

УДК 621.396.96

М.М. Бречка, Г.С. Залевський, В.О. Василюк, О.І. Сухаревський

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

МЕТОД ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ СПЕКТРІВ ГВИНТОВОЇ МОДУЛЯЦІЇ ВЕРТОЛЬОТІВ

Аналізується сучасний стан досліджень вторинної модуляції радіолокаційних сигналів, відбитих повітряними об'єктами. Розглядається метод чисельного моделювання характеристик розсіювання повітряних об'єктів із турбогвинтовими двигунами, а також спектрів флуктуацій сигналів, відбитих зазначеними об'єктами. При моделюванні застосовано розроблений авторами раніше високочастотний асимптотичний метод, який базується на оцінюванні вкладу гладких і кромкових ділянок поверхні об'єкту у повне розсіяне поле. Демонструються результати розрахунків ефективної поверхні розсіювання і спектрів гвинтової модуляції вертольотів. Обговорюються потенційні можливості використання спектрів гвинтової модуляції вертольотів для отримання додаткової радіолокаційної інформації про такі цілі для їх розпізнавання.

Ключові слова: ефективна поверхня розсіювання, математичне моделювання характеристик вторинного випромінювання радіолокаційних повітряних цілей, спектр гвинтової модуляції, розпізнавання повітряних цілей.

Постановка проблеми

Сучасні повітряні операції характеризуються застосуванням повітряних об'єктів різного призначення (різних типів). Бойові можливості засобів повітряного нападу та їх типаж постійно розширюються. Зазначене розширення зумовлює підвищення вимог до складу і якості радіолокаційної інформації про повітряні цілі та засобів її отримання. Ефективність сил та засобів протиповітряної оборони може бути суттєво підвищена за рахунок реалізації функції радіолокаційного розпізнавання, оцінювання функціонального стану окремих цілей і задуму їхніх дій. В якості ознак розпізнавання повітряних об'єктів можуть використовуватися параметри спектрів вторинної (роторної, гвинтової, турбінної) модуляції, зумовленої обертанням лопастей (лопаторок) двигунів [1-5]. При розробці алгоритмів радіолокаційного розпізнавання повітряних цілей важливо знати основні закономірності їх вторинного випромінювання. Сучасна комп'ютерна техніка дозволяє реалізовувати складні методи математичного моделювання вторинного випромінювання повітряних цілей, що дають можливість оцінювати їх характеристики розсіювання з точністю, достатньою для практичного використання. Це пояснює переваги комп'ютерного моделювання у порівнянні з вартісними (а в деяких випадках неможливими) фізичними експериментами. У даній статті розглядається метод математичного моделювання характеристик розсіювання повітряних об'єктів складної форми з турбогвинтовими двигунами, а також спектрів вторинної модуляції сигналів, відбитих запропонованими об'єктами. Демонструються результати розрахунків характеристик розсіювання вертольотів Мі-8МТ і Мі-24П, спектрів гвинтової модуляції сигналів, відбитих рухомими вертольотами, обговорюються можливості використання спектрів гвинтової модуляції вертольотів для їх розпізнавання.

Аналіз літератури і постановка задачі

Ефект виникнення вторинної модуляції радіолокаційних сигналів, зумовленої обертанням лопастей (лопаторок) двигунів, відомий спеціалістам з середини минулого сторіччя [1 – 4]. Цілеспрямовані дослідження з даного питання ведуться науковцями Військової Академії Республіки Білорусь [2, 3]. Правильність запропонованої ними гіпотези щодо наявності у відбитому сигналі не тільки випадкової, але й закономірної квазіперіодичної модуляції його параметрів, яку можна використовувати для розпізнавання повітряних цілей, було підтверджено фізичними експериментами [2, 3].

Основні зусилля науковців із Мінська спрямовано на дослідження, пов'язані із фізичними експериментами. Вагомий вклад у дослідження фізичних основ вторинної модуляції, впливу на рішення задач радіолокаційного спостереження, узагальнення основних напрямків практичного використання належить професору М. М. Слюсарю [2, 3]. У його роботах показано високі потенційні можливості методів врахування ефекту вторинної модуляції для підвищення інформативності радіолокаційної інформації, а також для розвитку техніки випробувань авіаційних двигунів і технічної діагностики.

