

УДК 621.396.62: 621.396.96

**МОДЕЛЮВАННЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ НА ОСНОВІ
АНАЛІЗУ РОБОТИ ІМПУЛЬСНО–ДОПЛЕРІВСЬКОГО РАДАРУ
ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ В
СЕРЕДОВИЩІ MATLAB¹**

*Реутська Ю. Ю., аспірант, асистент
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна,
reutaska_rtf@ukr.net*

**THE RADAR SIGNAL SIMULATION BASED ON THE ANALYSIS OF PULSE-
DOPPLER RADAR FOR DIGITAL SIGNAL PROCESSING IMPLEMENTATION IN
THE MATLAB ENVIRONMENT**

*Reutskaya Yu. Yu., Postgraduate Student, Assistant
National technical university of Ukraine, "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine*

Вступ

В сучасній радіолокації провідною є тенденція використання цифрових пристроїв, що обумовлено підвищенням вимог щодо швидкодії та точності систем. Складність сучасних радіолокаційних станцій (РЛС) обумовлена їх багатофункціональністю та необхідністю адаптації до заводової обстановки, що постійно змінюється. Вона вимагає моделювання з метою перевірки основних ідей, що підлягають реалізації в РЛС. В [1] було коротко розглянуто основні етапи аналізу роботи РЛС та програмування для реалізації моделювання радіолокаційного сигналу, які більш детально представлені у даній роботі з відповідними результатами моделювання на кожному етапі. Оцінка роботи РЛС розглядалася в заводській обстановці, коли на її вхід, крім сигналів, що відбиті від цілей, надходять сигнали від адитивних флуктуаційних та пасивних завод. Сигнал, що випромінюється антеною РЛС, називається прямим, або зондувальним; у разі використання сигналу, що приймається приймальною антеною РЛС, використовується термін відбитий, розсіяний або радіолокаційний [2].

Постановка задачі

В даній роботі планується:

- Розглянути створення універсальної аналітичної моделі, що дозволяє побудувати тестовий зондувальний сигнал.
- Навести основні аналітичні співвідношення для рішення поставленого завдання, провести аналіз роботи РЛС в заводових умовах на основі іс-

¹ <http://radap.kpi.ua/radiotechnique/article/view/955>

нуючих співвідношень для досягнення оптимальних варіантів.

- На основі проведеного аналізу основних принципів роботи імпульсно – доплерівської РЛС представити синтезовані алгоритми, які є основою імітаційного моделювання радіолокаційного сигналу в середовищі *Matlab*.

Аналіз аналітичних співвідношень для моделювання зондувального сигналу

В якості тестового зондувального ЛЧМ сигналу розглянуто радіоімпульс прямокутної форми, коли частота заповнення імпульсу лінійно зростає від початку імпульсу до його кінця, а точка $t=0$ відповідає середині імпульсу, який в комплексному вигляді можна записати як:

$$\begin{aligned} U_{\text{ЛЧМ}}(t) &= A \cos(\phi_0 + 2\pi(f_0 t + bt^2 / 2)) \\ &= A e^{j\{\phi_0 + 2\pi(f_0 t + bt^2 / 2)\}}, -\tau_i / 2 \leq t \leq \tau_i / 2 \end{aligned} \quad (1)$$

де A — амплітуда сигналу; фаза сигналу з врахуванням початкової фази ϕ_0 дорівнює $\psi(t) = \phi_0 + 2\pi(f_0 t + bt^2 / 2)$; f_0 — несуча частота, Гц; b — параметр швидкості зміни частоти в часі, с^{-1} . Параметр b розраховується за формулою $b = \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{\tau_i} = \frac{2\pi f_{\max} - 2\pi f_{\min}}{\tau_i} = \frac{2\pi W}{\tau_i}$, де ω_{\max} та ω_{\min} — максимальні та мінімальні кутові несучі частоти, рад/с; W — смуга сигналу, Гц; τ_i — довжина сигналу (імпульсу), с. Для реалізації алгоритму частота дискретизації була обрана відповідно вимоги до відліків, а саме $f_s \geq 2W$, де W — максимальна частота, якою обмежений спектр реального сигналу (для тестового прикладу з $W = 40 \cdot 10^6$ Гц, $f_s = 80 \cdot 10^6$ Гц).

