

Г. Д. Братченко, д.т.н., Г. Г. Смаглюк

Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса

МОДЕЛЮВАННЯ ВПЛИВУ ДЕСТАБІЛІЗУЮЧИХ ФАКТОРІВ НА ФОРМУ ДАЛЬНІСНИХ ПОРТРЕТІВ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ З АНТЕННИМИ РЕШІТКАМИ

Запропонована імітаційна математична модель для дослідження впливу дестабілізуючих факторів на рівень спотворень радіолокаційних дальнісних портретів (РЛДП) та якість розпізнавання повітряних цілей в радіолокаційних системах з адаптивними антенними решітками (АР). Представлені результати моделювання, які ілюструють ступінь впливу фазових гармонічних спотворень при генеруванні зондувального широкосмугового лінійно-частотно-модульованого сигналу та широкосмуговості АР на форму РЛДП.

Ключові слова: імітаційна модель, широкосмуговий сигнал, адаптивна антенна решітка, радіолокаційний дальнісний портрет, дестабілізуючі фактори, спотворення сигналу, вимірювання спотворень.

Вступ.

Радіолокаційне розпізнавання передбачає вимірювання різних радіолокаційних характеристик об'єктів (цілей), вибір інформативних і стійких ознак, навчання пристрою розпізнавання та в подальшому прийняття рішень про належність об'єктів, які спостерігаються, до того чи іншого класу (типу).

За активної радіолокації можуть застосовуватись різні сукупності траєкторних, поведінкових та сигнальних ознак розпізнавання об'єктів. Сигнальні ознаки є найбільш інформативними. Серед них: ефективна площа розсіювання (ЕПР), поляризаційні, спектральні та часові характеристики відбитих від цілі сигналів. Вони містять інформацію про розміри, параметри руху цілі, її форму, модуляції, викликані обертанням крильчаток турбін або гвинтів, а також коливаннями різних частин літальних апаратів.

Аналітичне обґрунтування вибору сукупності ознак та дослідження їх інформативності є доволі складним завданням, тому для попередньої оцінки якості розпізнавання за тією, чи іншою сукупністю ознак, застосовують методи математичного моделювання [1, 2], які потребують розробки адекватних моделей для конкретних засобів радіолокаційного спостереження.

Радіолокаційний дальнісний портрет (РЛДП), який є обвідною відбитого сигналу на виході узгодженого з випромінюваним сигналом фільтра, є однією з найбільш поширених ознак розпізнавання, що пов'язана з формою об'єкта (цілі). Для отримання РЛДП потрібна достатньо висока роздільна здатність за дальністю, яка забезпечується застосуванням широкосмугових сигналів (ШСС) [3, 4]. Серед них поширеними є лінійно-частотно-модульовані (ЛЧМ) радіоім-

пульси, що пов'язано з відносною простотою їх генерування та обробки, а також можливістю досягнення більш низького в порівнянні з іншими складними сигналами рівня бічних пелюсток стиснутого сигналу на виході приймача [5].

Сполучення високого розділення за дальністю з високим розділенням у напрямку поперечному до лінії візування, яке може бути забезпечене методом інверсного синтезування апертури, дозволяє отримувати двовимірні радіозображення [1, 6]. Потрібний час супроводження повітряної цілі при цьому визначається необхідною роздільною здатністю і може складати одиниці-десятки секунд. В радіолокаційних станціях (РЛС) огляду такий режим спостереження може бути реалізований за умови застосування електронного сканування променем з використанням фазованих антенних решіток (ФАР). Необхідність підвищення терміну спостереження цілі також виникає за умов впливу сукупності дестабілізуючих факторів, які викликають зростання похибок вимірювання ознак, для забезпечення потрібної ймовірності вірного розпізнавання об'єктів послідовними методами [7, 8].

В числі факторів, що можуть викликати спотворення форми отриманого РЛДП при зондуванні ШСС достатньо великої тривалості [9-11]:

- нелінійні спотворення сигналу в передавальному та приймальному трактах;
- неідентичність частотних характеристик приймально-передавальних трактів ФАР;
- вплив зовнішніх завад;
- затримка сигналу по апертурі антени на передачу та прийом;
- рух цілі з високою радіальною швидкістю;

- наявність на цілі елементів, що обертаються;
- зміни просторової орієнтації цілі.