Разом з цим проведення фізичних досліджень пов'язано із значними фінансовими і технічними витратами, а щодо зарубіжних повітряних об'єктів є практично неможливими.

У зв'язку з цим виникає необхідність створення математичних моделей, що дозволяють отримувати параметри вторинної модуляції реальних повітряних цілей. Такі дослідження також проводяться, зокрема і у Харківському університеті Повітряних Сил. Так у роботі [6] за допомогою простої математичної моделі обґрунтовано умови спостереження (отримання) спектрів

вторинної модуляції щодо структур, що обертаються. Статтю [7] присвячено розробці методу розрахунку розсіювання електромагнітних хвиль пропелером повітряної цілі. У роботі [8] на моделі простіших компонентів [4] досліджено вплив вторинної модуляції сигналів на форму радіолокаційних дальнісних портретів. Результати досліджень, що містяться у роботах [5 – 8], підтверджують експериментальні дані [1 – 3] і доповнюють їх.

Дослідження показали, що використання вторинної модуляції для розпізнавання більшості турбореактивних повітряних об'єктів можливе в РЛС із довжиною хвилі не більше 10-15 см. Гвинтові повітряні об'єкти можуть розпізнаватись за параметрами гвинтової модуляції будь-якими РЛС, у тому числі метрового діапазону [2-8]. Разом з цим використання вторинної модуляції ускладнюється тим, що лопатки турбін затіняються корпусом двигунів, швидкість обертання лопаток турбореактивних двигунів (на відміну від турбогвинтових) може змінюватись у широких межах, модуляція, зумовлена турбореактивними двигунами створюється декількома ступенями турбіни, що призводить до появи додаткових складових у спектрі модуляції [2, 4, 5-8].

Для багатьох практичних задач радіолокації необхідно мати більш точні дані про характеристики вторинного випромінювання реальних динамічних повітряних об'єктів, які мають у своєму складі турбогвинтові двигуни. Методи математичного моделювання повинні враховувати детальну взаємодію електромагнітних хвиль, відбитих від фюзеляжу складної форми і рухомих елементів (гвинтів, лопаток) двигунів, їх вклад у сумарне розсіяне поле.

Метою статті є створення методу розрахунку характеристик вторинного випромінювання динамічних повітряних об'єктів із турбогвинтовими двигунами (ефективної поверхні розсіювання (ЕПР), спектрів вторинної модуляції), який повинен враховувати зазначені вище фактори.

Основна частина

1. Метод розрахунку спектрів вторинної модуляції повітряних об'єктів

Для розрахунку характеристик вторинного випромінювання динамічних об'єктів із турбогвинтовими двигунами застосовано розроблений авторами раніше високочастотний асимптотичний метод розрахунку характеристик розсіювання повітряних об'єктів складної форми, в тому числі з неідеально відбиваючою поверхнею [9], заснований на роздільному оцінюванні вкладів гладких і кромкових частин поверхні об'єкта в загальне розсіяне електромагнітне поле. Метод дозволяє отримувати характеристики розсіювання (розсіяне поле, ЕПР цілі як функції просторових координат та (або) частоти) повітряних ідеально провідних об'єктів (повністю або частково покритих радіопоглинаючим матеріалом). Поверхня досліджуваного об'єкта може мати нерегулярності у вигляді зламів (також покритих радіопоглинаючим

покриттям). В статті у якості повітряних об'єктів розглядаються вертольоти. Їх поверхня (включаючи поверхні лопастей гвинтів) вважається ідеально провідною, що містить як гладкі, так і кромкові ділянки.

