властивостей води та ін.). Однак на даний час ці процеси недостатньо досліджені з точки зору радіолокаційної видимості, що не дозволяє в повній мірі використовувати їх при виявленні малопомітних об'єктів.

Для виявлення об'єктів стелс-технологій за перевідбитим в іншому напрямку зондувальним сигналом використовуються багатопозиційні РЛС в режимі кооперативної роботи. Окремим випадком багатопозиційної радіолокації є двопозиційна (рознесена) система активної локації з одним передавачем (бістатична система). Кооперативність прийому відбитих сигналів полягає у використанні на різних позиціях вторинного випромінювання об'єкту, який зондується з будь-якої однієї позиції.

Висновки

1. Коротко розглянуто найсучасніші технології, які провідні світові виробники використовують при розробці МРТК малої помітності, а також перспективні заходи, спрямовані на підвищення якості компонентів та конструктивної досконалості таких об'єктів.

2. Розглянуто методи виявлення об'єктів, в яких використовуються стелс-технології, та показано, що тільки за рахунок системного підходу можна технічними засобами РЛС компенсувати зменшення ефективної поверхні розсіювання малопомітних об'єктів.

3. Тому що наслідком малопомітності об'єкту є зменшення відношення сигнал/шум, то в

приймальному пристрої РЛС даний параметр має бути максимально збільшений.

4. Показано, що основним методом збільшення дальності до радіогоризонту є використання РЛС повітряного базування. Для організації колективної роботи декількох РЛС при виявленні малопомітних об'єктів перспективними є методи виявлення об'єктів за слідами взаємодії їх з навколишнім (зокрема, водним) середовищем.

5. Проблема виявлення об'єктів стелс-технологій може бути розв'язана тільки при системному підході до реалізації всіх розглянутих технічних засобів РЛС та розробці методів і алгоритмів виявлення об'єктів, що працюють при малому відношенні сигнал/шум.

Література

1. Бондаренко Е.А., Волобоев В.П., Клименко В.П. Стелс-технологии в кораблестроении и методы противодействия радиолокационных станций берегового (морского, воздушного) базирования // Математичні машини і системи, 2006, №4. – С. 73-82. ISSN 1028-9763.
2. Буренок В.М., Ивлев А.А., Корчак В.Ю. Развитие военных технологий XXI века: проблемы, планирование, реализация. – Тверь: ООО “Купол”, 2009. – 624 с.
3. Кондратьев А.Е. Боевые роботы США – под водой, в небесах и на суше // Электр. период. изд. “Независимое военное обозрение”, 2010 (<http://www.nvo.ru>).
4. Мурадян В.Е., Соколов Е.А., Бабенко С.Д., Моравский А.П. Диэлектрические свойства композитов, модифицированных углеродными наноструктурами, в микроволновом диапазоне // Журнал технической физики, 2010. Т. 80 (№ 2). С. 83-87.
5. США задумались о новой системе инерциальной навигации на базе микроядерного магнитного резонанса (<http://www.complenta.ru>).
6. Лоскутников А.А. Оценка возможности применения в силовых установках беспилотных летательных аппаратов источников электричества на основе топливных элементов // Молодой ученый, 2011, №6. Т. 1. С. 99-101.
7. Бобович Б.Б. Неметаллические конструкционные материалы: Учебное пособие. – М.: МГИУ, 2009. – 384 с.
8. Интеллектуальные авиаконструкционные материалы и микросистемная техника // В сборнике материалов конференции «Будущее индустрии». – М.: МФТИ, 2012. – 32 с.
9. Сайт «Армейский вестник» (<http://www.armstass.ru>).
10. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии, 2012, №8. – С. 7-17.
11. Visby Class corvette – the true stealth (www.kockums.se/SurfaceVessels/visby.html).
12. Справочник по радиолокации. Основы радиолокации / Под ред. М. Скольникова: Пер. с англ. под общей ред. К.Н. Трофимова. – М.: Советское радио, 1976. – Т. 1. – 455 с.
13. Антонов Б.П., Коржавин В.А., Никольцев В.А., Иванов В.П., Ицкович Ю.С., Левин М.З., Баландин В.С., Бронштейн Г.Т., Зобнин В.Я. Радиолокационная станция. Патент Российской Федерации, RU 2131612 C1: 21.09.1998.
14. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск: Учебник. Под общей ред. В.Н. Тяпкина. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2011. – 536 с.