Тобто, при дослідженні якості розпізнавання повітряних цілей з використанням ШСС, особливо із застосуванням двовимірних радіозображень, потрібно враховувати особливості руху цілі та дестабілізуючі фактори, які спотворюють сигнал в процесі його формування і обробки, а у випадку ФАР – її ширококумовість.

Антенна решітка вважається ширококумовою, якщо добуток ширини спектра сигналу на різницю часових затримок до крайніх точок антенної системи $P \cdot \Delta t_3 \geq 1$ [12]. Якщо у випадку вузькокумового сигналу достатньо вводу комплексного вагового коефіцієнту в кожний канал ФАР, то для ширококумових сигналів необхідно проводити операцію частотно-залежного зважування. Це може бути реалізовано з використанням в кожному каналі ФАР трансверсальних фільтрів [13], однак при цифровій обробці може бути простішим перехід у частотну область з використанням алгоритмів швидкого перетворення Фур'є [12, 14].

Для дослідження впливу дестабілізуючих факторів на якість розпізнавання об'єктів в РЛС з ФАР при застосуванні ШСС можуть бути застосовані методи математичного моделювання розглянуті в [1, 2]. Наприклад, програма Radar Target Backscattering Simulation (RTBS) [15] дозволяє імітувати відбиті сигнали від повітряних цілей декількох типів з урахуванням прямолінійного руху в умовах впливу турбулентностей атмосфери при опроміненні цілей різними видами ШСС. Однак в ній розраховуються ідеальні РЛДП цілей без врахування впливу дестабілізуючих факторів в процесі випромінювання та обробки сигналу для одноканальної РЛС.

Для оцінки впливу дестабілізуючих факторів в РЛС з ФАР може бути використаний узагальнений ентропійний показник [16], який характеризує втрати інформації, або ж часткові показники, що вказують ступінь спотворення ШСС на виході системи обробки сигналу, наприклад, коефіцієнт взаємної кореляції спотвореного та опорного (зразкового) сигналів або пов'язаний з ним коефіцієнт (у відсотках) [17]

$$K_p = 100 \cdot \sqrt{2(1 - \rho_{\max})}, \quad (1)$$

де ρ_{\max} – максимальне значення коефіцієнта взаємної кореляції обвідних цих сигналів.

Метою статті є розробка математичної моделі для дослідження впливу спотворень сигналу на якість розпізнавання в РЛС з антенною решіт-

кою та ширококумовим зондувальним сигналом і попередня оцінка ступеня спотворень РЛДП.

Виклад основного матеріалу.

В роботі пропонується математична модель для дослідження впливу спотворень ШСС на якість розпізнавання повітряних цілей згідно представленій на рис. 1 структурної схеми. Модель призначена для імітації обробки відбитих від повітряних цілей ШСС в РЛС з адаптивною антенною решіткою (ААР) з урахуванням її ширококумовості. Для цього передбачається включення в кожний з N приймальних каналів ААР трансверсальних фільтрів з M комплексними регульованими коефіцієнтами, $M = N \cdot (n_{\text{лз}} + 1)$, де $n_{\text{лз}}$ – кількість ліній затримки, виходи яких об'єднуються в суматорі для обробки сигналу у часовій області [13]. Сумарний портрет після узгодженої фільтрації і детектування поступає в блок оцінки якості РЛДП та розпізнавання, в якому проводиться оцінка ступеня спотворень РЛДП та в подальшому передбачається реалізація процедури розпізнавання цілей.

На основі вихідних даних з програми RTBS – проекцій положення «блискучих точок» на лінію візування та їх амплітуд (кореня квадратного з ЕПР) з урахуванням параметрів зондувального сигналу в блоці формування відбитого НВЧ сигналу обчислюються комплексні відліки сигналу відлуння $\dot{S}mod_i$ згідно співвідношення

$$\dot{S}mod_i = \sum_{k=0}^{kt-1} A_k \cdot \dot{s}(t_k - tz_k), \quad (2)$$

де kt – кількість «блискучих точок», A_k – амплітуда та tz_k – час затримки сигналу від n -ї «блискучої точки», $\dot{s}(\bullet)$ – комплексна обвідна зондувального ШСС з урахуванням спотворень сигналу в передавальному пристрої, від яких задається в блоці імітації шумів і спотворень сигналу, t_i – момент часу, що відповідає в i -му відліку сигналу.