Моделювання характеристик розсіювання повітряного об'єкта складної форми вимагає математичного опису його поверхні [9]. При розрахунку характеристик розсіювання вертольотів гладкі частини їх поверхні апроксимуються ділянками тривісних еліпсоїдів. Кромкові ділянки задаються математичним описом ліній зламу. Передбачається, що лінія зламу поверхні – ділянка плоскої кривої. Криволінійне ребро апроксимується ділянкою еліпса, прямолінійне – відрізком прямої.

У статті досліджуються характеристики вторинного випромінювання транспортно-бойового вертольота Мі-8МТ [10] і багатоцільового ударного вертольота Мі-24П [11]. Технічні характеристики вертольотів, суттєві при дослідженні їх вторинного випромінювання, подано у таблиці 1.

Таблиця 1
Технічні характеристики вертольотів
Мі-8МТ та Мі-24П

Технічні характеристики	Мі-8МТ	Мі-24П
Діаметр головного гвинта, м	21,3	17,30
Швидкість обертання головного гвинта, об/хв	192	240
Діаметр хвостового гвинта, м	3,91	1,50
Довжина (висота), м	18,42 (5,34)	17,51 (3,90)
Швидкість максимальна (крейсерська), км/г	250 (230)	320 (270)
Практична стеля, м	5000	4500

Відповідно до конструкції розроблено моделі їх поверхонь (включаючи гвинти), які представлено на рис. 1 [12].

При моделюванні гладка частина поверхні вертольота Мі-8МТ апроксимувалась ділянками 96 тривісних еліпсоїдів. Злами поверхні моделювались за допомогою 11 прямих кромкових ділянок розсіювання. Гладка частина вертольота Мі-24П апроксимувалась ділянками 86 еліпсоїдів. Злами поверхні представлялися 12 прямими кромковими ділянками розсіювання.

Вихідними даними розробленого алгоритму чисельного розрахунку є значення комплексної амплітуди електричної напруженості E розсіяного об'єктом поля при заданих ракурсі опромінення (азимут β і кут місця ε відносно точки прийому або в разі рознесеної локації щодо точок опромінення і прийому) і частоті зондувального коливання [12].

Для моделювання характеристик об'єкта, що рухається задається траєкторія його руху – набір

точок у просторі, кожній з яких відповідає певний ракурс опромінення та прийому, що змінюється відповідно до заданих швидкості і напрямку руху об'єкту, а також інтервалу дискретизації за часом Δt . Обертання гвинта моделюється за допомогою задання його ракурсів щодо точок опромінення та прийому в моменти часу, взяті з інтервалом Δt , з урахуванням швидкості його обертання. При зондуванні з передньої півсфери обертання хвостового гвинта не враховується оскільки його внесок малий в порівнянні з головним гвинтом, що має значно більші розміри.

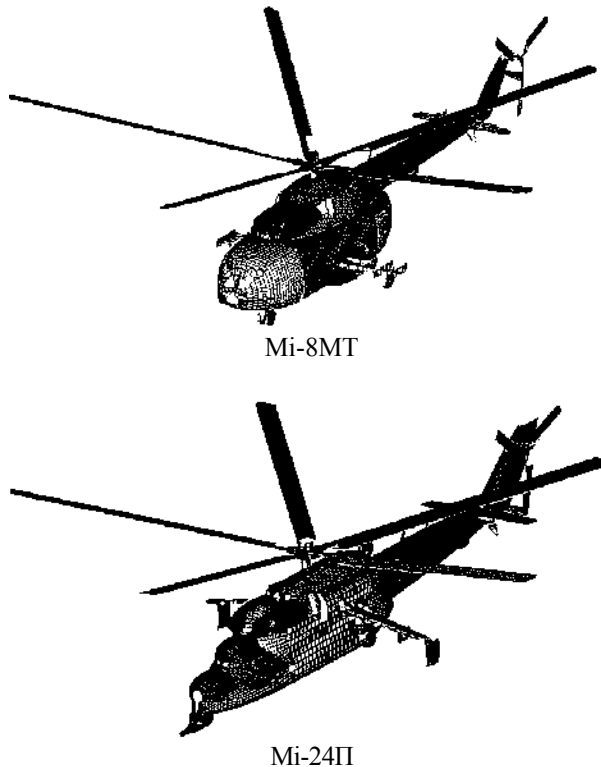


Рис. 1. Моделі поверхонь вертольотів

2. Результати математичного моделювання характеристик вторинного випромінювання вертольотів Mi-8MT і Mi-24П

