

# Оцінка параметрів фільтрів для формування плоского фронту хвилі в радіолокаційних станціях із синтезованою апертурою

Слюсарчук О. О.

Центральний науково-дослідний інститут Міністерства оборони України

E-mail: [saa2812@ukr.net](mailto:saa2812@ukr.net)

Задача досягнення розрізняювальної здатності в смуговій радіолокаційній станції із синтезуванням апертури підвищеної дальності дії для розпізнавання цілей є актуальною на теперішній час, незважаючи на значні досягнення в цьому питанні. З точки зору розпізнавання об'єктів до певного типу, виду або класу розрізнення 0.2÷0.3 метра є достатнім для вирішення цієї задачі. Проте проблема отримання надвисокого розрізнення в смуговій радіолокаційній станції із синтезуванням апертури підвищеної дальності дії вимагає вирішення ряду питань, зокрема оцінки параметрів фільтрів для формування плоского фронту хвилі в радіолокаційних станціях із синтезованою апертурою. Одним з шляхів вирішення цієї проблеми є введення додаткових алгоритмів обробки відбитого сигналу, які штучно формують квазіплоский фронт хвилі зондувального сигналу. В даній статті вирішується питання вибору та оцінки параметрів фільтрів для формування плоского фронту хвилі в радіолокаційній станції надвисокого розрізнення підвищеної дальності дії. Для досягнення зазначеної мети в статті запропоновано: поетапний порядок розрахунку цифрових фільтрів; оцінка кількості відліків цифрових фільтрів з імпульсними характеристиками кінцевої довжини в каналах і смузі спостереження; оцінка кількості відліків імпульсної характеристики фільтрів. Для формування квазіплоского фронту хвилі в смуговій радіолокаційній станції із синтезуванням апертури надвисокого розрізнення підвищеної дальності дій в алгоритмах обробки необхідно використати цифрові фільтри з імпульсними характеристиками кінцевої довжини і лінійною фазовою характеристикою. З точки зору отримання мінімальних втрат в розрізняювальній здатності радіолокаційних станцій із синтезованою апертурою по шляховій дальності в процесі штучного формування плоского фронту хвилі зондувального сигналу доцільно використати чебишевську апроксимацію амплітудно-частотної характеристики оптимальних фільтрів з мінімаксною помилкою. Ширина перехідної смуги таких фільтрів значно менша, ніж у інших оптимальних фільтрів з такими ж значеннями кількості відліків імпульсних характеристик, амплітудами пульсацій в смузі пропускання і режекції.

*Ключові слова:* радіолокація; синтезована апертура; надвисоке розрізнення; формування плоского фронту хвилі; параметри фільтрів; шляхова дальність; смуга спостереження; смуга пропускання; смуга непропускання

DOI: [10.20535/RADAR.2019.77.60-65](https://doi.org/10.20535/RADAR.2019.77.60-65)

## 1 Постановка задачі

Проблема створення радіолокаційних станцій із синтезованою апертурою (РСА) надвисокого розрізнення і збільшеної дальності дії, полягає в сферичності фронту хвилі зондувального сигналу. Класична структура РСА надвисокого розрізнення має обмеження на добуток розрізняювальних координат (критерій Лейта). Це обмеження по дальності дії складає декілька кілометрів для розрізняювальної здатності, яка дорівнює долі метра.

У той же час при розробці сучасних авіаційних РСА висуваються вимоги мати дальність дії декілька десятків кілометрів.

## 2 Аналіз досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної задачі

Вирішення цієї проблеми викладене в [1–12]. Суть вирішення проблеми полягає в тому, що шляхом додаткових алгоритмів обробки відбитого сигналу штучно формується квазіплоский фронт хвилі зондувального сигналу. Це здійснюється шляхом розділення за допомогою цифрових фільтрів відбитого сигналу від кільцевих секторів кожного каналу похилої дальності на сигнали відбиті від кільцевих підсекторів цих секторів, виміру розділених сигналів, їх запам'ятовування і компонування для

штучного формування квазіплоского фронту хвилі зондувального сигналу.

