

**УЗАГАЛЬНЕННЯ МЕТОДІВ ЦИФРОВОГО СИНТЕЗУВАННЯ
АПЕРТУРИ В РАДІОЛОКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ**

Розкрито основну суть методу цифрового синтезу апертури в радіотехнічних системах. Узагальнено та проведено порівняльний аналіз сучасних методів синтезування апертури, що застосовуються в задачах дистанційного зондування Землі. Розглянуто основні математичні моделі каналів синтезування апертури. Проілюстровано переваги радіолокаційних систем із цифровою синтезованою апертурою антен та узагальнено приведені методи синтезування при прямолінійному русі летального апарату.

Ключові слова: радіолокаційна система, синтезована апертура антени, радіолокаційне зображення, діаграма спрямованості, роздільна здатність.

I.I. CHESANOVSKIY, D.D. VERBA
Khmel'nitsky National University**SUMMARY OF METHODS FOR DIGITAL APERTURE SYNTHESIS IN RADAR SYSTEMS**

Abstract – This basic essence of the method of digital synthesis aperture in radio systems. Generalized and comparative analysis of modern methods of synthesizing the aperture used in the tasks of remote sensing. The basic mathematical model synthesizing channel aperture. Illustrated the benefits of radar systems with digital synthetic aperture antennas and generalized methods of synthesis are given in rectilinear motion UAVs.

Keywords: radar systems, synthetic aperture antennas, radar images, pattern, resolution.

Вступ. Впровадження цифрових методів обробки сигналів в радіотехнічних системах дало змогу значно підвищити їх ефективність, що в свою чергу, значно розширило сферу радіотехнічних застосувань. В багатьох випадках, цифрова обробка сигналів дає змогу подолати фізичні обмеження параметрів радіосистем, що обумовлені енергетичними (дальність дії – потужність, роздільна здатність – тривалість (ширина спектру) сигналу і т.д.), габаритними (спрямованість антени – розміри (апертура)) тощо. Одним із яскравих прикладів такого подолання обмежень, є радіолокаційні системи із цифровим синтезуванням апертури антени. Хоча даний принцип був впроваджений задовго до появи відповідного класу цифрових систем і вперше реалізований в аналоговому вигляді, широкого застосування він отримав лише в останній час з розробкою потужних мікро ЕОМ. В основі даного принципу покладено ідею, що антена радіолокаційної системи, за певних умов (детермінованості швидкості і траєкторії руху елементарної антени і певної статистики об'єкту спостереження) може бути синтезована (віртуально) по закінченню процесу зондування, шляхом математичної обробки сигналів, що прийняті за певний інтервал часу. Такий підхід дав змогу підвищити роздільну здатність по кутових координатах (відповідно і по дальності) сучасних радіолокаційних систем в тисячі разів, як наприклад в системах дистанційного зондування Землі, де цей принцип зайняв визначне місце.

Постановка задачі. Застосування радіолокаційних систем для дистанційного зондування земної поверхні є достатньо специфічними, оскільки потребує подолання ряду протиріч при побудові радіолокаційних систем, а саме забезпечення високої роздільної здатності при обмежених енергетичних ресурсах передавачів, що може бути в певній мірі реалізовано шляхом застосування широко смугових сигналів, оскільки забезпечення високої роздільної здатності по кутових координатах за рахунок направленості антени є фізично неможливим (антена розміщується на космічному апараті). Єдиним можливим шляхом подолання даного протиріччя виявилось застосування радіолокаційних систем (РЛС) з цифровим синтезуванням апертури антени (ЦСАА), які передбачають застосування мало апертурних антен.