Блок імітації шумів і спотворень сигналу, окрім формування видів спотворень сигналів при їх випромінюванні, призначений для відтворення адитивних власних шумів та зовнішніх завад в приймальних каналах ААР та видів спотворень сигналів при обробці в приймальному тракті. Тоді сигнал в n -му приймальному каналі ААР

$$\dot{S}mod_{in} = \sum_{k=0}^{kt-1} A_k \cdot \dot{s}_n(t_i - tz_k - t_{3n}) + \dot{N}_{in}, \quad (3)$$

де $\dot{s}_n(\bullet)$ – комплексна обвідна ШСС з можливим її додатковим спотворенням та \dot{N}_{in} – ком-

плексні відліки власних шумів та зовнішніх завад в n -му приймальному каналі антенної решітки, t_{zn} – час затримки сигналу до n -го приймального елемента ААР.

У запропонованій моделі можливо вносити спотворення як у зондувальний, так і у відбитий сигнал, і оцінювати рівень спотворень РЛДП та

їх вплив на якість розпізнавання цілей з їх використанням. Подальшим завданням дослідження може бути порівняння якості розпізнавання для ідеальної форми сигналу та за умов її спотворення. Крім цього, може досліджуватись вплив адаптації антенної решітки в умовах зовнішніх завад на якість розпізнавання.

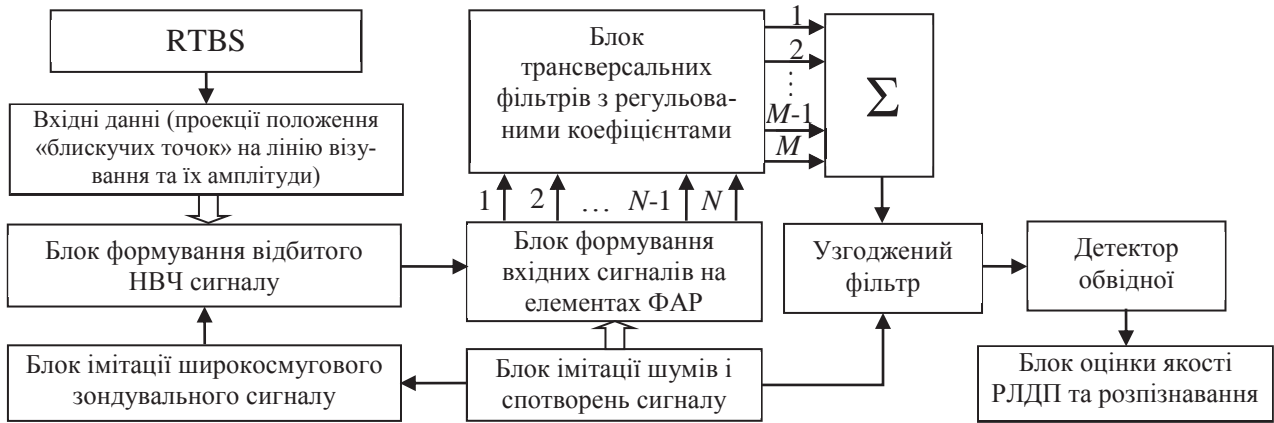


Рисунок 1 – Структурна схема математичної моделі для дослідження впливу дестабілізуючих факторів на якість розпізнавання об’єктів в РЛС з адаптивною антенною решіткою

Попередня перевірка функціонування моделі проведена без імітування адаптації антенної решітки. Оцінювалась ступінь спотворень РЛДП за рахунок введення паразитної фазової модуляції при генеруванні зондувальних сигналів, а також вплив затримки ШСС на апертурі решітки.

Умови моделювання. Моделювався радіолокатор, з носійною частотою $f_0=2,9$ ГГц (довжиною хвилі $\lambda=13$ см), зондувальним ЛЧМ сигналом з прямокутною обвідною та параметрами: тривалість імпульсу 13,65 мкс, девіація частоти 150 МГц і параметрами лінійної антенної решітки: кількість елементів решітки $N=50$, відстань між елементами решітки $\lambda/2$. Коефіцієнт широкосмуговості антенної решітки складає $L\Delta t_3=1,84$. Параметри просторового положення цілі відносно РЛС було обрано такими: дальність спостереження – 50 км, висота польоту цілі – 8 км, ракурс спостереження цілі – 10° . Швидкість польоту цілі – 800 км/год.