Для побудови відбитого від цілей ЛЧМ сигналу вхідними параметрами радіолокаційної системи задається несуча частота f_0 , довжина імпульсу τ_i , смуга частот сигналу W , кількість імпульсів в пачці n , мінімальна та максимальна дальність дій РЛС R_{\max} та R_{\min} відповідно. Нижче зроблений аналіз аналітичних співвідношень цих параметрів для використання в модулюванні.

В даній роботі вважаємо радіолокатор працюючим в імпульсному режимі на частоті $f_0 = 10$ ГГц. Узагальнене рівняння дальності радіолокації визначає порогову потужність прийнятого сигналу за якою він виявляється з заданими характеристиками виявлення: ймовірностями правильного виявлення D та хибної тривоги F . Якщо рішення приймає автомат, то $D = 0.9$, а хибна тривога $F = 10^{-3} \dots 10^{-20}$. В даній роботі реалізований оптимальний прийом сигналу. Є достатнім скористатися визначенням порогового відношення сигнал/шум з кривих виявлення, що представлені в [3,

стор. 78], визначають порогове відношення сигнал/шум $q_{\text{пор}}$ в разях, тобто відношення сигнал/шум на вході детектора (порогового пристрою), при якому забезпечується прийом сигналів із заданими параметрами. За характеристиками виявлення, у разі $D=0.9$ з фіксованим рівнем $F=10^{-6}$ для моделі було отримане приблизне відношення сигнал/шум на вході детектору $q_{\text{пор}}=6$ раз або $q_{\text{пор}}=7.78$ дБ.

Було проаналізовано залежності порогової потужності $P_{\text{пор}}$ від числа імпульсів в пачці n з довжиною імпульсу τ_i за формулою з [3] $P_{\text{пор}}=(q_{\text{пор}}N_0)/(n\tau_i)$, де $N_0=k_{\text{ш}}kT_0$ — спектральна щільність шуму, де $k=1,38\cdot 10^{-23}$ — постійна Больцмана, Дж/К, $T_0=290$ К, $kT_0=4\cdot 10^{-21}$ Дж або Вт/Гц, $k_{\text{ш}}$ — коефіцієнт шуму приймача [3, стор. 56]. Для тестової реалізації моделювання було обрано $n=25$, $\tau_i=10^{-6}$ с з відповідною пороговою потужністю $P_{\text{пор}}=1.92\cdot 10^{-15}$ Вт.

В даній роботі розглядається обробка пачки когерентних радіоімпульсів. У випадку оптимальної обробки пачки когерентних радіоімпульсів $E_{\text{пор}}=P_{\text{пор}}\tau_i n$, де $P_{\text{пор}}$ — порогова потужність одного імпульсу, τ_i — довжина імпульсу, n - число імпульсів в пачці. Порогова потужність в цьому випадку буде $P_{\text{пор}}=\frac{E_{\text{пор}}}{n\tau_i}=\frac{q_{\text{пор}}N_0}{n\tau_i}=\frac{q_{\text{пор}}k_{\text{ш}}kT_0}{n\tau_i}$. Проаналізувавши залеж-

ність величини $P_{\text{пор}}$ від n у разі прийняття добутку $kT_0=4\cdot 10^{-21}$ Дж або Вт/Гц, коефіцієнта шуму приймача 2 раз та порогового відношення сигнал/шум $q_{\text{пор}}=6$ раз у випадку величини довжини імпульсу $\tau_i=10^{-6}$ с, для тестової реалізації моделювання в даній роботі достатньо узяти $n=25$ імпульсів в пачці, і відповідна порогова потужність буде дорівнювати $P_{\text{пор}}=1.92\cdot 10^{-15}$ Вт.

Вважаючи радіолокатор працюючим в імпульсному режимі на частоті $f_0=10$ ГГц та маючим одну й ту саму антену для випромінювання і для прийому сигналів, знайдено максимальну дальність дії за формулою, представленою в [3], а саме $R_{\text{max}}=\sqrt[4]{(P_{\text{прд}}G_a^2\eta^2\lambda^2\bar{S}_0)/((4\pi)^3P_{\text{пор}})}$. Для отримання R_{max} було проаналізовано параметри діючих РЛС та узято: величину середньої імпульсної потужності передавача $P_{\text{прд}}=5000$ Вт, коефіцієнт підсилення антени $G_a=30$ дБ (1000 раз), коефіцієнта корисної дії антено – фідерного тракту $\eta=80\%$, середню величину ефективної площі розсіювання $\bar{S}_0=1$ м² [3, стор. 37] з відповідним отриманим значенням

$R_{\max} = 29486$ м. Для малих дальностей ($\tau_i \leq 1$ мкс) можна вважати, що час відновлення системи $\tau_B \approx \tau_i$, тоді мінімальна дальність дії РЛС $R_{\min} \geq c(\tau_i + \tau_B)/2$ [2], тобто $R_{\min} \geq 3 \cdot 10^8 \cdot \tau_i$. Для тестової реалізації $R_{\min} = 300$ м.