В той же час вимоги до параметрів цифрових фільтрів, що фізично можуть бути реалізовані для розділення відбитого сигналу не визначені.

Метою даної статті є вибір та оцінка параметрів фільтрів для формування плоского фронту хвилі в РСА надвисокого розривлення.

Виклад матеріалу дослідження. При обробці траєкторних сигналів в процесі синтезування апертури за допомогою узгодженого фільтру здійснюється когерентне підсумовування відбитих сигналів від кожного елементу розривлення на інтервалі синтезування в кожному каналі похилої дальності.

Тому, якщо здійснюється попереднє розділення відбитого сигналу на складові, які мають різні за величиною, обмежені кутові спектри, що не перекриваються, то розділяючі фільтри повинні мати строго лінійну фазову характеристику. Тобто в процесі фільтрації фази складових вимірюваного сигналу не повинні мінятися (спотворюватися). Саме це визначає тип цифрового фільтру, а саме, необхідно використати цифрові фільтри з імпульсними характеристиками кінцевої довжини (КІХ-фільтри), які дозволяють зробити фільтр з лінійною фазовою характеристикою.

Порядок розрахунку цифрових фільтрів, що реалізуються програмним шляхом на ЕОМ або у вигляді спеціалізованого пристрою, включає чотири основні етапи [2]:

1. Рішення задачі апроксимації з метою визначення коефіцієнтів фільтру, при яких фільтр задовольняє заданим вимогам.

2. Вибір конкретної схеми побудови фільтру і квантування знайдених значень його коефіцієнтів.

3. Квантування змінних величин фільтру, тобто вибір вхідних, вихідних і проміжних змінних.

4. Перевірку моделюванням, чи задовольняє отриманий фільтр заданим вимогам.

У теорії цифрової фільтрації широко відомі три класи методів розрахунку КІХ-фільтрів з лінійною фазою — методи зважування за допомогою вікна, методи частотної вибірки і методи розрахунку оптимальних (по Чебишеву) фільтрів.

Вибір методу розрахунку обумовлюється рядом чинників (критеріїв, вимог, міркувань). Основною вимогою до фільтрів для формування плоского фронту хвилі в РСА є вимога мінімального розміру перехідної смуги

$$\Delta F = F_p - F_s, \quad (1)$$

де  $F_p$  — частота зрізу;  $F_s$  — частота режекції.

Суть полягає в тому, що з логіки штучного формування плоского фронту хвилі зондувального сигналу, частот режекції  $F_{s+}$  і  $F_{s-}$ , фізично реалізуємих вибіркового фільтрів повинні відповідати максимальною і мінімальною просторовим частотам розділяючих фільтрів з ідеальною П-образною

характеристикою. При цьому ширина перехідної смуги обумовлює величину втрат в розрізнявальній здатності (зменшення довжини інтервалу синтезування, величина якої визначається фільтром).

Аналіз відомих результатів розрахунку цифрових фільтрів [2, 7, 8] дозволяє визначити досить високу, але реальні вимоги до перехідної смуги фільтрів

$$\Delta F \leq (0,05 - 0,1) \cdot \Delta f, \quad (2)$$

де  $\Delta f$  — ширина смуги пропускання ідеального фільтру, тобто фільтру у якого  $F_p = F_s$ .

Інакше кажучи, такий вибір перехідної смуги розширює діаграму спрямованості (ДС) синтезованої апертури не більше ніж на (10÷20) %.

З усіх відомих методів розрахунку і побудови цифрових фільтрів з лінійною фазовою характеристикою аналітичне рішення існує для окремого випадку чебишевського рішення для методу проектування оптимальних фільтрів з мінімаксною помилкою [2, 4–6, 8, 10]. При цьому ширина перехідної смуги фільтру у разі чебишевського рішення зазвичай значно менше, ніж для інших оптимальних фільтрів з такими значеннями кількості відліків імпульсної характеристики  $N$ , амплітудами пульсацій в смугі пропускання  $\delta_1$  і непропускання  $\delta_2$ .