Результати розрахунків характеристик вторинного випромінювання вертольотів відповідають випадку суміщеної локації, опромінення монохроматичним сигналом з довжиною хвилі $\lambda_0=3$ см (несуча частота $f_0=10$ ГГц). Оскільки розраховані характеристики вторинного випромінювання для двох ортогональних поляризацій зондувальної хвилі відрізняються незначно, далі у роботі демонструються результати моделювання, що відповідають лише горизонтальній поляризації (вектор E орієнтований в азимутальній площині). Кут місця складає $\varepsilon = -3^\circ$ (зондування з нижньої півсфери). На рис. 2 представлено діаграми зворотного вторинного випромінювання (ДЗВВ – залежність ЕПР σ від азимута при

фіксованому куті місця) окремо фюзеляжу і головного гвинта вертольота Mi-8MT. Азимуту $\beta=0$ відповідає напрямок зондування в носову частину вертольота. Фюзеляж і гвинт нерухомі.

Аналогічні ДЗВВ для вертольота Mi-24П представлено на рис. 3. Порівняння значень σ фюзеляжу і головного гвинта вертольотів показує, що внесок гвинта в загальну ЕПР (у повне розсіяне поле) в середньому на 18-25 дБ менше вкладу фюзеляжу. Таке співвідношення свідчить про те, що вплив гвинта на відбитий сигнал буде помітно на дальностях близько 10 км.

Далі на рис. 4 зображено спектри гвинтової модуляції сигналів, відбитих вертольотами. При розрахунках передбачалося, що вертольоти рухалися на постійній висоті 2 км з крейсерською швидкістю (для Mi-8MT – 230 км/г, для Mi-24П – 270 км/г) з нульовим параметром ($\beta=0^\circ$). Вертольоти опромінювалися монохроматичним сигналом. Інтервал спостереження відповідав 5 повним обертам головного гвинта і становив для Mi-8MT 0,312 с, а для Mi-24П – 0,25 с. Кут місця об'єкта за інтервал спостереження змінювався на дві тисячні градуса і вважався фіксованим, рівним $\varepsilon = -3^\circ$.

Результати розрахунків показують, що спектри гвинтової модуляції є несиметричними, і лінійчати-ми. Несиметричність спектру пояснюється формою поперечного перерізу лопастей вертольотів, які мають округлену передню сторону і загострену задню. У результаті колового руху інтенсивність відбиття від лопасті, що здійснює рух уперед (лопасть повернена округленою стороною до напрямку зондування) відрізняється від аналогічної інтенсивності відбиття від лопасті, що здійснює рух назад (лопасть повернена загостреною стороною до напрямку зондування).

Інтервал між спектральними лініями, яким відповідає максимум енергії відбитого сигналу, визначається частотою обертання гвинта F_b і кількістю лопастей N_l . Ширина спектра гвинтової модуляції залежить від частоти обертання гвинта F_b і довжини його лопасті R_b та становить величину $F_c=4\pi R_b F_b / \lambda_0$. Отримані результати якісно збігаються з даними, отриманими іншими авторами, у тому числі в результаті фізичних експериментів [2, 3].

Враховуючи отримані для вертольотів Mi-8MT, Mi-24П результати, оскільки частота обертання гвинтів вертольотів постійна, параметри їх спектрів вторинної модуляції (ширина спектру, інтервал між спектральними лініями) можуть використовуватись у якості ознак для розпізнавання вертольотів.

Очевидно, що отримання і використання спектрів гвинтової модуляції можливо в РЛС із зондувальними сигналами, що забезпечують добру розділяючу здатність за частотою (реалізують достатньо великий час контакту з повітряним об'єктом).