В основі принципу цифрового синтезування покладено виконання наступного алгоритму. Через регулярні проміжки часу антена РЛС випромінює відносно широкий у вигляді пелюстка промінь на місцевість у бік від траєкторії польоту. При поступальному русі платформи зі знімальною системою, яка розташовується в смузі зйомки, об'єкт переміщується всередині випромінюючого антеною радіопроміння. Під час польоту об'єкт опромінюється з багатьох лінійно розташованих позицій в межах зміщення діаграми спрямованості антени. Віддзеркалені радіосигнали приймаються також з багатьох лінійно розподілених позицій. Внаслідок штучного переміщення наземного об'єкта через радіопромінь після відбиття на об'єкті відбувається зміна частоти і фази випромінених антеною радіоімпульсів.

У РЛС з синтезованою апертурою застосовується мало апертурна антена, широка діаграма спрямованості якої нерухома, відносно літального апарату на якому вона розміщена і направлена перпендикулярно лінії шляху (так званий «бічний огляд»). При польоті літального апарату (рис. 2) антена РЛС послідовно займає в просторі положення на прямій лінії (траєкторії польоту літального апарату), тим самим формуючи штучну (синтезовану) апертуру антени, яка в певному сенсі може ще й розглядатись як решітка [2].



Рис. 1. Радіолокаційне зображення ділянки місцевості отримане за допомогою системи дистанційного зондування землі

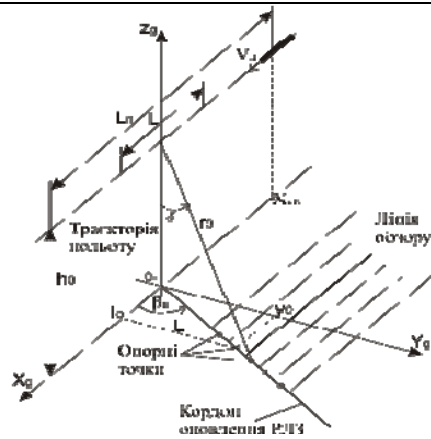


Рис. 2. Геометрія РСА, яка використовується при створенні математичної моделі

Стає очевидним, що за умови статичності сцени спостереження і лінійності руху, запам'ятовуючи ряд сигналів, послідовно прийнятих антеною РЛС в кожній точці, на ділянці траєкторії (рис. 2), потім когерентно їх підсумовуючи, отримується результуюча вузька діаграма спрямованості антени, хоча штучно сформована, але за даних умов, нічим принципово не відрізняється. Розмір синтезованої апертури антени РЛС визначається довжиною ділянки траєкторії, на якому проводиться запам'ятовування і когерентне підсумовування сигналів [3]. Дана довжина обмежується декількома факторами, основними з яких є стабільність траєкторії польоту літального апарату і ширина діаграми спрямованості елементарної антени, що застосовується для синтезу. Крім того, довжина синтезування визначається і математичним методом синтезу, яких на сьогоднішній день є декілька.

Широкого застосування, останнім часом, отримали методи формування радіолокаційного зображення при прямолінійному русі. Принцип роботи ЦСАА на основі методу **прямой згортки** полягає в наступному, сигнал $\xi(m, p)$ із виходу АЦП в кожному періоді зондування p розподіляється по N_r каналах дальності у відповідності за номером відліку по дальності m . Далі в кожному m -му каналі дальності розраховується значення сигналу відповідно співвідношення (1).

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{p_i=0}^{N_2-1} \xi_1\{m, p_1 + q\} h_2\{m, p_1\} \right| = \left| \sum_{p_1=0}^{N_2-1} \xi_1\{m, q - p_1\} h_2\{m, p_1\} \right| \quad (1)$$

Фактично, даний вираз є послідовною реалізацією двох операцій – попередньої фільтрації (ПФ) та фільтра синтезування (ФС) (рис. 3) [1]. В ПФ виконуються операції, які описуються співвідношенням (2), для чого в склад ПФ включені множник і самотор комплексних сигналів, а також постійна пам'ять вагової функції ПФ $h_1(p)$ і оперативна пам'ять для зберігання вихідних відліків сигналу.

