

пристроїв. По-перше, це дозволяє зменшити час, необхідний для досягнення точного моделювання нових компонентів, таких як транзистори. По-друге, складна фізична модель НВЧ транзистора може бути замінена більш простою макромоделлю із, як мінімум, збереженням точності. Отримані в результаті нейромережевого моделювання залежності матриці параметрів  $\bar{S}$  відповідають отриманим експериментально, що свідчить про достовірність побудованої моделі.

### Література

1. Chua L. Linear and Nonlinear Circuit / Chua L., Desoer C., Kuh E. – McGraw-Hill, 1987.
2. Haykin S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. – 2nd Ed. – Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1999.
3. Harvik K. Multilayer feedforward networks are universal approximators / Harvik K., Stinchcombe M., White H. – Neural Networks, 1989. – Vol. 2. – P. 359–366.

Надійшла 17.11.2012 р.

Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 621.396.96

Л.В. КАРПОВА

Хмельницький національний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЗОНДУЮЧИХ СИГНАЛІВ З УРАХУВАННЯМ АМПЛІТУДНИХ ТА КУТОВИХ ФЛУКТУАЦІЙ

*В статті на основі теоретичного аналізу процесів, що протікають в імпульсних генераторах НВЧ та експериментального дослідження імпульсних передавачів НВЧ діапазону на основі цих генераторів, удосконалено математичну модель імпульсного зонduючого радіосигналу з урахуванням статистичних моделей амплітудних та куткових спотворень в його комплексній обвідній.*

*Ключові слова: некогерентний сигнал, кореляція, функція невизначеності, закон розподілу, комплексна обвідна сигналу.*

*The article is based on a theoretical analysis of the processes occurring in the pulsed microwave generators and experimental study of pulsed microwave transmitter range based on these generators, improved mathematical model of the probe pulse signal based on statistical models and angular distortion in its complex envelope.*

*Keywords: incoherent signal correlation function of the uncertainty distribution, the complex envelope of the signal.*

Застосування некогерентних джерел зонduючих сигналів, через недосконалість елементної бази генераторів НВЧ, призводить до того, що потенційні можливості активних радіолокаційних станцій володіють значними обмеженнями. З теоретичної точки зору, це можна пояснити не оптимальністю кореляційних властивостей моделі зонduючих сигналів, яка закладається в алгоритмах обробки сигналів в приймачі і має вигляд радіосигналу без внутрішньої куткової модуляції з прямокутною амплітудною. Проте, навіть простими логічними роздумами, можна прийти висновку, що в дійсності прямокутна обвідна теоретично не можлива, через наявність в радіолокаційному каналі цілого ряду ефектів обмежуючих спектр сигналів, а це вже означає згладжування форми. Наявність же куткової нестабільності генератора НВЧ [5], обумовленої цілим рядом факторів, призводить ще й до «розмиття» спектру і робить його п'єдесталоподібним як при лінійно частотній модуляції. Проте, якщо в першому випадку форму спотворень ще можна спрогнозувати, то в другому випадку це практично неможливо. Єдиним можливим рішенням в даному випадку при потребі формування більш точної удосконаленої моделі радіолокаційного сигналу, може бути статистична оцінка флуктуацій та встановлення їх законів розподілу.

В основу змісту цієї моделі покладено загальноприйнятий вираз, що описує імпульсний зонduючий радіосигнал в комплексній формі:

$$i\&(t) = U\&(t) \exp j(\omega_0 t), \quad (1)$$

де  $U\&(t) = U(t) \exp j(\phi(t) + \phi_0)$  – комплексна обвідна;  $U(t)$  – модулюючий по амплітуді сигнал;  $\phi(t)$  – кутова модулююча складова;  $\phi_0$  – початкова фаза носійного коливання.