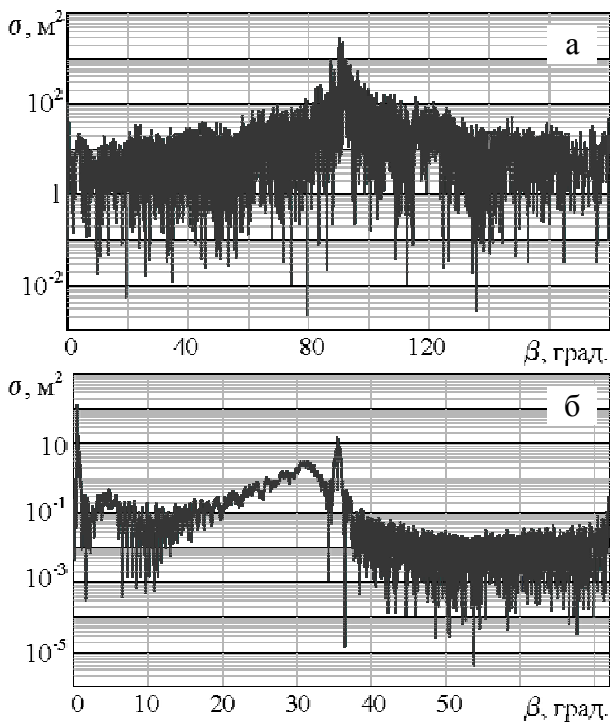


Рис. 2. ДЗВВ фюзеляжу (а) і головного гвинта (б) вертольота Мі-8МТ. $\lambda_0=3$ см. $\epsilon=-3^\circ$

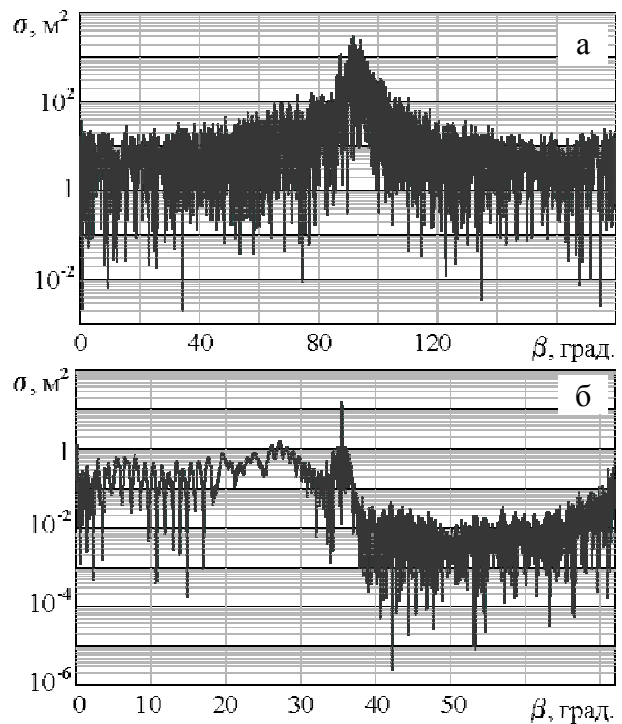


Рис. 3. ДЗВВ фюзеляжу (а) і головного гвинта (б) вертольота Мі-24П. $\lambda_0=3$ см. $\epsilon=-3^\circ$