Для дослідження спотворень РЛДП в одноканальній РЛС імітувався зондувальний ЛЧМ радіоімпульс при паразитній гармонічній фазовій модуляції $\varphi(t) = M_\varphi \sin(2\pi f_M t)$, $f_M = 105$ кГц з індексом фазової модуляції $M_\varphi = 0, 0,1, \dots, 1$. В цьому випадку довжина хвилі РЛС $\lambda=3$ см. Відношення сигнал-шум на один портрет задавалось рівним 20 Дб, як і в подальшому моделюванні.

Приклади спотворених та неспотворених РЛДП при $M_\varphi = 0,9$ представлені на рис. 2, 3.

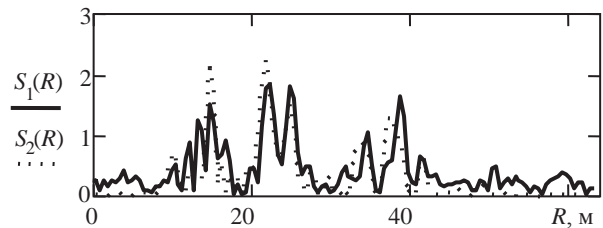


Рисунок 2 – Спотворений $S_1(R)$ та ідеальний $S_2(R)$ радіолокаційні дальнісні портрети літака В-1В

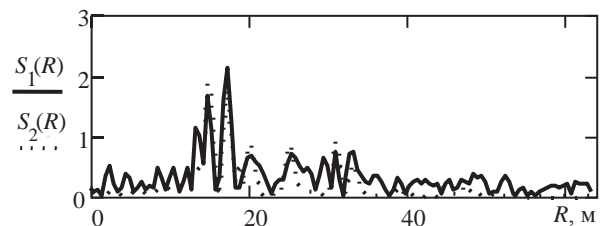


Рисунок 3 – Спотворений $S_1(R)$ та ідеальний $S_2(R)$ радіолокаційні дальнісні портрети літака Ту-16

Ступінь впливу спотворень ЛЧМ сигналу при його випромінюванні ілюструється залежностями максимуму коефіцієнта кореляції обвідних спотвореного та неспотвореного РЛДП при різних індексах фазової гармонічної модуляції при формуванні ЛЧМ радіоімпульсу (рис. 4) та відповідних йому коефіцієнта K_p (рис. 5). Отримані залежності аналогічні графікам K_{p1} для одиночного спотвореного імпульсу [17, 18]. Однак, рівні

спотворень РЛДП відмінні для різних типів цілей.

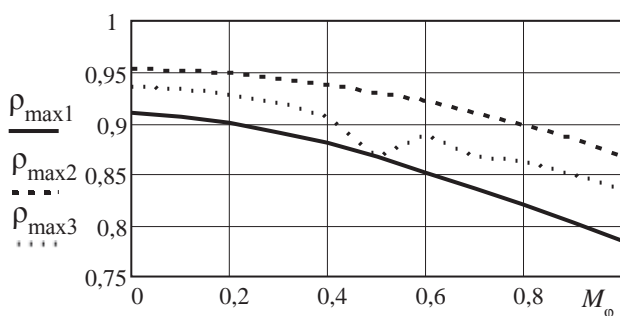


Рисунок 4 – Залежність максимуму кореляції спотвореного та ідеального РЛДП літаків Ту-16 ($\rho_{\max1}$), В-1В ($\rho_{\max2}$) та МіГ-29 ($\rho_{\max3}$)

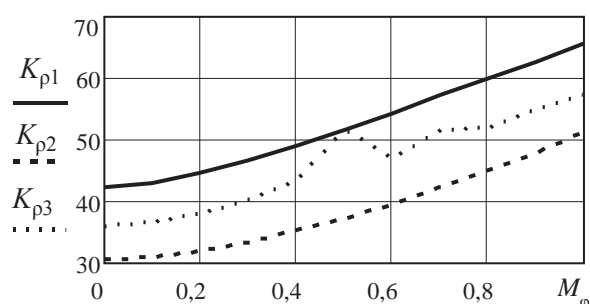


Рисунок 5 – Графік залежності коефіцієнта K_ρ спотвореного та ідеального РЛДП літаків Ту-16 ($K_{\rho1}$), В-1В ($K_{\rho2}$), та МіГ-29 ($K_{\rho3}$)

З рисунків видно, що при збільшенні рівня паразитної модуляції кореляція портретів одного типу зменшується. Разом цим в деяких випадках зростає взаємна кореляція спотворених РЛДП з очікуваними портретами цілей інших типів, що ілюструють результати розрахунків кореляції для чотирьох випадків: спотвореного РЛДП літака МіГ-29 з неспотвореним РЛДП літака Ту-16 $\rho_{\max1}$; спотвореного РЛДП літака МіГ-29 з неспотвореним РЛДП літака В-1В $\rho_{\max2}$; спотвореного РЛДП літака Ту-16 з неспотвореним РЛДП літака МіГ-29 $\rho_{\max3}$ та взаємна кореляція спотвореного РЛДП літака Ту-16 з неспотвореним РЛДП літака В-1В $\rho_{\max4}$ (рис. 6).