У разі чебишевської апроксимації амплітудної характеристики фільтру вона апроксимується поліномом Чебишева  $M$ -го ступеня  $T_M(x)$ , який визначається наступним чином:  $T_M(x) = \cos(M \cdot \arccos x)$ ,

$$T_M(x) = \operatorname{ch}(M \cdot \operatorname{arch} x), \quad |x| > 1. \quad (3)$$

Співвідношення (3) еквівалентно поліному виду

$$T_M(x) = \sum_{n=0}^M b(n)x^n. \quad (4)$$

Оскільки поліноми Чебишева задані в області  $x$ , то для відображення їх в область  $\omega$  необхідно виконати перетворення виду

$$x = \frac{X_0 + 1}{2} \cos(\omega) + \frac{X_0 - 1}{2}, \quad (5)$$

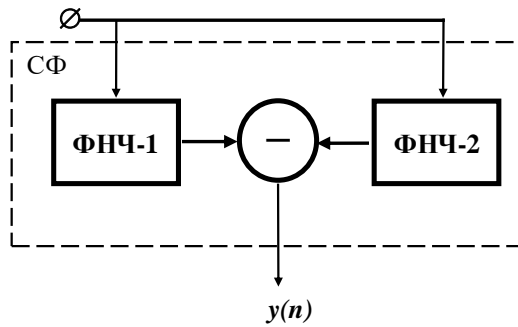
яке забезпечує відображення інтервалу  $-1 \leq x \leq X_0$  у інтервал  $0 \leq \omega \leq \pi$  і перетворення звичайного полінома по  $\omega$  в тригонометричний поліном по  $\omega$ .

Імпульсна характеристика  $h(n)$  цифрового фільтру визначається через його частотну характеристику за допомогою зворотного дискретного перетворення Фур'є (ЗДПФ) його частотної характеристики  $H(e^{j\omega})$

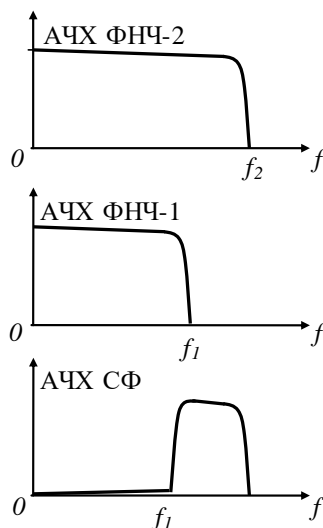
$$h(n) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} H(e^{j\omega}) \cdot e^{j\omega n} d\omega. \quad (6)$$

По апроксимації заданій частотній характеристиці цифрового фільтру  $T_M(\omega)$  визначаються коефіцієнти фільтрації із співвідношення (6).

У теорії оптимальних фільтрів відома сукупність наближених розрахункових співвідношень, яка зв'язує параметри проєктованих фільтрів (2). За допомогою цих співвідношень можна вибирати будь-які чотири з п'яти параметрів  $N$ ,  $F_p$ ,  $F_s$ ,  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ , а потім визначити п'ятий параметр. Для оцінки невизначених параметрів смугових фільтрів використовуємо побудову смугових фільтрів (СФ) на основі двох фільтрів нижніх частот (ФНЧ) та віднімаючого пристрою (рис. 1).



(a)



(b)

Рис. 1. Структурна схема побудови смугового фільтра

Тобто смуговий фільтр для сигналу, спектр якого лежить в діапазоні частот від  $f_1$  до  $f_2$  визначається як різниця сигналів ФНЧ з частотами зрізу  $f_1$  та  $f_2$ .

Такий підхід до побудови набору смугових фільтрів, що стикаються, не вимагає використання відомого перетворення смуги частот, при якому об'єм обчислень, збільшується в два рази [2].

При чебишевській апроксимації частотної характеристики ФНЧ величина пульсації  $\delta_2$ , в смузі непропускання (режекції) повинна знаходитися на рівні, який забезпечує послаблення енергії пригнічуваного сигналу, що просочується в смугу пропускання, до рівня 0,5 кроку квантування вимірюваного

сигналу. Тобто величина пульсації має бути не більше  $(-40 \div -60)$  дБ.