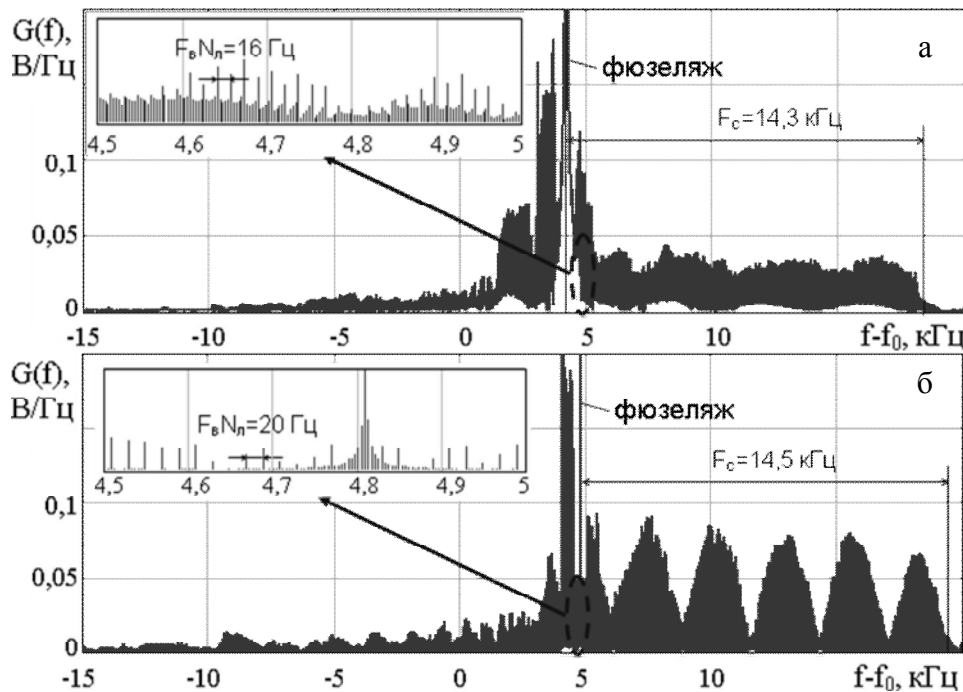


Рис. 4. Спектри гвинтової модуляції вертольотів Мі-8Т (а) та Мі-24П (б), що рухаються на постійній висоті

Висновки

У роботі проаналізовано сучасні досягнення в області теоретичних і експериментальних досліджень вторинної модуляції радіолокаційних сигналів, відбитих повітряними об'єктами із турбогвинтовими і реактивними двигунами. Розроблено метод чисельного моделювання характеристик розсіювання та спектрів вторинної модуляції сигналів, відбитих динамічними повітряними об'єктами із турбо-

винтовими двигунами. Метод враховує взаємодію електромагнітних хвиль, відбитих фюзеляжем складної форми і лопастями турбогвинтових двигунів, базується на оцінці вкладу гладких і кромкових ділянок поверхні об'єкту у сумарне розсіяне поле та може бути модифікованим для моделювання спектрів вторинної модуляції більшості повітряних об'єктів із турбогвинтовими і реактивними двигунами стосовно до сантиметрового, дециметрового і навіть метрового діапазонів довжин хвиль.

Надалі за допомогою розробленої моделі планується оцінити вплив вібрацій, нерівномірної швидкості обертання гвинтів, ефекту "скручування" лопастей на параметри спектрів гвинтової модуляції різних повітряних об'єктів та можливість використання зазначених спектрів для отримання додаткової радіолокаційної інформації про розглянуті повітряні об'єкти.

