

## Література

1. Вопросы перспективной радиолокации : [монографія] / Под редакцией А.В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003 – 512 с.
2. Передающие устройства СВЧ : учебное пособие для радиотехнических спец. вузов / Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А. ; под ред. М.В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.
3. Карпова Л.В. Метод підвищення ступеня розрізнення ехо-сигналів при вирішенні задач активної та напівактивної радіолокації на основі кореляційного оцінювання квадратурної флукуаційної складової / Карпова Л.В. // Вісник Хмельницького національного університету. Хмельницький. Технічні науки. – Хмельницький, 2010. – № 4. – С. 72–76.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.  
Надійшла 7.2.2012 р.

УДК 621.396.96

В.Б. РУДНИЦЬКИЙ, І.І. ЧЕСАНОВСЬКИЙ, О.С. ІВАНЮК  
Хмельницький національний університет

### ОЦІНКА СТУПЕНЯ РОЗРІЗНЕННЯ ІМПУЛЬСНИХ РАДІОСИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ В ЇХ КОМПЛЕКСНІЙ ОБВІДНІЙ

*В статті досліджуються питання трансформування кореляційних властивостей радіолокаційних сигналів при урахуванні флукуаційних амплітудних та кутових складових. Отримані аналітичні вирази щільностей розподілу випадкових складових в комплексній обвідній радіолокаційних сигналів для різних варіантів реалізації імпульсних модуляторів та різних типів генераторів НВЧ.*

*The article investigates the question of transforming the correlation properties of radar signals with allowance for fluctuation amplitude and angular components. Analytical expressions of the distribution of random components in the complex bypass signals for different variants of pulse modulators and generators for various types of microwave.*

Ключові слова: зонduючий радіосигнал

При реалізації методів активної радіолокації, джерелом інформації про наявність і характеристики цілей в зоні спостереження є радіолокаційні сигнали, в результаті чого, саме їх потенційні можливості (енергетичні та кореляційні) визначають ефективність радіолокаційних засобів, на їх основі, в цілому. З цієї причини, основні зусилля інженерів при розробці радіолокаційних засобів були спрямовані на пошук зонduючих сигналів з оптимальними характеристиками [2, 3]. В першу чергу, намагались оптимізувати кореляційні властивості сигналів, оскільки пропорційною їм є ефективність узгоджених (оптимальних) методів їх обробки. При ускладненні зонduючих сигналів, значно підвищувались вимоги до передавачів, оскільки неточність в відтворенні складних сигналів, значно сильніше знижує ефективність алгоритмів обробки ніж при використанні простих зонduючих імпульсів. Проте, незважаючи на те, що в сучасній радіолокації існує жорстке правило, відповідно якого ступінь розрізнення ехо-сигналу не може перевищувати ступінь розрізнення зонduю чого [1, 3], в ряді робіт показано, що існування різних дестабілізуючих факторів при формуванні зонduючих сигналів призводить до появи в них певних позитивних властивостей. Не зважаючи на те, що в межах періоду зондування, за своєю природою вони є недетермінованими, кореляція ехо-сигналів значно відрізняється від кореляції зонduючих, а це відкриває потенційні можливості підвищення ряду характеристик радіолокаційних засобів активного та напівактивного типу.

В даній статті на основі теоретичного аналізу процесів, що протікають в імпульсних генераторах НВЧ та експериментального дослідження імпульсних передавачів НВЧ діапазону на їх основі, отримана удосконалена математична модель імпульсного зонduючого радіосигналу з урахуванням статистичних моделей амплітудних та кутових флукуацій в його комплексній обвідній.

В основу змісту даної моделі покладено загально прийнятий вираз, що описує імпульсний зонduючий радіосигнал:

$$u(t) = U_0 \exp j(\omega_0 t), \quad (1)$$

де  $U_0(t) \exp j(\varphi(t) + \varphi_0)$ , – комплексна обвідна;

$U_0(t)$  – форма модулюючого по амплітуді сигналу;  $\varphi(t)$  – форма кутової модулюючої складової.

При реалізації радіолокації сигналами з малою базою ( $B \approx 1$ ), як правило використовуються імпульсні зонduючі радіолокаційні сигнали з прямокутною обвідною і без внутрішньої кутової модуляції. Форма комплексної обвідної, а відповідно і кореляційні властивості такої моделі сигналу, визначаються виключно формою модулюючого по амплітуді імпульсу [1]. Зрозуміло, що саме така форма комплексної обвідної є основою для синтезу узгодженого алгоритму обробки в приймачі і як відомо, потенційне

розрізнення сигналів з такою кореляційною функцією комплексної обвідної можливе лише у тому випадку коли вони не перекриваються у часі або коли частково перекриваються, що відомо як потенційне Релеєвське розрізнення (рівень 0,7 основної пелюстки кореляційної функції комплексної обвідної).