У випадку моделювання опромінення цілі локатором з антенною решіткою сигнали на елементи решітки поступають з затримками. При цьому, якщо не враховувати ширококумовість антени і компенсувати лише фазові набіги, сумарний портрет буде спотворений тим більше, чим більше кут повороту Θ променя відносно нормалі до решітки (рис. 7, 8). Портрет $S_2(R)$ за затримкою відповідає РЛДП з виходу середнього

елементу решітки ($i=26$).

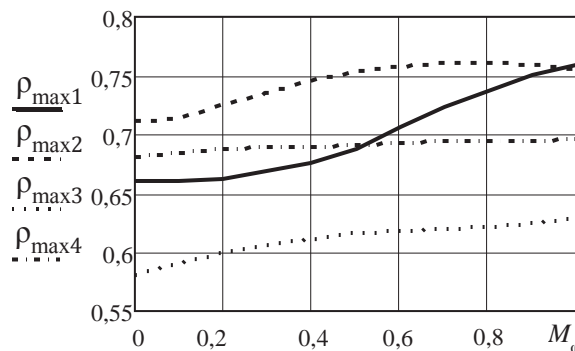


Рисунок 6 – Взаємна кореляція РЛДП літаків Ту-16, В-1В та МіГ-29

Часова затримка сигналу на елементах решітки пов'язана з кутом повороту наступним чином:

$$\Delta t_{3n} = \frac{n \cdot \sin \Theta}{f_0}, \quad (4)$$

де n – номер елемента решітки, $n=1, \overline{N}$, f_0 – носійна частота.

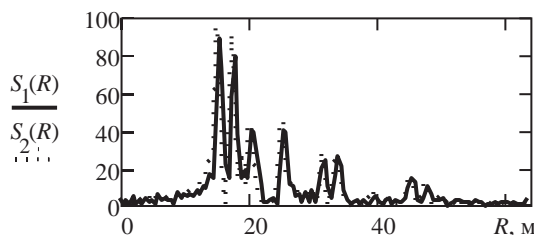


Рисунок 7 – Спотворений $S_1(R)$ та неспотворений $S_2(R)$ радіолокаційні дальнісні портрети літака Ту-16 при куті спостереження 5°

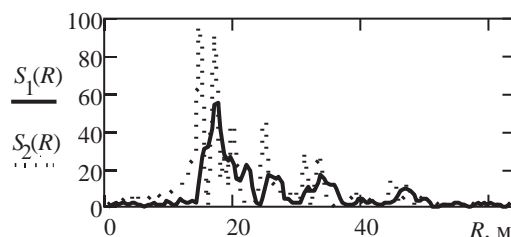


Рисунок 8 – Спотворений $S_1(R)$ та неспотворений $S_2(R)$ радіолокаційні дальнісні портрети літака Ту-16 при куті спостереження 65°

Графіки залежностей взаємної кореляції РЛДП на виході суматора з неспотвореним портретом (рис. 10) та відповідні їм – для коефіцієнта K_ρ (рис. 11) показують ступінь спотворення РЛДП при різних значеннях індексу фазової модуляції (при різному рівні спотворень сигналу).

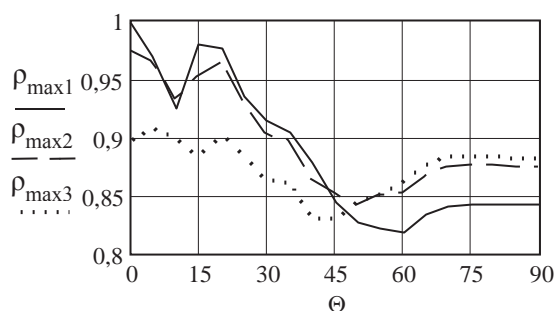


Рисунок 10 – Графіки залежностей кореляції портретів від кута спостереження для літака Ту-16 при індексах фазової модуляції $M_\varphi=0$ ($\rho_{\max 1}$), $M_\varphi=0,4$ ($\rho_{\max 2}$), та $M_\varphi=0,9$ ($\rho_{\max 3}$)