В [2] наведено, в імпульсно-доплерівських РЛС частота повторення імпульсів F_{Π} обирається з умови однозначного виміру швидкості та відсутності зон «сліпих швидкостей» в заданих межах $F_{\Pi} \geq 2V_{R\max} / \lambda$. Було проаналізовано величини F_{Π} , узявши максимальну дальність для конкретних цілей з їх швидкістю та обрано середню $F_{\Pi} = 40$ кГц з відповідною максимальною швидкістю цілі $V_{R\max} = 600 = \pm 300$ м/с.

На рис. 1. представлена загальна модель стратегії збору та зберігання даних для цифрової обробки в багатоканальних імпульсних радарх з багатьма фазовими центрами антени.

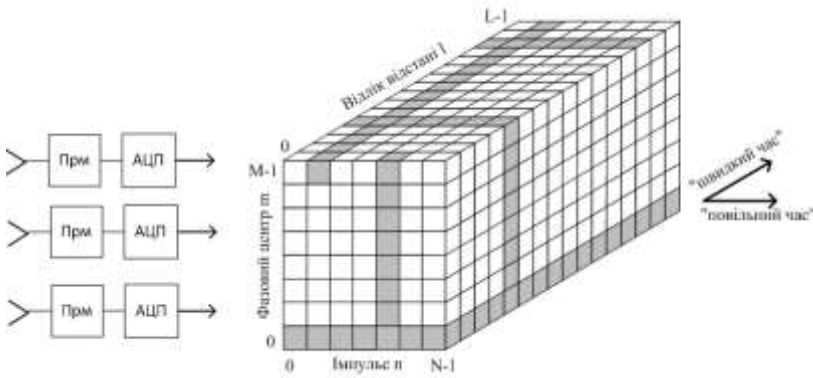


Рис. 1. Модель стратегії збору та зберігання даних для цифрової обробки в багатоканальних імпульсних радарх

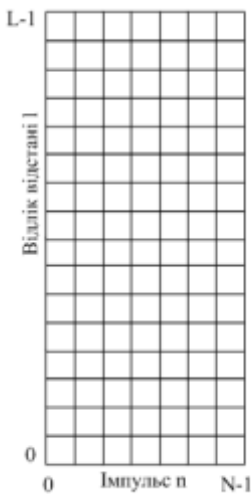


Рис. 2. Матриця даних, що відповідає одному

каналу в «кубі даних»

Радар випромінює послідовність імпульсів з інтервалом або періодом повторення імпульсів (ППІ або ППІ). Величина, що зворотна до ППІ, називається частотою повторення імпульсів (ЧПІ), і може змінюватися, зазвичай, від декількох сотень герц до десятків герц, а іноді, до декілька сотень кілогерц. В порції періоду часу між імпульсами, прийнятий сигнал від кожного каналу антени дискретизується з високою швидкістю, зазвичай в діапазоні сотень кілогерц до декількох десятків мегагерц, а іноді і вище.

Після перетворення в основну смугу частот, кластер із відліків з високою швидкістю з одного каналу і одного імпульсу можна розглядати як один рядок і шар структури у $[l, m, n]$, що називається «куб даних». Кластер із відліків, що взяті з того ж самого каналу та наступного імпульсу зберігається в другому рядку на тому ж рівні, і так далі. Ця стратегія збору та зберігання даних забезпечує гарну концептуальну модель для розуміння більшості операцій обробки сигналів в цифрових радарх [4].

Вимір l в структурі у $[l, m, n]$ (рис. 1) називають «швидким часом», в той час як горизонталь n — «повільним часом» завдяки великій різниці в інтервалах вибірки між відліками даних в послідовних рядках даного стовбцю та в послідовних стовбцях даного рядка. Вертикальний вимір m представляє собою просторову вибірку, а не вибірку часу. На рис. 2 наведено дані матриці у $[l, n]$, що отримані шляхом вилучення даних для одного приймального каналу з «куба даних».