References

1. Bondarenko Ye.A., Voloboev V.P., Klimenko V.P. Stels-tehnologii v korablestroyenii i metodi protivodeystviya radiolokatsionnih stantsiy beregovogo (morskogo, vozdušnogo) bazirovaniya // Matematichni mashini i sistemi, 2006, №4. – P. 73-82. ISSN 1028-9763.
2. Burenok V.M., Ivlev A.A., Korchak V.Yu. Razvitiye voennih tehnologiy XXI veka: problemi, planirovaniye, realizatsiya. – Tver: ООО “Купол”, 2009. – 624 p.
3. Kondratyev A.Ye. Boyevie roboti USA – pod vodoy, v nebesah i na sushe // Elektr. period. izd. “Независимое военное обозрение”, 2010 (<http://www.nvo.ru>).
4. Muradyan V.Ye., Sokolov Ye.A., Babenko S.D., Moravskiy A.P. Dielektricheskiye svoystva kompozitov, modifitsirovannih uglernodnimi nanostrukturami, v mikrovolnovom diapazone // Zhurnal tehnikeskoy fiziki, 2010. T. 80 (№ 2). P. 83-87.
5. USA zadumalis o novoy sisteme inertsialnoy navigatsii na baze mikroyadernogo magnitnogo rezonansa (<http://www.complenta.ru>).
6. Loskutnikov A.A. Otsenka vozmozhnosti primeneniya v silovih ustanovkah bespilotnih letatelnykh apparatov istochnikov elektrichstva na osnove toplivnykh elementov // Molodoy ucheniy, 2011, №6. T. 1. P. 99-101.
7. Bobovich B.B. Nemetallicheskiye konstruksionniye materialy: Uchebnoye posobiye. – M.: MGIU, 2009. – 384 p.
8. Intellektualniye aviakonstruksionniye materialy i mikrosistemnaya tehnika // V sbornike materialov konferentsii «Budushee sndustrii». – M.: МФТИ, 2012. – 32 p.
9. Sait «Armeyskiy vestnik» (<http://www.armstass.ru>).
10. Kablov Ye.N. Strategicheskiye napravleniya razvitiya materialov i tehnologiy ih pererabotky na period do 2030 goda // Aviatsionniye materialy i tehnologii, 2012, №8. – P. 7-17.
11. Visby Class corvette – the true stealth (www.kockums.se/SurfaceVessels/visby.html).
12. Spravochnik po radiolokatsii. Osnovi radiolokatsii / Pod red. M. Skolnika: Per. s angl. pod obschey red. K.N. Trofimova. – M.: Sovetskoye radio, 1976. – T. 1. – 455 p.
13. Antonov B.P., Korzhavin V.A., Nikoltsev V.A., Ivanov V.P., Itskovich Yu.S., Levin M.Z., Balandin V.S., Bronshtein G.T., Zobnin V.Ya. Radiolokatsionnaya stantsiya. Patent Rossiyskoy Federatsii, RU 2131612 C1: 21.09.1998.
14. Osnovi postroyeniya radiolokatsionnih stantsiy radiotekhnicheskikh voysk: Uchebnik. Pod obschey red. V.N. Tyapkina. – Krasnoyarsk: Sibirskiy federalniy universitet, 2011. – 536 p.

Рецензія/Peer review : 14.5.2016 р.

Надрукована/Printed :26.6.2016 р.

Рецензент :