При здійсненні радіолокації сигналами з малою базою ( $B \approx 1$ ), як правило, використовують імпульсні зонduючі радіолокаційні сигнали з прямокутною амплітудною обвідною і без внутрішньої куткової модуляції. Форма комплексної обвідної, а відповідно і кореляційні властивості такої моделі сигналу, визначаються виключно формою модулюючого по амплітуді імпульсу. 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, внаслідок дії ряду дестабілізуючих факторів у передавачі при формуванні сигналів комплексна обвідна зонduючого сигналу містить ряд флуктуаційних амплітудних і кутових складових [4], 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 вигравш 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 флуктуації враховано у вигляді амплітудної і кутової складових, що представляють собою вузькосмугові, повільно осцилюючі функції часу з певними законами розподілу:

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

де  $U_{\xi}(t) = \xi_u(k_1 t)$  – амплітудна флуктуаційна складова (випадковий процес з параметром  $k_1$ );

$\phi_{\xi}(t) = \xi_{\phi}(k_2 t)$  – кутова флуктуаційна складова (випадковий процес з параметром  $k_2$ ).

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

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

Зрозуміло, що в більшості випадків питома вага флуктуаційних складових незначна і говорити про них, як про додаткову внутрішню модуляцію, некоректно, в першу чергу через їх недетермінованість. Проте, їх наявність вносить у 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 їх можливих розподілів залежно від режиму роботи передавача та типу генератора НВЧ, що застосовується.

В статті було проаналізовано роботу генераторів, що працюють в імпульсному режимі, а саме магнетрона, стабілотрона, клістрона і лампи біжучої хвилі (ЛБХ). В табл. 1 наведені типові значення залежностей амплітуди, частоти та фази вихідних коливань для цих типів генераторів залежно від стабільності вхідної. Величина реактивної складової вхідного опору генератора НВЧ є пропорційною значенням коефіцієнта затягування фронтів модулюючого імпульсу, а залежність вихідного струму від вхідного – фактичне значення амплітудних спотворень [6].

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	$\Delta j = 10^\circ$ на 1 % $\Delta E / E$	0,67	1–2
ЛБВ	$\Delta j = 20^\circ$ на 1 % $\Delta E / E$	0,67	1–2

Як видно з таблиці, навіть за умови 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. 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:

$$u(t) = U(t)x_u(k_1 t)\exp jx_j(k_2 t), \quad (3)$$

а у випадку імпульсних зонduючих сигналів:

$$U(t) = \begin{cases} x_u(k_1 t) \exp j x_j(k_2 t), & t \leq |t_i| \\ 0, & t > |t_i| \end{cases}$$

Аналітичний опис складових  $\xi_u(k_1 t)$  та  $\xi_\varphi(k_2 t)$  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 вигляд цих функцій 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.

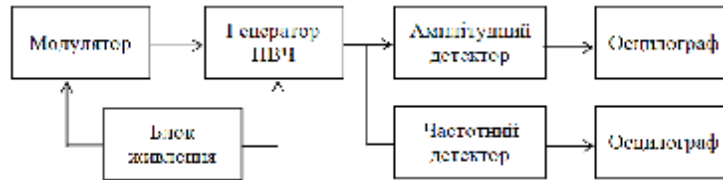


Рис. 1. Схема експериментальної установки

Із застосуванням статистичного апарату (критерій узгодженості Пірсона), результати експериментальних досліджень були апроксимовані до аналітичних виразів, що наведені в табл. 2.

Таблиця 2

**Аналітичні вирази флуктуаційних модуляційних складових сигналу**

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

Підстановка виразів із табл. 2 у вираз (2), дає змогу отримати аналітичний вираз для апроксимації 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 флуктуацій, але і від їх комбінації.

На рис. 2 наведено результати моделювання у вигляді односторонніх кореляційних функцій сигналів для різних розподілів і значень параметрів флуктуаційних складових на прикладі генератора магнетронного типу – гаусівська амплітудна і лінійна частотна модуляції.

На рис. 3 наведено односторонні кореляційні функції радіосигналів з прямокутною, гаусівською амплітудною обвідною і параболічною частотною модуляцією (вирази для клістрону).