Моделювання зондувального сигналу в *Matlab*

Реалізація моделювання відбитого від цілі ЛЧМ сигналу в середовищі *Matlab*) складається з наступних задач:

1. Моделювання зондувального ЛЧМ сигналу (ЛЧМ сигнал).
2. Моделювання радіолокаційного ЛЧМ сигналу (ЛЧМ сигнал + цілі).
3. Моделювання додавання шуму до радіолокаційного ЛЧМ сигналу (ЛЧМ сигнал + цілі + шум).
4. Моделювання додавання пасивної завади (клатеру) до радіолокаційного ЛЧМ сигналу (ЛЧМ сигнал + цілі + шум + завада).

Для ініціалізації параметрів цілей в моделі було обрано три цілі зі швидкостями — 180 м/с, 270 м/с та 180 м/с, що менші за $V_{R_{max}}$, та відстанями 2 км, 3 км, 10 км, що менші за R_{max} . Відношення сигнал/шум на вході нормалізованого тракту приймача для кожної цілі запропоноване 1 дБ, 0 дБ та -7 дБ. Оскільки в даній роботі далі буде розглядатися нормалізація рівня сигналу до 1 (в роботі не розглядаються підсилюючі тракти обробки), то відношення сигнал/шум від кожної поточної цілі, що враховує заганання від відстані до цілі кожного поточного імпульсу та властивості цілі теж нормалізоване.

Не враховуючи шум та завади, вихідний сигнал $y(t)$, який відбивається від цілей, складається з таких основних складових, як корисний сигнал, несуча та допліровське зміщення, можна представити у вигляді:

$y(t) = b(t - t_0) e^{j(2\pi F_t(t - t_0))} \cdot e^{j(2\pi \frac{2VF_t}{c}(t - t_0))} \cdot e^{j(\phi(t))}$, де $b(t)$ — амплітуда відбитого сигналу; F_t — несуча частота радару; $\phi(t)$ — фазова модуляція відбитого сигналу; t_0 — час затримки; V — швидкість цілі. Цей сигнал потрібно представити двовимірною матрицею (рис. 2) відліків сигналу з розрахунку вікна радару, що складається з елементів швидкого та повільного часу (дальність та кількість імпульсів відповідно) та має розмір [кількість відліків швидкого часу (*NumberSampleSignalOut*) × кількість відліків повільного часу (*NumberPulse*)].

У разі формування симетричного ЛЧМ сигналу амплітуда розраховується за формулою (1) з використанням функції *real()*, кількість відліків цифрового сигналу дорівнює відношенню довжини сигналу на інтервал дискретизації, тобто $N = T/dt$. Для відображення фази ЛЧМ сигналу використовуються функція *angle()*, що повертає масив значень аргументів для комплексних елементів сигналу, які вимірюються в радіанах і знаходиться в межах від $-\pi$ до π та функція *unwrap(angle())*, що коригує фазові кути елементів масиву при переході через значення π , доповнюючи їх значеннями $\pm 2\pi$ для того, щоб прибрати розриви функції. На рис 3 зображено вектор відліків ЛЧМ сигналу (масив *signalLFM*). Кількість відліків зберігається в змінній *NumberSampleSignalLFM*.