Формування відліків вихідного сигналу ПФ відбувається одночасно у всіх N_r каналах дальності [1]. Основне співвідношення, яке визначає число відліків для вихідного сигналу ПФ на інтервалі синтезування, вираз (3).

$$\xi_1\{m, p_1\} = \sum_{i=0}^{N_1'-1} \xi\{m, p_1 N_n + i\} h_1\{i\}; p_1 = 0, 1, 2, \dots; N_n = N_1' / n_1 \quad (2)$$

$$N_2 = N / N_n, h_2\{m, p_1\} = \sum_{i=0}^{N_1-1} h\{m, p_1 N_n + i\} \quad (3)$$

По мірі польоту летального апарату рядок за рядком формується РЛЗ полоси місцевості. Це показано на рис.4.

Методом швидкої згортки оснований на застосуванні зворотнього перетворення Фур'є, що дає змогу отримати наступний вираз для сигналу $J(\eta)$ на виході системи обробки.

$$J(\eta) = F^{-1}\{F[\xi(t)] \times F[h(t)]\} \quad (4)$$

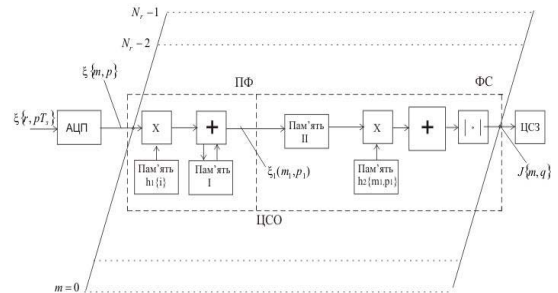


Рис. 3. Структурна схема цифрової системи при обробці способом прямої згортки

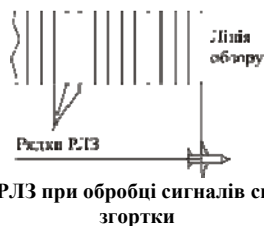


Рис. 4. Схема РЛЗ при обробці сигналів способом прямої згортки

$$F[n] = F[s(k)] = \sum_{k=0}^{N_0-1} s(k) \exp(-j2\pi kn / N_0).$$

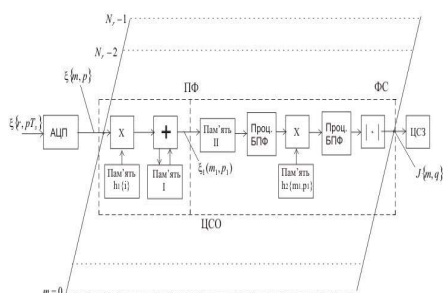


Рис. 5. Структурна схема цифрової системи при обробці способом швидкої згортки

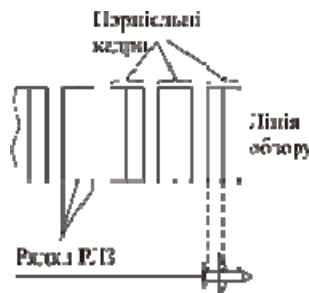


Рис. 6. Схема РЛЗ при обробці сигналів способом швидкої згортки

Розподіл сигналу $\xi(m, p)$ по каналах дальності у методі швидкої згортки відбувається так само, як у методі ПЗ. Сигнал з виходу ПФ потрапляє в пам'ять другого етапу, що також є аналогією методу ПЗ [1]. Однак в пам'яті ФС накопичується не N_2 відліків комплексного сигналу, а N_3 відліки, тобто на $N_3 - 1$ відліки більше ніж при ПЗ. Ці N_3 відліки сигналу $\xi_1(m_1, p_1)$ потрапляють в процесор ШПФ, на виході якого формуються N_3 відліки сигналу ДПФ. Структурну схему до відповідного методу зображено на рис. 5.

По мірі польоту летального апарату (ЛА) парціальні кадри шикуються в полосу, як показано на рис. 7. Такий спосіб називається покадровим.