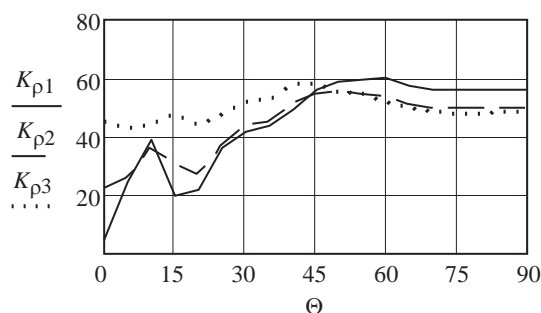


Рисунок 11 – Графік залежності коефіцієнта K_ρ від кута спостереження для літака Ту-16 при індексах фазової модуляції $M_\varphi=0$ ($K_{\rho 1}$), $M_\varphi=0,4$ ($K_{\rho 2}$), та $M_\varphi=0,9$ ($K_{\rho 3}$)

Таким чином, при використанні ширококутового зондувального сигналу нехтування відмінністю часової затримки сигналів в каналах АР веде до зниження кореляції РЛДП з очікуваними (еталонними) портретами. В той же час, як і при гармонічному фазовому спотворенні зондувального ШСС, в окремих випадках спостерігається певне зростання кореляції РЛДП на виході АР з еталонними портретами цілей інших типів (наприклад, взаємна кореляція РЛДП літака ТУ-16 з РЛДП літака В1-В зросла на 0,06 до 0,74, і навпаки кореляція РЛДП літака В1-В з еталонним РЛДП літака ТУ-16 – на 0,05 до 0,72).

Висновки.

Розроблена математична модель, яка дозволяє імітувати процес обробки ширококугових сигналів в РЛС з ААР з метою оцінювання ступеня спотворень РЛДП і якості розпізнавання цілей.

Представлені результати з оцінки впливу гармонічних фазових спотворень зондувального ЛЧМ радіоімпульсу та спотворень РЛДП викликаних нехтуванням ширококуговістю антенної решітки. Вони вказують очікувані рівні спотворень РЛДП за показниками максимуму взаємної

кореляції та коефіцієнта K_ρ , що може бути використано при визначенні вимог щодо якості розпізнавання в РЛС з антенною решіткою та ШСС.

Зростання рівня спотворень сигналу в окремих випадках підвищує взаємну кореляцію РЛДП цілей різних типів. Це може призвести до збільшення умовних ймовірностей їх хибного розпізнавання та потребує подальшого дослідження.

Список використаних джерел

- Ширман Я. Д. Методы радиолокационного распознавания и их моделирование / Я. Д. Ширман, С. А. Горшков, С. П. Лещенко, Г. Д. Братченко, В. М. Орленко // Зарубежная радиоэлектроника: успехи современной радиоэлектроники. – 1996. – № 11. – С. 3-63.
- Computer Simulation of Aerial Target Radar Scattering, Recognition, Detection and Tracking / Y. D. Shirman, S. A. Gorshkov, S. P. Leshchenko, V. M. Orlenko, S. Y. Sedyshev, O. I. Sukharevskiy / Y.D. Shirman editor. – Boston – London: Artech house, 2002. – 294 с.
- Ширман Я. Д. Разрешение и сжатие сигналов / Я. Д. Ширман. – М.: Сов. радио, 1974. – 360 с.
- Кук Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд. – М.: Сов. радио, 1971. – 568 с.
- Гомозов В. И. Теория и техника формирования сложных СВЧ сигналов с высокой скоростью угловой модуляции для радиотехнических систем [Текст] : монография / В. И. Гомозов. – Х. : Издатель Шуст А. И., 2002. – 398 с.
- Стайнберг Б. Д. Формирование радиолокационного изображения самолета в диапазоне СВЧ / Б. Д. Стайнберг // ТИИЭР. – 1988. – т. 76, № 12. – С. 26-46.
- Фу К. Последовательные в методы распознавания образов и обучении машин / К. Фу: Пер. с англ. – М.: Наука, 1971. – 255 с.
- Грешилов А. А. Статистические методы принятия решений с элементами конфлюэнтного анализа / А. А. Грешилов, В. А. Стакун, А. А. Стакун. – М.: Радио и связь, 1998. – 112 с.
- Горшков С.А. Адаптивная компенсация искажений широкополосных дискретных частотно-манипулированных сигналов в РЛС с активной антенной решеткой // Сборник научных трудов 4-го Международного радиоэлектронного форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», 18-21 октября 2011 г. – Харьков, 2011. – Т. I. – С. 265 – 268.
- Батурич Н. Г. Измерение параметров линейно-частотно-модулированных сигналов и их

нестабильностей / Н. Г. Батурич, В. И. Гомозов, А. В. Зюзин. – М.: Вузовская книга, 2011. – 176 с.