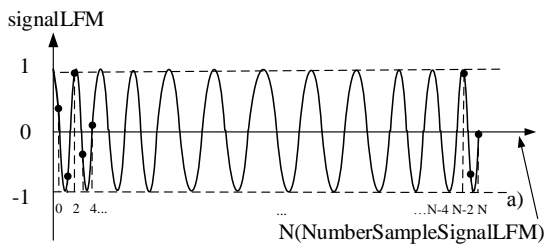


Рис. 3. Вектор відліків ЛЧМ сигналу

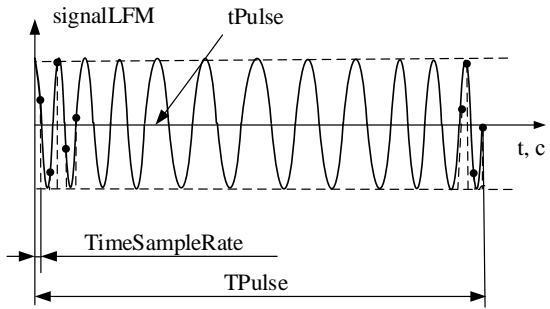


Рис. 4. Вектор часу ЛЧМ сигналу

Довжина імпульсу *TPulse* з урахуванням періоду (часу) дискретизації *TimeSampleRate*, що обернено пропорційний до частоти дискретизації, буде розрахована як добуток *NumberSampleSignalLFM* та *TimeSampleRate*. Вектор часу сигналу *tPulse* зображений на рис. 4. Для формування вікна роботи радару (рис. 5) знаходимо початкове T_{min} та кінцеве T_{max} значення часового вікна радару за формулою $T_{min,max} = 2R_{min,max} / c$. Після дискретизації вікна отримаємо вектор часу вікна радару *tRadar* (рис. 5, б). Довжина масиву *tRadar* зберігається в змінній *NumberSampleSignalOut*.

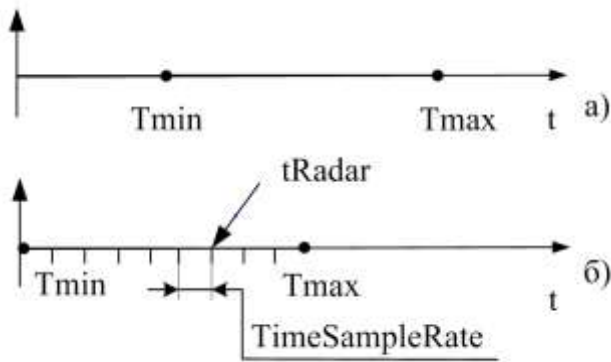


Рис. 5. Вектор часу вікна радару

лей та внутрішній — за кількістю імпульсів.

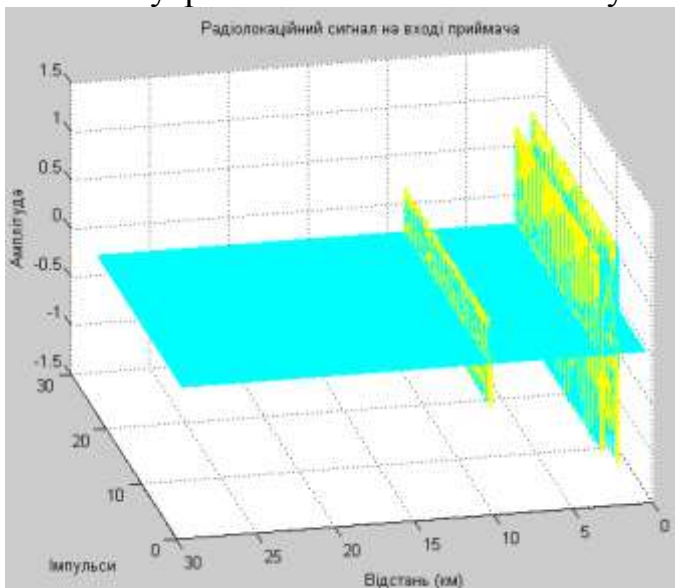


Рис. 6. Вигляд сигналу, що відбився від цілей

нює різниці загальної відстані до цілі та відстані, яку встигла пройти ціль за час проходження поточного імпульсу.

Було синтезовано два варіанти алгоритмів знаходження конкретних відліків (індексів) на осі швидкого часу, що відповідають знаходженню поточної цілі для кожного поточного імпульсу. Сигнал, що відбився від цілей, враховуючи рівень відношення сигнал/шум на вході нормалізованого тракту приймача для кожної цілі і не враховуючи шум та завади представлений на рис. 6.

Для спрощення рішення задач синтезу та аналізу РТС в якості моделі адитивної флуктуаційної завади в даній моделі використовується адитивний білий гаусовський шум (функція *wgn()*).

Для моделювання пасивної завади доцільно скористатися статистичним підходом, поєднанням функції щільності ймовірності (ФЩЙ) для опису діапазону завади у вигляді флуктуацій за амплітудою (властивості поверхні) у відбитого від поверхні сигналу, що в даному прикладі моду-

В моделюванні передбачена перевірка на квадратичність фази. Для цього потрібне використання двох стандартних функцій середовища Matlab: функції *polyfit()* та *polyval()*.