При побудові СФ за допомогою двох ФНЧ, побудованих на основі апроксимації їх частотних характеристик поліномом Чебишева, величина пульсації  $\delta_2$  має бути такого ж порядку, як і  $\delta_1$ , наприклад,  $\delta_2 = -50$  дБ, а  $\delta_1 = -40$  дБ. Або  $\delta_1$  повинно змінюватися від фільтру до фільтру так, щоб в смузі пропускання, створюваних СФ, нормовані значення амплітудно-частотної характеристики фільтрів практично співпадали.

Для формування плоского фронту хвилі в РСА надвисокого розрізнення [1, 4] нормовану оцінку ширини перехідної смуги  $\Delta F$  фільтрів визначимо наступним чином:

$$\Delta F_1 = (F_p - F_s) = (0,05 - 0,1)F_p = \frac{0,05 - 0,1}{2\pi} \sqrt{R_i \cdot \delta r}, \quad (7)$$

для ФНЧ

$$\Delta F_{ik} = (0,05 - 0,1)\Delta f_{ik} = \frac{0,05 - 0,1}{2\pi} \sqrt{R_i \cdot \delta r} (\sqrt{k} - \sqrt{k-1}), \quad (8)$$

для  $k$ -го ПФ  $i$ -го каналу похилої дальності, де  $R_i$  — відстань до  $i$ -го каналу похилої дальності;  $\Delta f_{ik}$  — ширина смуги пропускання  $k$ -го СФ  $i$ -го каналу похилої дальності;  $k$  — номер частотно виборчого фільтру.

Число фільтрів  $j$  в  $i$ -му каналі похилої дальності дорівнює [1]:

$$N_j = \frac{R_i \theta_o^2}{4\delta r}, \quad (9)$$

де  $\theta_o$  — ширина ДС РСА в горизонтальній площині.

Визначимо кількість відліків фільтрів з КІХ на конкретному прикладі.

Приймемо як початкові дані:

- довжину хвилі зондувального сигналу  $\lambda = 2$  см;
- ширину смуги спостереження  $\Delta R = 5$  км;
- діапазон робочих дальностей  $R_{\min} = 30$  км,  $R_{\max} = 70$  км;
- роздільну здатність по похилій і шляховій дальності  $\delta r = \delta x = 0,5$  м.

Для забезпечення розрізняльної здатності  $\delta x = 0,5$  м необхідна ширина ДС в горизонтальній площині повинна дорівнювати

$$\theta_o = \frac{\lambda}{2\delta} = 0,02. \quad (10)$$

Із співвідношення (9) видно, що при розрізняльній здатності  $\delta r = \delta x = const$  в діапазоні робочих дальностей максимальна кількість фільтрів необхідна на максимальній дальності.

Загальна кількість фільтрів для перегляду ширини смуги спостереження  $\Delta R$  дорівнює

$$N_{\Sigma} = \frac{R_o \theta_o^2}{4\delta r} + \frac{(R_o + \delta r) \theta_o^2}{4\delta r} + \frac{(R_o + 2\delta r) \theta_o^2}{4\delta r} + \dots + \frac{(R_o + \Delta R - \delta r) \theta_o^2}{4\delta r}. \quad (11)$$

Співвідношення (11) є арифметичною прогресією. Їїго сума дорівнює

$$N_{\Sigma} = 0,5 \frac{\Delta R}{\delta r} \cdot \frac{\theta_o^2}{4} \left( \frac{2R_o}{\delta r} + \frac{\Delta R}{\delta r} - 1 \right). \quad (12)$$

Для даного прикладу сумарна кількість фільтрів на мінімальній дальності до смуги спостереження  $N_{\Sigma \min} = 65\,000$  фільтрів, а на максимальній дальності  $N_{\Sigma \max} = 135\,000$  фільтрів.