Проте в дійсності, в наслідок дії ряду дестабілізуючих факторів у передавачі, при формуванні сигналів, комплексна обвідна зонduючого сигналу містить ряд флукутаційних амплітудних і кутових складових, властивості та форма яких визначаються конструктивними властивостями передавача і можуть бути апроксимовані певними законами розподілу. При цьому, як відомо із теорії сигналів, різні комбінації законів розподілу з різними параметрами, можуть давати різний потенційний виграш в кореляційній оцінці комплексної обвідної сигналу, навіть в однаково обмеженій смузі частот сигналу в цілому. А отже, враховуючи той факт, що в імпульсних радіолокаційних системах здійснюється резервування смуги частот приймача (завжди існує певна надлишковість ширини смуги пропускання  $\Delta F_{np} > \Delta F_c$ ), а форма зонduючого сигналу при формуванні та випромінюванні набуває певних трансформацій, потенційні кореляційні властивості радіолокаційних сигналів можуть бути значно вищими ніж передбачається. Для перевірки цього припущення, в роботі запропоновано удосконалену математичну модель радіолокаційного зонduючого сигналу, в якій можливі випадкові спотворення і флукутації враховано у вигляді амплітудної і кутової складових, що представляють собою вузько смугові, повільно осцилюючі функції часу з певними законами розподілу:

$$u(t) = U \xi_u \exp j(\omega_0 t) \exp j\phi_\xi, \tag{2}$$

де  $\xi_u = \xi_u(k_1 t)$  – амплітудна флукутаційна складова (випадковий процес з параметром  $k_1$ );  $\phi_\xi = \phi_\phi(k_2 t)$  – кутова флукутаційна складова (випадковий процес з параметром  $k_2$ ).

А отже, узагальнена модель сигналу, може бути записана у вигляді:

$$u(t) = U(t) \xi_u(k_1 t) \exp j(\omega_0 t + \phi(t) + \phi_0) \exp j\phi_\phi(k_2 t). \tag{2}$$

Зрозуміло, що в більшості випадків, питома вага флукутаційних складових не значна і говорити про них як про додаткову внутрішню модуляцію некоректно, в першу чергу через їх не детермінованість. Проте їх наявність, вносить в сигнал певну широкосмуговість, підтвердженням чого є розширення смуги частот приймача для зменшення енергетичних втрат. Для детального аналізу впливу цих складових на форму комплексної обвідної сигналу в цілому, було проведено аналіз можливих їх розподілів в залежності від режиму роботи передавача та типу генератора НВЧ, що застосовується.

На основі експериментальних досліджень, було проаналізовано роботу генераторів, що працюють в імпульсному режимі, а саме магнетрона, стабілотрона, клістрона і лампи біжучої хвилі (ЛБХ). В табл. 1 приведені типові значення залежностей амплітуди, частоти та фази вихідних коливань для цих типів генераторів в залежності від стабільності вхідної.

Таблиця 1

**Нестабільність генераторів НВЧ різних типів**

Тип генератора	Частотна нестабільність	Відношення динамічної складової опору до статичної	Зміна вихідного струму на 1% зміни вхідного, %
Магнетрон	$\frac{\Delta f}{f} = (10^{-3} - 3 \cdot 10^{-3}) \Delta I / I$	0,05–0,1	10–20
Стабілотрон	$\frac{\Delta f}{f} = (2 \cdot 10^{-4} - 5 \cdot 10^{-4}) \Delta I / I$	0,05–0,1	10–20
Клістрон	$\Delta \phi = 10^\circ$ на 1% $\Delta E / E$	0,67	1–2
ЛБВ	$\Delta \phi = 20^\circ$ на 1% $\Delta E / E$	0,67	1–2

Як видно з таблиці, навіть при умові використання однакових за формою модулюючих імпульсів, спотворення які будуть вноситись в комплексну обвідну зонduючих сигналів, в значній мірі визначаються саме генератором НВЧ та режимом його роботи [2]. При цьому, незалежно від типу генератора, спотворення комплексної обвідної відбувається як за амплітудними так і за кутовими складовими, а отже комплексна обвідна зонduючого радіосигналу (2) в загальному випадку прийме вигляд:

$$u(t) = U(t) \xi_u(k_1 t) \exp j\phi_\phi(k_2 t), \tag{2}$$

а у випадку імпульсних зонduючих сигналів:

$$u(t) = \begin{cases} \xi_u(k_1 t) \exp j\phi_\phi(k_2 t), & t \leq |\tau_i| \\ 0, & t > |\tau_i| \end{cases} \tag{3}$$

Встановити аналітично вигляд складових  $\xi_u(k_1 t)$  та  $\phi_\phi(k_2 t)$ , та їх параметрів є достатньо складною задачею, оскільки при їх отриманні необхідно врахувати велику кількість різних чинників, які в

переважній більшості, мають широкий діапазон можливих значень і відповідно різну значимість в різних умовах. Тому їх вигляд було встановлено емпіричним шляхом – експериментально (рис.1), для різних генераторів та підсилювачів НВЧ в однакових умовах роботи з осцилограм детектованих сигналів було визначено форму амплітудної обвідної та динаміку зміни частоти в середині зондуючого радіоімпульсу.