Для формування сигналу, що відбивається від цілей, використовується два цикли: зовнішній — за кількістю ці-

На початку зовнішнього циклу для кожної цілі, відповідно відстані до швидкості поточної цілі, визначається доплерівська частота за формулою $\tau_D = 2R_{max} / c$. За допомогою внутрішнього циклу формується відбитий від цілі сигнал для кожного імпульсу. Для цього спочатку знаходиться час початку кожного поточного імпульсу. Далі необхідно знайти поточну відстань до цілі від кожного імпульсу, що дорів-

люється за логнормальним розподілом та спектральної щільності потужності (СЩП) завади для опису відбиваючої здатності поверхні, яка в даному прикладі модулюється Гаусовською функцією.

Для моделювання ФЩЙ використовується функція $\text{lognrnd}(MU, SIGMA, m, n)$ генерує матрицю псевдовипадкових чисел з розмірністю m на n елементів, що розподілені за логнормальним розподілом з параметрами математичного очікування MU та середньоквадратичного відхилення $SIGMA$. В моделюванні використовується $MU=0$ та $SIGMA=1$.

Для моделювання СЩП завади була обрана Гаусовська функція. Функція $\text{normpdf}(X, MU, SIGMA)$ служить для розрахунку значень функції щільності ймовірності нормального (Гаусовського) розподілу для значень випадкової величини X , математичного очікування MU та середнього квадратичного відхилення $SIGMA$. Стандартний нормальний розподіл має параметри розподілу рівні $MU = 0$ і $SIGMA = 1$. Далі формується вікно Гауса для отримання завади, СЩП якої відповідає закону нормального (Гаусовського) розподілу. Для отримання сигналу завади з необхідною СЩП використовується цифрова фільтрація, а саме фільтр на основі швидкого перетворення Фур'є (ШПФ). Для цього необхідно отримати спектр завади, помножений на вікно Гауса, та узяти зворотне перетворення Фур'є.

Наступною дією є моделювання сигналу завади з урахуванням відношення завади/шум. Середня потужність заводового сигналу як функція відстані D від РЛС до ділянки поверхні завади представлена в [5]. Ця величина залежить від критичної відстані $D_{кр}$, при якій відбувається зміна кута нахилу кривої залежності середньої потужності відбитого сигналу від дальності. Якщо $D < D_{кр}$ (область плато), затухання середньої потужності заводового сигналу пропорційне D^{-3} - D^{-4} . Показник степеню, що дорівнює -3, означає, що питома ЕПР завади (середнє квадратичне відхилення завади) не залежить від D .

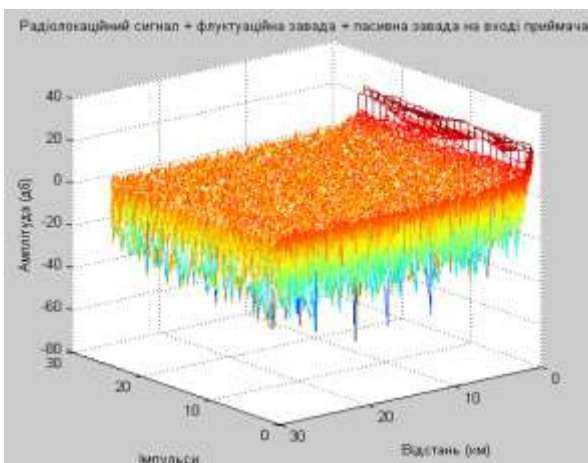


Рис. 7. Результат моделювання радіолокаційного сигналу

Показник степені, що дорівнює -4, означає, що середнє квадратичне відхилення завади пропорційне D^{-1} . Тому далі моделюємо сигнал завади з урахуванням затухання, у разі обраного варіанту моделі з середнім квадратичним відхиленням завади, що пропорційне D^{-1} . Результуючий змодельований радіолокаційний сигнал, що відбивається від цілей та пасивних завод з урахуванням шуму представлений на рис. 7.

Висновки

У результаті проведеного аналізу роботи РЛС в заводових умовах на основі існуючих співвідношень досягнутий оптимальний варіант моделювання радіолокаційного сигналу в середовищі Matlab, що є основою для подальшого проведення оцінки ефективності цифрової обробки радіолокаційного сигналу на фоні шумів та завад, в результаті якої визначаються дальності до цілей та швидкості цілей.