14. Ширман Я. Д. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех / Я. Д. Ширман, В. Н. Манжос. – М.: Радио и связь, 1981. – 416 с

15. Братченко Г. Д. Классификация дестабилизирующих воздействий в процессе радиолокационного распознавания / Г. Д. Братченко, В. В. Скачков // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х.: Харківський університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 2010. – Вип. 4(26). – С. 64-67

16. Монзинго Р. А. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию / Р. А. Монзинго, Т. У. Миллер: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с.

17. Адаптивные фильтры: Пер. с англ. / Под ред. К. Ф. Н. Коузана и П. М. Гранта. – М.: Мир, 1988. – 392 с.

18. Radar Target Backscattering Simulation Software and User's Manual / S. A. Gorshkov, S. P. Leshchenko, V. M. Orlenko, S. Yu Sedyshev, Y. D. Shirman – Boston-London: Artech House, 2002. – 71 p.

19. Скачков В. В. Энтروпийный подход к исследованию информационных возможностей адаптивной радиотехнической системы при внутрисистемной неопределенности / В. В. Скачков, В. В. Чепкий, Г. Д. Братченко, А.Н. Ефимчиков // Радиоэлектроника. – 2015. – Т. 58, № 6. – (Изв. вузов). – С. 3-12.

20. Братченко Г. Д. Числове моделювання вимірювання спотворень ширококутових складних сигналів / Г. Д. Братченко, І. С. Сеніва, В. Б. Лубманенко, Г. А. Губернатор // Збірник наукових праць ОДАТРЯ. – Одеса, 2014. – № 1(4). – С. 24 – 28.

21. Братченко Г. Д. Моделювання вимірювання спотворень ширококутових сигналів з метою їх метрологічного забезпечення / Г. Д. Братченко, С. В. Бугаєв, І. С. Сеніва, Д. В. Григор'єв // Збірник наукових праць Одеської державної академії технічного регулювання та якості. – Одеса, 2014. – Вип. 2(5). – С. 68-73.

Надійшла до редакції 20.05.2015

Рецензент: д.т.н., професор Скачков В. В., Одеська державна академія технічного регулювання та якості, м. Одеса.

Г. Д. Братченко, д.т.н., Г. Г. Смаглюк

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ДЕСТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ФАКТОРОВ НА ФОРМУ ДАЛЬНОСТНЫХ ПОРТРЕТОВ В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ С АНТЕННЫМИ РЕШЕТКАМИ

Предложена имитационная математическая модель для исследования влияния дестабилизирующих факторов на уровень искажений радиолокационных дальностных портретов (РЛДП) и качества распознавания воздушных целей в радиолокационных системах с адаптивными антенными решетками (АР). Представлены результаты моделирования, иллюстрирующие степень влияния фазовых гармонических искажений при генерировании зондирующего широкополосного линейно-частотно-модулированного сигнала и широкополосности АР на форму РЛДП.

Ключевые слова: имитационная модель, широкополосный сигнал, адаптивная антенная решетка, радиолокационный дальностный портрет, дестабилизирующие факторы, искажения сигнала, измерение искажений.

H. D. Bratchenko, DSc, G. G. Smagluk

MODELING DESTABILIZING INFLUENCES ON THE SHAPE OF RANGE PROFILES IN RADAR WITH ANTENNA ARRAY

The simulation model to study the effect of destabilizing factors in the distortion of radar range profiles (RRP) and recognition quality of air targets in radar systems with adaptive antenna array (AA) is offered. The simulation results for illustrate the degree of influence of phase harmonic distortion when generating probing wideband chirp signal and broadbandness of AA on the RRP shape are presented.

Keywords: simulation model, wideband signal, adaptive antenna array, radar range profile, destabilizing factors, signal distortion, distortion measurement.