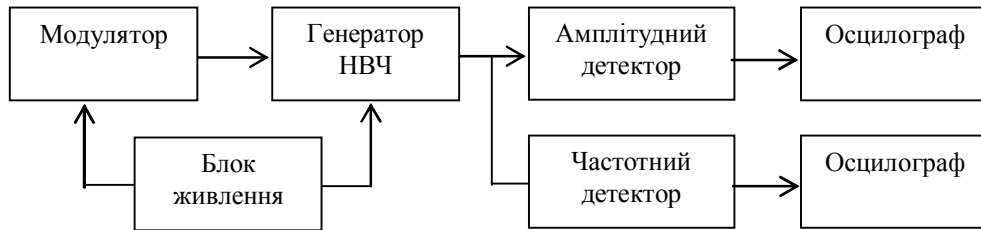


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Застосувавши статистичний апарат (критерій узгодженості Пірсона), результати експериментальних досліджень були апроксимовані до аналітичних виразів, що приведені в табл. 2.

Таблиця 2

**Аналітичні вирази флукуаційних модуляційних складових сигналу**

Тип генератора	$x_u(k_1t)$	$x_j(k_2t)$	$k_1$	$k_2$
Ідеалізований	1	0	-	-
Магнетрон	$k_1 \exp(-pk_1^2t^2)$	$k_2t$	$\frac{1}{\sqrt{2ps}}$	$-bt$
Стабілотрон	$k_1 \exp(-pk_1^2t^2)$	$k_2t$	$\frac{1}{\sqrt{2ps}}$	$-(0.1...0.05)bt$
Підсилювач зі схрещ. полями	1	$k_2t$	-	$\Delta j_{\max} \sin(2pt/t_i)/t$
Клістрон	$\exp(k_1t)$	$k_2t$	$(0.3...0.4)t_i$	$ct^2$
ЛБВ	$k_1 \exp(-pk_1^2(t - 0.3t_i)^2)$	0	$\frac{1}{\sqrt{2ps}}$	-

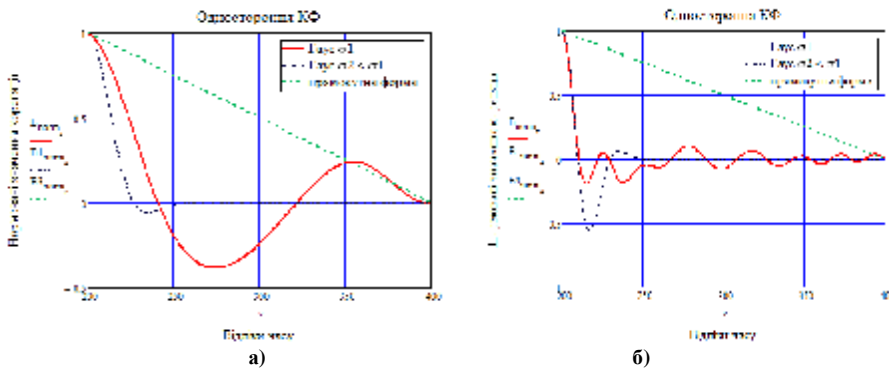


Рис. 2. Односторонні кореляційні функції радіосигналів: а) з гаусівською амплітудною модуляцією і монотонним частотним заповненням; б) з гаусівською амплітудною модуляцією і ЛЧМ

Підстановка виразів із табл. 2 у вираз (2), дає змогу отримати аналітичний вираз для комплексної обвідної зондуючого радіосигналу сформованого будь-яким із перерахованих приладів. Проведене моделювання отриманих таким чином виразів показало, що в дійсності кореляційні властивості сигналів з такими комплексними обвідними залежать не тільки від розмаху флукуацій, але і від їх комбінації.

На рис.2 приведено результати моделювання у вигляді односторонніх кореляційних функцій сигналів при різних розподілах і значеннях параметрів флукуаційних складових на прикладі генератора магнетронного типу – гаусівська амплітудна і лінійна частотна модуляції.