При проведенні розрахунків використовуються нормовані значення параметрів фільтрів. Нормування по частоті доцільно здійснювати за значенням максимальної частоти в спектрі сигналу, який визначається шириною ДС антени РСА в горизонтальній площині плюс запас на величину перехідної смуги. Тобто

$$F = \frac{1,05 \cdot R\theta_o}{4\pi^2}. \quad (13)$$

Оцінка необхідної кількості відліків фільтру нижніх частот при апроксимації амплітудної характеристики фільтру поліномом Чебишева для вибраних значень величин пульсацій в смузі пропускання

$\delta_1$ , смузі непропускання  $\delta_2$  і значень перехідної смуги  $\Delta F$  дорівнює [2]:

$$\hat{N} = \frac{D_{\infty}(\delta_1, \delta_2)}{\Delta F} - f(\delta_1, \delta_2) \cdot \Delta F + 1. \quad (14)$$

Тут

$$D_{\infty}(\delta_1, \delta_2) = \lg \delta_2 \left[ a_1 (\lg \delta_1)^2 + a_2 \lg \delta_1 + a_3 \right] + a_4 (\lg \delta_1)^2 + a_5 \lg \delta_1 + a_6, \quad (15)$$

де  $a_1 = 5,309 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_2 = 7,114 \cdot 10^{-2}$ ,  $a_3 = -4,761 \cdot 10^{-1}$ ,  $a_4 = -2,66 \cdot 10^{-3}$ ,  $a_5 = -5,941 \cdot 10^{-1}$ ,  $a_6 = -4,278 \cdot 10^{-1}$ .

$$f(\delta_1, \delta_2) = b_1 + b_2 (\lg \delta_1 - \lg \delta_2), \quad (16)$$

де  $b_1 = 11,01217$ ;  $b_2 = 0,51244$ .

Підставляючи у формулу (14) обрані значення  $\delta_1$ ,  $\delta_2$  та  $\Delta F$  отримаємо оцінку необхідної кількості відліків ФНЧ з лінійною фазовою характеристикою. Необхідна кількість відліків смугових фільтрів, отриманих як різниця сигналів двох ФНЧ, визначається необхідною кількістю відліків для одного з них.

Результати оцінки кількості відліків КІХ-фільтрів при 5% і 7,5% погіршенні розрізнення по шляховій дальності для обраного прикладу наведені в табл. 1.

Табл. 1 Оцінка кількості відліків КІХ-фільтрів в каналах і смузі спостереження

$\delta(R), \text{м(км)}$	$\frac{\Delta F_{ik}}{\Delta f_{ik}}$	$\frac{\delta_1}{\delta_2}$	$R0, \text{км}$	$\frac{N_j/R_0}{N_j/(R_0+\Delta R)}$	$\frac{\sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{k/R_0}}{\sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{k/R_0+\Delta R}}$	$\frac{\Delta R}{\delta r} \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{ik}$
0.5(5)	5%	$\frac{0,01}{0,01}$	30	6/7	616/841	$7,285 \cdot 10^6$
			65	13/14	2921/3389	$31,55 \cdot 10^6$
	7.5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	6/7	411/562	$4,865 \cdot 10^6$
			65	13/14	1951/2263	$21,07 \cdot 10^6$
	5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	6/7	397/541	$4,69 \cdot 10^6$
			65	13/14	1878/2179	$20,285 \cdot 10^6$
	7.5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	6/7	265/362	$3,135 \cdot 10^6$
			65	13/14	1255/1456	$13,555 \cdot 10^6$

Табл. 2 Оцінка кількості відліків імпульсної характеристики фільтрів

$\delta(R), \text{м(км)}$	$\frac{\Delta F_{ik}}{\Delta f_{ik}}$	$\frac{\delta_1}{\delta_2}$	$R0, \text{км}$	№№ фільтрів													
				1	2	3	4	5	6	7	...	11	12	13	14		
0.5(5)	5%	$\frac{0,01}{0,01}$	30	32	78	101	120	136	150	...	...	316	331	345	358		
			70	49	118	154	182	207	229	249	...	...	211	221	230	239	
	7.5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	21	52	67	80	91	100	...	...	203	213	222	230		
			70	33	79	103	122	138	153	166	...	...	136	142	148	154	
	5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	21	50	65	77	87	97	...	...	...	...	...	...		
			70	32	76	99	117	133	147	160	...	...	...	...	...		
	7.5%	$\frac{0,1}{0,01}$	30	14	33	44	52	58	65	...	...	...	...	...	...		
			70	21	51	66	78	89	98	107	...	...	...	...	...		