Перелік посилань

1. Реутська Ю. Ю. Моделювання радіолокаційного сигналу на основі аналізу роботи імпульсно-доплерівського радару в заводовій обстановці / Ю. Ю. Реутська // Радіотехнічні поля, сигнали, апарати та системи ; тези міжн. наук.-техн. конф. ; 10-16 бер. 2014 р. – Київ, 2014. – 258 с. – с. 177–178.
2. Радиотехнические системы: учебник для студ. высш. учеб. заведений / Под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Изд. центр «Академия», 2008. – 592 с. – ISBN 978-5-7695-3767-7.
3. Бакулев П. А. Радиолокационные системы. Учебник для вузов / П. А. Бакулев. – М. : Радиотехника, 2004. – 320 с. – ISBN 5-93108-027-9.
4. Richards M. A. Fundamentals of Radar Signal Processing / M. A. Richards. – McGraw-Hill, New York, 2005, – 513 p. – ISBN 978-0-07-177648-6.
5. Справочник по радиолокации. / Под ред. М. Скольника. ; пер. с англ. под общ. ред. К. Н. Трофимова, Я. С. Иццоки. – М. : Сов. радио, 1976. – 456 с.

References

1. Reutska Yu.Yu. (2014) Modeliuvannia radiolokatsiinoho syhnalu na osnovi analizu roboty impulsno-doplerivskoho radaru v zavadovii obstanovtsi [Simulation of a radar signal based on the pulse - Doppler radar work analysis in the noise and clutter situation]. Radio Engineering Fields, Signals, Devices and Systems (REFSDS'2015), pp. 177-178.
2. Kazarinov Yu. M., eds. et al (2008) Radiotekhnicheskie sistemy [Radio engineering systems]. Moskow, Akademiya Publ., 592 p.
3. Bakulev P. A. (2004) Radiolokatsionnye sistemy [Radar systems]. Moskw, Radiotekhnika Publ., 320 p.
4. Richards M.A. (2005) Fundamentals of Radar Signal Processing. New York, McGraw-Hill Publ., 513 p.
5. Skolnik M.I, eds. (1970) Radar Handbook, New-York, McGrawHill, 846 p.

Реутська Ю. Ю. Моделювання радіолокаційного сигналу на основі аналізу роботи імпульсно-доплерівського радару для реалізації цифрової обробки сигналів в середовищі Matlab. Представлені етапи моделювання радіолокаційного сигналу на основі аналізу роботи імпульсно – доплерівського радару. Наведені основні аналітичні співвідношення для рішення поставленого завдання. Розглянуто особливості моделювання, коли разом з сигналами, що відбиті від цілей, надходять сигнали від адитивних флукуаційних та пасивних завад.

Ключові слова: моделювання, радіолокаційний сигнал, РЛС, шум, пасивна завада.

Реутская Ю. Ю. Моделирование радиолокационного сигнала на основе анализа работы импульсно-доплеровского радару для реализации цифровой обработки сигналов в среде Matlab. Представлено этапы и результаты моделирования радиолока-

ционного сигнала на основе анализа работы импульсно – доплеровского радара. Приведено основные аналитические соотношения для решения поставленной задачи. Рассмотрены особенности моделирования, когда вместе с сигналами, отраженными от целей, поступают сигналы от аддитивных флуктуационных и пассивных помех.

Ключевые слова: моделирование, радиолокационный сигнал, РЛС, шум, пассивная помеха.

Reutska Yu. Yu. The radar signal simulation based on the analysis of Pulse-Doppler radar for digital signal processing implementation in the Matlab environment.

Introduction. The complexity of modern radar (RLS) due to their versatility and the need to adapt to the interference situation is constantly changed. The models to test the basic ideas to be implemented in the radar are required. It is important to consider the main stages of the simulation of the radar signal based on the analysis of radar operation.

Problem statement. The creation of a universal analytical model to build a radar signal in Matlab is considered.

Theoretical results. Stages and results of the radar signal simulation are presented and based on the analysis of pulse – Doppler radar. Basic analytical relations of the task are given. Features of simulation when signals of additive fluctuation noise and clutter together with the echo target signals arrive are considered.

Conclusion. As a result of analysis of radar interference conditions on the basis of existing relations an optimum variant model of radar signal in Matlab environment is reached. This is the basis for further evaluation of the digital processing effectiveness of the radar signal to background noise and interference (clutter), namely to determine the distance to targets and target's speeds.

Keywords: simulation, radar signal, radar, noise, clutter.