Як видно з цих графіків кореляція сигналу в цілому значно залежить саме від параметрів розподілу. І саме цікаве, що було встановлено – ця залежність не лінійна і не монотонна а має локальні екстремуми. Дійсно, якщо звернути увагу на вираз кореляційної функції комплексної обвідної, наприклад для генератора магнетронного типу:

$$B(\tau) = \exp\left(-\frac{1}{2}\tau^2\left(k_1^2 + \frac{\beta^2}{k_1^2}\right)\right), \quad (4)$$

де  $k_1 = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}}$ , то видно, що існує певне екстремальне

значення  $\sigma$ , при якому рівень кореляції зберігається в достатньо широкому діапазоні значень  $\tau$ , (рис. 3) а це означає, що при застосуванні генераторів такого типу, в залежності від обраного критерію оптимальності (максимальне розрізнення по доплерівському зсуву, або максимальне розрізнення по часовому запізненню) необхідно корегувати значення параметрів амплітудної і частотної нестабільності.

Слід зазначити, що така ситуація притаманна і для більшості інших комбінацій розподілів і їх параметрів. А отже, якщо в передавачі неможливо усунути флуктуації, то їх необхідно скоректувати таким чином, щоб флуктуація відповідала саме оптимальному значенню.

Таким чином, отримана удосконалена математична модель дає змогу підтвердити гіпотезу, що потенційні можливості зонduючого сигналу щодо розрізнення, при урахуванні різних флуктуаційних модулюючих складових, перевищують, а при дотриманні певних умов значно перевищує можливості розрізнення без їх урахування. Проте недетермінізм цих флуктуацій, вимагає застосування додаткових заходів для їх застосування, а отже необхідно розробити відповідний метод обробки ехо-сигналів, що дає змогу реалізувати потенційне розрізнення на етапі прийому.

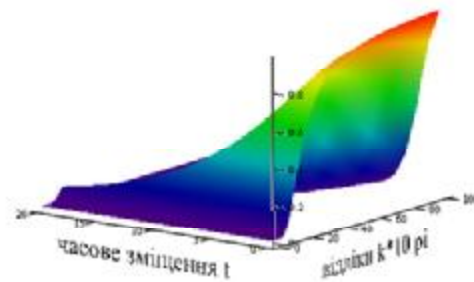


Рис. 3. Залежність коефіцієнта кореляції від часового зміщення та значень коефіцієнта  $k_1$

### Література

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная монография / Под редакцией А.В. Соколова. – М. : Радиотехника, 2003 – 512 с.
2. Передающие устройства СВЧ : [учебно-пособие для радиотехнических спец. Вузов] /Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А. ; под ред. М.В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.
3. Обработка радиолокационных сигналов урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей / О.М. Шинкарук, І.І. Чесановський // Зб. наук. пр. військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка / за ред. С.В. Ленкова. – К. : ВІКНУ, 2009. – Вип. № 17. – С. 89–92.

Рецензент: д.т.н. Троцишин І.В.  
Надійшла 11.2.2012 р.

УДК 621.317

К.В. ЧМЕРУК, О.К. ЯНОВИЦЬКИЙ, С.О. ЯНОВИЦЬКИЙ, В.Р. ЛЮБЧИК  
Хмельницький національний університет

## РОЗРОБКА МЕТОДУ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ПОВІТРЯНИХ СУДЕН В ЗОНІ ДІЇ ВТОРИННИХ РЛС

*В статті проаналізовані методи визначення небезпечних ситуацій між літальними апаратами. Показано, що для налагоджування системи попередження зіткнення, необхідно проводити математичне моделювання. Запропоновано математичну модель для визначення небезпечних ситуацій та їх вирішення.*

*The article analyzed the methods for determining hazardous situations between aircraft. It is shown that for debugging collision warning system, to carry out mathematical modeling. A mathematical model for determination of hazardous situations and solutions.*

Ключові слова: зона підвищеної уваги; зона попередження; зона зіткнення; моделювання руху літаків; повітряні судна.

**Постановка проблеми.** Однією з самих актуальних задач в авіації є забезпечення безпеки руху повітряних засобів літаючих апаратів. Рішення її можливо двома основними способами: проведенням натурних експериментів або проведенням досліджень за допомогою розроблених моделей.

Перший спосіб являється найбільш ефективним, але в той же час дуже громіздкий і потребує значних людських і матеріальних затрат. Тому на практиці натурні випробування проводять тільки з фрагментами систем попередження зіткнень, а основні показники їх ефективності визначають за допомогою методів математичного або імітаційного моделювання. Сама модель складається з двох взаємозв'язаних частин (моделей): моделі повітряної обстановки і моделі роботи бортової апаратури системи попередження зіткнень СПЗ.

Моделювати повітряну ситуацію необхідно не в масштабі держави (континенту), а тільки в аеродромно-вузлових зонах (АВЗ), так як там за даними статистики відбувається переважна більшість небезпечного зближення і зіткнення літаків.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Ця задача вирішувалась в роботах [1, 2]. В них за допомогою "газової" математичної моделі аналітично визначалась залежність частоти небезпечних зближень від