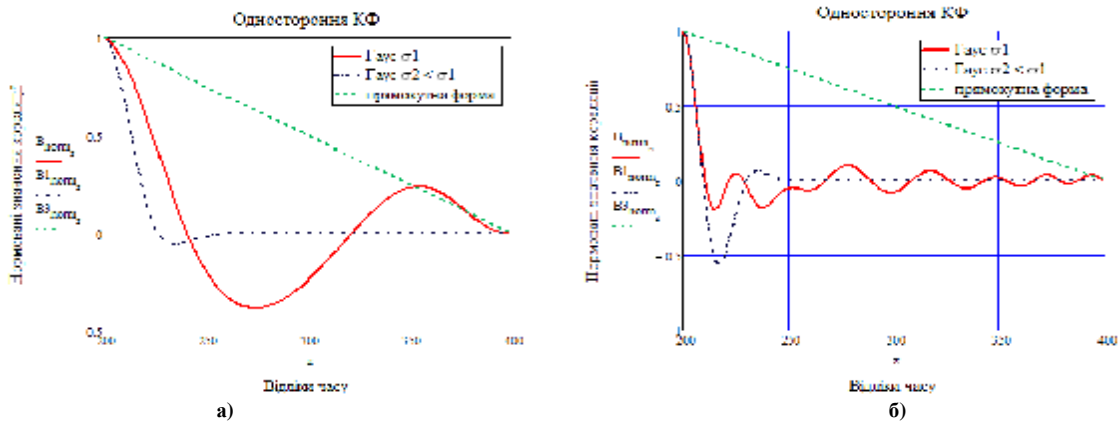


Рис. 2. Односторонні кореляційні функції радіосигналів: а) з гаусівською амплітудною модуляцією і монотонним частотним заповненням; б) з гаусівською АМ і ЛЧМ

Як видно з цих графіків, кореляція сигналу в цілому значно залежить саме від параметрів розподілу. І головне, що було встановлено – ця залежність нелінійна і немонотонна, а має локальні екстремуми.

З виразу для 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  $k_1 = \frac{1}{\sqrt{2ps}}$  впливає, що існує певне екстремальне значення  $\sigma$ , за якого рівень кореляції зберігається у достатньо широкому діапазоні значень  $\tau$  (рис. 4), а це означає, що при застосуванні генераторів такого типу залежно 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 та їх параметрів. А отже, якщо в передавачі неможливо усунути флуктуації, то їх необхідно скорегувати таким чином, щоб флуктуація відповідала саме оптимальному значенню.

**Висновок**

Удосконалена математична модель дала змогу підтвердити гіпотезу, що потенційні можливості зонduючого сигналу щодо розрізнення при урахуванні різних флуктуаційних модулюючих складових перевищує, 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 дасть змогу реалізувати потенційне розрізнення на етапі приймання.

**Література**

1. Вопросы перспективной радиолокации. Коллективная : [монография / под ред. А.В. Соколова]. – М. : Радиотехника, 2003. – 512 с.
2. Воробьев С.Н. Эффективное обнаружение детерминированных сигналов : [монография] / Воробьев С.Н. – СПб : СПбГУАП, 2003. – 139 с.
3. Обробка радіолокаційних сигналів з урахуванням внутрішньоімпульсних фазочастотних нестабільностей : збб. наук. пр. Військ. ін-ту Київського нац. ун-ту ім. Тараса Шевченка / О.М. Шинкарук, І.І. Чесановський. – 2009. – Вип. № 17. – С. 89– 92.

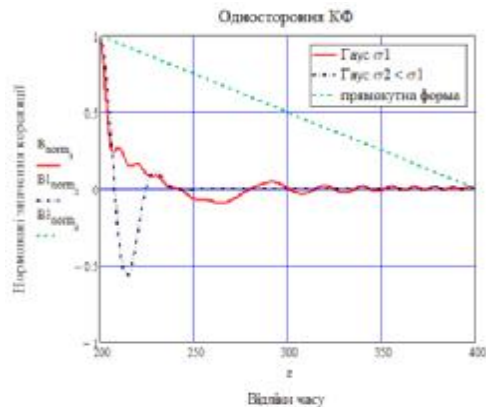


Рис. 3. Одностороння кореляційна функція комплексної обвідної радіосигналу при параболічній ЧМ і різних АМ