Кількість операцій для отримання одного відліку

Попередня фільтрація: $R_1 = (N_1 N_3 / N_6)_{mn} + (N_1 N_3 / N_6)_{сум.}$

Синтезування: $R_2 = (N_3 (\log_2 N_3 + 1) / N_6)_{mn} + (N_3 / N_6)_{сум.}$

Сигнал, який відбитий від земної поверхні в межах m -ї смуги дальності $s(pTz)$ представляє собою суму елементарних сигналів $s_i(pTz)$ відбитих від точкової цілі [3]. Якщо для скорочення міркувань відволіктися від імпульсного характеру роботи РСА, що повністю допустимо при розгляді принципів синтезування, і рахувати елементарний відбитий сигнал $s_{mi}(t)$ функцією безперервного часу t , то для будь-якої полоси дальності сигнал можна описати виразом (5).

Сигнал, відбитий i точковою ціллю:

$$S_{mi}(t) = U_i G(t - t_i) \exp\left\{-j\left[2\pi V_n^2 (t - t_i)^2 / \lambda r_i - \phi_i\right]\right\}, \quad (5)$$

де $r_m \leq r_i \leq r_m + p_r, t_i = x_i / V_n, x_i$ – абсциса точкової цілі, $S_m(t) = \sum_i S_{mi}(t)$.

Опорна функція для r_m – полоси дальності:

$$h_{mi}(t) = H(t) \exp\left[j2\pi V_n^2 (t - 2t_i)(\lambda r_m)\right] = h_m(t) \exp(-j\omega_{mi}t) \quad (6)$$

Для отримання РЛЗ i точки земної поверхні потрібно знайти:

$$J_{mi}(\omega_i) = J_{mi}(\omega_{mi}) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \xi_{mi}(t) h_{mi}(t) dt \right| = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \xi_{mi}(t) h_m(t) \exp(-j\omega_{mi}t) dt \right| \quad (7)$$

Для отримання РЛЗ групи точок земної поверхні з різними ω_i знаходимо:

$$J_m(\omega) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \xi_m(t) h_m(t) \exp(-j\omega t) dt \right|, \quad (8)$$

де $\omega = 4\pi V_n \chi / \lambda r_m, \chi$ – абсциса сигналу РЛЗ.

РЛЗ, як функція просторової координати

$$J_m(\chi) = \left| \int_{-T/2}^{T/2} \xi_m(t) h_m(t) \exp[-j4\pi V_n \chi t / (\lambda r_m)] dt \right|. \quad (9)$$

Із виразів (8) та (9) слідує, що процес обробки сигналів оснований на гармонічному аналізі функцій, який отримується в результаті перемноження прийнятого сигналу на опорну функцію. Тому спосіб обробки сигналів ЦРСА, при якому в цифровій формі реалізується вираз (9) був названий гармонічним аналізом (ГА).

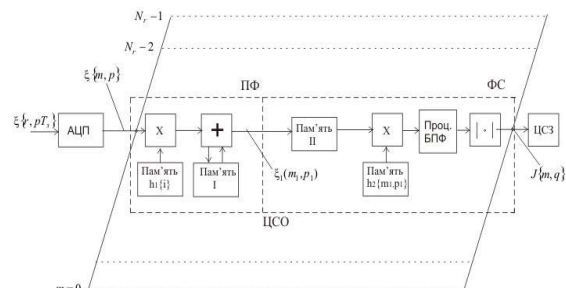


Рис. 7. Структурна схема цифрової системи при обробці способом гармонічного аналізу

Структурну схему, якого показано на рис.7.