$R0$  — дальність до смуги огляду;

$N_{j/R0}$  — кількість фільтрів 1-го каналу при похилій дальності до смуги огляду, яка дорівнює  $R0$ ;  
 $N_{j/(R0+\Delta R)}$  — кількість фільтрів в останньому каналі смуги огляду при похилій дальності до каналу  $R0 + \Delta R - \delta r$ ;

$\sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{k/R0}$  — оцінка суми відліків імпульсних ха-

рактеристик вибірових фільтрів 1-го каналу похилої дальності смуги огляду;

$\sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{k/(R0+\Delta R)}$  — оцінка кількості відліків ім-

пульсних характеристик вибірових фільтрів для останнього каналу похилої дальності в смугі огляду  $\Delta R$ ;

$\frac{\Delta R}{\delta r} \sum_{i=1}^{N_j} \sum_{k=1}^{N_j} \hat{N}_{ik}$  — оцінка сумарної кількості відлі-

ків імпульсних характеристик усіх фільтрів в смугі огляду.

## Висновки

Для формування квазіплоского фронту хвилі в РСА надвисокого розрізнення в алгоритмах обробки необхідно використовувати цифрові фільтри з імпульсними характеристиками кінцевої довжини й лінійною фазовою характеристикою.

Для врахування втрат у розрізнявальній здатності, які викликані не ідеальністю виборчих характеристик фільтрів формування плоского фронту хвилі, потрібно виконувати великий обсяг обчислень. При цьому треба враховувати, що в процесі обробки сигналів РСА надвисокої додадуться втрати квантування та ті, що, пов'язані з формою діаграми спрямованості антени та обумовлені не ідеальним вирівнюванням фронту хвилі.

У подальших дослідженнях необхідно оцінити втрати розрізнявальної здатності по шляховій дальності від перерахованих чинників, уточнити об'єм обчислень і час виконання алгоритмів фільтрації при використанні сучасних ПЕОМ.

## Перелік посилань

1. Патент UA92116 МПК G01S 13/90. Спосіб синтезування апертури РЛС бічного огляду і пристрій для його здійснення / Федотов Б. М., Станкевич С. А., Пономаренко С. О. Власник патенту Державний науково-дослідний інститут авіації; — № а 2009 07223; заявл. 10.07.09; опубл. 27.09.10, Бюл. №18.
2. Рабинер Л. Теория и применение цифровой обработки сигналов / Л. Рабинер, Б. Гулд; пер. с англ. под ред. Ю. Н. Александрова. М. : Мир, 1978. — 848 с.
3. Слюсарчук О.О. Методика розрахунку часу отримання інформації радіолокаційними станціями з синтезуванням апертури // Вісник НТУУ "КПІ". Серія Радіотехніка, Радіоапаратобудування. — 2018. — Вип. 75. — pp 33-39.
4. Федотов Б. Н. Оцінка впливу неточностей компенсації сферичності фронту хвилі в радіолокаційних станціях надвисокого розрізнення / Федотов Б. М. // Збірник наукових праць ДНДІА. — Вип. 13. — 2010. — С. 114-122.
5. Радиолокационные станции с цифровым синтезированием апертуры антенны / В. Н. Антипов, В. Т. Горяинов, А. Н. Кулин и др. ; под ред. В. Т. Горяинова. — М. : Радио и связь, 1988. — 304 с.
6. Патент UA73752 МПК (2012.01) G01S 13/90 (2006.01), G06F 7/00, G06F 15/00. Спосіб цифрової обробки траєкторних сигналів локатора з покадровим синтезом апертури / Федотов Б. М., Слюсарчук О.О ; Національний університет оборони України ; заявл. 02.03.12; опубл. 10.10.12, Бюл. №19.
7. Moutaman Mirghani Daffalla. Adaptive Multifunction Filter for Radar Signal Processing. / Daffalla M.M.// Department of Electrical and Computer Engineering Engineering College — Karary University Khartoum, Sudan. August 2013.
8. Mya Mya Aye. Digital Filters for Radar Signal Processing / Mya Mya Aye, Thiri Thandar Aung// International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET). Volume: 03 Issue: 11 Nov —2016.
9. Thottempudi Pardhu. Design of matched filter for radar applications / Thottempudi Pardhu, A.Kavya Sree, K.Tanuja // Electrical and Electronics Engineering: An International Journal (ELELIJ) Vol 3, No 4, November 2014.
10. Ashwini R. Design of digital FIR filter for radar application/ Ashwini R, Venkataratnam Ponnun // International journal of innovative research in science, engineering and technology. Vol. 6, Issue 9, September 2017.
11. Costa, M.M.S. Basic Requirements for Synthetic Aperture Radar / Costa, M.M.S.Bogossian, O.L., Passaro, A.// 6th Workshop on Space Engineering and Technology, At National Institute for Space Research, São José dos Campos, SP, Brasil. August 2015.
12. Xinhua Mao, Ultra-high resolution (0.05m) SAR image formation processing/ Xinhua Mao, Xueli He, Lan Ding, Danqi Li, He Yan.// 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP). October 2017.