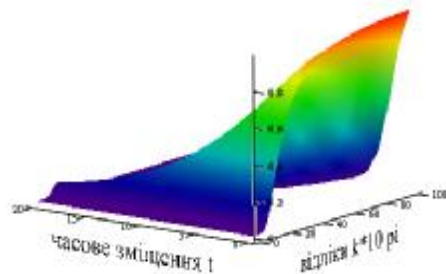


Рис. 4. Залежність коефіцієнта кореляції від часового зміщення та значень  $k_1$

4. Оцінка потенційного ступеня розрізнення імпульсних зондуючих радіосигналів з урахуванням кутової нестабільності генератора НВЧ / О.А. Мясіщев, І.І. Чесановський, Л.В. Карпова // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2010. – № 2. – С. 72– 78.

5. Передающие устройства СВЧ : [учебное пособие для радиотехнических спец. вузов] / Вамберский М.В., Казанцев В.И., Шелухин С.А.; под общ. ред. М.В. Вамберского. – М. : Высш. шк., 1984. – 448 с.

6. Справочник по радиолокации : том 3. Радиолокационные устройства и системы / [под ред. А.С. Винницкого]. – М. : Сов. радио, 1978. – 528 с.

Надійшла 11.11.2012 р.  
Рецензент: д.т.н. Шинкарук О.М.

УДК 681.327.12.001.33

Н.С. СВИРНЕВСКИЙ  
Хмельницкий национальный университет

## ИМИТАЦИЯ ПОЛЕТА КРЫЛАТОЙ РАКЕТЫ НА ОСНОВЕ ОБЪЕКТНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МЕТОДОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПРОГРАММНОЙ СИСТЕМЫ

*Поставлена и реализована на основе объектно-ориентированной методологии проектирования программной системы задача имитации полета крылатой ракеты.*

*Ключевые слова: ракета, траектория, ландшафт, архитектура, программа, графика.*

*Formulated and implemented on the basis of object-oriented design methodology of a software system problem simulate flying cruise missile.*

*Keywords: missile trajectory, the landscape, the architecture, the program schedule.*

### Анализ исследований и публикаций

С развитием информационных технологий все более актуальной становится проблематика разработки программных систем с графическим отображением происходящих процессов [1]. Такие системы строятся на основе соответствующих математических методов [2], методологий программирования [3], с использованием графических библиотек [4].

### Формулирование целей

Целью статьи является отображение процесса разработки программной системы, имитирующей полет крылатой ракеты, включая: анализ предметной области, алгоритмизацию задачи, выбор языка и среды программирования, создание архитектуры программы.

### Изложение основного материала

Для управления полетом крылатой ракеты используются цифровые картины (карты) предварительно отснятых районов местности по маршруту полета. Комплект из лазерного, инфракрасного и спутникового оборудования определяют положение ракеты и цели на карте, а бортовая ЭВМ прокладывает текущий курс ракеты с учетом рельефа местности. Для решения задачи разработки программной системы, обеспечивающей имитацию полета крылатой ракеты над пересеченной местностью к двигающейся цели необходимо создать модели (рис. 1):

ландшафта земли;

траектории перемещения ракеты и цели над поверхностью ландшафта;

сцены, обеспечивающей взаимное положение объектов при их движении и изменении ракурса.



Рис. 1. Имитация полета крылатой ракеты

### Моделирование ландшафта

Ландшафт моделируется на основе карты высот. Для хранения карт высот используется необработанный формат файлов RAW. Этот формат просто читать, поскольку он не содержит заголовков с какой-либо информацией об изображении, такой как размер или тип изображения. Размер карты может быть произвольный, но удобнее использовать квадратную, с размером стороны кратным числу степени двойки: 128x128, 256x256... 1024x1024.

Файлы RAW являются двоичными файлами, содержащими данные о высотах ландшафта