Список літератури

1. Справочник по радиолокации / Под ред. М. Скольника. – Нью-Йорк, 1970. Пер. с англ. (в четырех томах) под. общ. ред. К. Н. Трофимова. Том 1. Основы радиолокации / Под ред. Я. С. Ицхоки. – М.: Сов. радио, 1976. – 456 с.
2. Слюсарь Н.М. Вторичная модуляция радиолокационных сигналов динамическими объектами / Н.М. Слюсарь. – Смоленск: ВА ВПВО ВС РФ, 2006. – 173 с.
3. Слюсарь Н.М. Эффект вторичной модуляции радиолокационных сигналов. Мифы и реальность / Н.М. Слюсарь // Сборник научных трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2011). Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии". – Х.: ХНУРЕ, 2011. – Т. 1, ч. 1. – С. 47-50.
4. Радиоэлектронные системы: Основы построения и теория. Справочник. Изд. 2-е, перераб. и доп./ Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Радиотехника, 2007. – 512 с.
5. Довідник з протиповітряної оборони / А.Я. Горопчин, І.О. Романенко, Ю.Г. Даник, Р.Е. Пащенко та ін. – К.: МО України, Х.: ХВУ, 2003. – 368 с.
6. Леценко С.П. К вопросу получения спектра вторичной модуляции и радиолокационного поперечного портрета быстровращающейся многолопастной структуры / С.П. Леценко // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ. – Вип. 14, 1997. – С. 75 - 84.
7. Кравцов С.В. Моделирование рассеяния электромагнитного поля на пропеллере аэродинамической цели / С.В. Кравцов, С.П. Леценко // Электромагнитные волны и электронные системы. – 1999. – №4. – С. 39-44.
8. Леценко С.П. Исследование влияния вторичной модуляции на форму получаемых радиолокационных дальностных портретов при использовании когерентных многочастотных сигналов / С.П. Леценко, А.Г. Варакута // Збірник наукових праць ХВУ. – Х.: ХВУ, 1999. – Вип. 3(25). – С. 60- 64.
9. Рассеяние электромагнитных волн воздушными и наземными радиолокационными объектами: монография / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, С.В. Кукобко и др.; под ред. О.И. Сухаревского. – Х.: ХУПС, 2009. – 468 с.
10. Уголок неба. Авиационная энциклопедия. Ми-8МТ [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.airwar.ru/enc/uh/mi8mt.html>.
11. Уголок неба. Авиационная энциклопедия. Ми-24П [Электронный ресурс]. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.airwar.ru/enc/ah/mi24p.html>.
12. Сухаревский О.И. Моделирование спектров винтовой модуляции вертолетов / О.И. Сухаревский, В.А. Василец, Г.С. Залевский, М.М. Бречка // Сборник научных трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума "Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития" (МРФ-2011). Конференция "Интегрированные информационные радиоэлектронные системы и технологии". – Х.: ХНУРЕ, 2011. – Т. 1, ч. 1. – С. 125-128.

Надійшла до редколегії 9.03.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.П. Леценко, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

МЕТОД ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ ВИНТОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ВЕРТОЛЕТОВ

М. М. Бречка, Г. С. Залевский, В. А. Василец, О. И. Сухаревский

Анализируется современное состояние исследований вторичной модуляции радиолокационных сигналов, отраженных воздушными объектами. Рассматривается метод численного моделирования характеристик рассеяния воздушных объектов с турбовинтовыми двигателями, а также спектров флюктуаций сигналов, отраженных указанными объектами. При моделировании используется разработанный авторами ранее высокочастотный асимптотический метод, основанный на оценивании вклада гладких и кромочных участков поверхности объекта в полное рассеянное поле. Демонстрируются результаты расчетов эффективной поверхности рассеяния и спектров винтовой модуляции вертолетов. Обсуждаются потенциальные возможности использования спектров винтовой модуляции вертолетов для получения дополнительной радиолокационной информации о таких целях для их распознавания.

Ключевые слова: математическое моделирование вторичного излучения радиолокационных воздушных целей, распознавание воздушных целей, спектр винтовой модуляции, эффективная поверхность рассеивания.

METHOD OF NUMERICAL MODELING OF PROPELLER MODULATION SPECTRA OF HELICOPTERS

M. M. Brechka, G. S. Zalevsky, V. A. Vasilets, O. I. Sukharevsky

Current state of investigations of secondary modulation of radar signal reflected by air objects is analyzed. Method of numerical modeling of scattering characteristics of air target with turbo-prop engines and also fluctuation spectra of signals scattered by stated objects is considered. Earlier developed by authors high-frequency asymptotic method based on estimation of contributions of the smooth and edged segments of object surface to complete scattered field is used for modeling. Results of calculations of helicopter radar cross section and propeller modulation spectra are demonstrated. Potentialities of using of a helicopter propeller modulation spectrum for obtaining additional radar information about such targets for their recognition are discussed.

Keywords: air target recognition, mathematical modeling of radar air target secondary emission characteristics, radar cross section, spectrum of propeller modulation.