В області цифрової обробки сигналів РЛЗ представляє собою модуль ДПФ результату перемноження сигналу та опорної функції:

Для дискретного часу:

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{k=0}^{N_r-1} \xi\{m, k\} h\{m, k\} \exp(-j2\pi kq / N) \right|, \quad (10)$$

Процес цифрового синтезування апертури антени в цілому при обробці сигналів методом ГА при двоступеневій обробці:

$$J\{m, q\} = \left| \sum_{k=0}^{N_2-1} h_2\{m, k\} \exp(-j2\pi kq / N_2) \sum_{i=0}^{N_1-1} \xi\{m, kN_n + i\} h_1\{i\} \right|, \quad (11)$$

$$q = -N_2/2, \dots, -1, 0, 1, \dots, N_2/2, \quad k = 0, 1, \dots, N_2 - 1$$

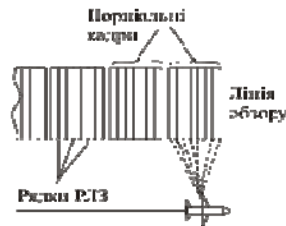


Рис. 8. Схема формування РЛЗ при обробці сигналів способом гармонічного аналізу

Принцип покадрового утворення РЛЗ при обробці сигналів методом ГА показано на рис.8.

Окрім, прямолінійного руху ЛА є інший коли синтезована апертура антени моделюється при довільному русі ЛА та використовують наступні види обзору: передньо-боковий обзир із зоною у вигляді неперервної полоси місцевості, телескопічний обзир із зоною у вигляді окремого кадру місцевості, передньо-боковий обзир із формуванням РЛЗ у вигляді парціальних кадрів. Та поруч із тим кожен із цих оглядів РЛЗ формується на основі трьох вище представлених методів.

Висновки. Таким чином, як видно з проведеного аналізу, суттєва відмінність розглянутих методів полягає саме в обробці сигналу на другому етапі у фільтрі синтезування. При технічній реалізації метод прямої згортки самий простий та не потребує збільшення пам'яті для зберігання інформації про відліки. Але поруч із тим, він є менш ефективним через послідовне утворення РЛЗ. Переваги двох інших методів полягають в тому, що на одному інтервалі синтезування формується не один відлік, а N_6 відліків в методі швидкої згортки та N_2 відліки сигналу РЛЗ в методі гармонічного аналізу, в результаті чого утворення РЛЗ відбувається покадрово.

Література

1. Антипов В.Н. Радиолокаційні станції з ЦСАА / В.Н. Антипов, В.Т.Горяінов. – М. : Радіо і зв'язок, 1988. – 304 с.
2. Радиолокаційні системи багатофункціональних літаків. Т.1. РЛС – інформаційна основа бойових дій багатофункціональних літаків. Системи і алгоритми первинної обробки радіолокаційних сигналів / Под ред. А. І. Канащенкова і В. І. Меркулова. – М. : Радіотехніка, 2006. – 656 с.
3. Кондратенко Г.С. Радиолокаційні станції огляду Землі / Г.С. Кондратенко, В.С. Потехін. – М. : Радіо і зв'язок, 1983. – 272 с.
4. Дудник П.І. Багатофункціональні радіолокаційні системи : [навч. посібник для вузів] / П.І. Дудник, А.Р. Ільчук. – М. : Дрофа, 2007. – 283 с.

References

1. Antipov V.N., Goryainov V.T. Radiolokatsiyni stantsii s TSSAA. M. Radio i zvyazok, 1988. 304p.
2. Kanashshenkov A. I., Merkulov V. I. Radiolokatsiyni systemy bagatofunktional'nyh litakiv. vol.1. RLS – informatsiyna osnova boyovyh diy bagatofunktional'nyh litakiv. Sistemy i algorithmy pervinnoi obrobky radiolokatsiynyh signaliv. M. Radiotekhnika, 2006. 656 p.
3. Kondratenko, G.S., Potehin V.S. Radiolokatsiyni stantsii oglyadu Zemli. M. Radio i zvyazok, 1983. 272 p.
4. Dudnyk P.I. Bagatofunktional'ni radiolokatsiyni systemy. M. Drofa, 2007. – 283 p.

Рецензія/Peer review : 18.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.4.2013 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Шинкарук О.М.