## References

- [1] Fedotov B.M., Stankevych S.A. and Ponomarenko S.O. (2010) *Sposib syntezyuvannia apertury RLS bichnoho ohliadu i prystrii dlia ioho zdiisnennia* [A method of synthesizing an aperture of a side-vision radar and a device for implementing it], Patent UA92116
- [2] Rabiner L. and Gold B. (1975) *Theory and Application of Digital Signal Processing*, Rentice-Hall Inc., 777 p.
- [3] Sliusarchuk O. O. (2018) The Method for Time Calculation of Information Taking in the Aperture Synthesis Radar Station, *Visnyk NTUU KPI Seriya - Radiotekhnika Radioaпаратobuduvannia*, Iss. 75, pp. 33-39. DOI: 10.20535/RADAP.2018.75.33-39.
- [4] Fedotov B. N. (2010) *Otsinka vplyvu netochnosti kompensatsii sferychnosti frontu khvyli v radiolokatsiynykh stantsiakh nadvysokoho rozriznennia* [Estimation of the influence of inaccuracies in compensation of the sphericity of the wave front in ultralight detection radar stations], *Zbirnyk naukovykh prats DNDIA*, Iss. 13, pp. 114-122.

- [5] Antipov V. N., Goryainov V. T., Kulin A. N. (1968) *Radiolokatsionnye stantsii s tsifrovym sintezirovaniem apertury anteny* [Radar with digital synthesizing antenna aperture], Moscow, Radio i svyaz', 304 p.
- [6] Fedotov B.M., Sliusarchuk O.O. (2012) *Sposib tsyfrovoy obrobky traiektornykh sygnaliv lokatora z pokadrovym synteziom apertury* [Method for digital processing of trajectory signals of a locator with frame-by-frame synthesis of aperture], Patent UA73752
- [7] Daffalla M.M. (2013) Adaptive multifunction filter for radar signal processing. *2013 International conference on computing, electrical and electronic engineering (ICCEEE)*. DOI: 10.1109/icceee.2013.6633904
- [8] Mya Mya Aye and Thiri ThandarAung (2016) Digital Filters for Radar Signal Processing / Mya Mya Aye, Thiri Thandar Aung, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol. 03, Is. 11, pp. 724-729.
- [9] Thottempudi P. and N A.R. (2014) Design of Matched Filter for Radar Applications. *Electrical and Electronics Engineering: An International Journal*, Vol. 3, Iss. 4, pp. 1-10. DOI: 10.14810/eelij.2014.3401
- [10] Rautand V. G. and Lokhande A. (2015) Design of Carry Select Adder for FIR Filter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 04, Iss. 03, pp. 1348-1351. DOI: 10.15662/ijareeie.2015.0403026
- [11] Costa M.M.S., Bogossian O.L. and Passaro A. (2015) Basic Requirements for Synthetic Aperture Radar, *6th Workshop on Space Engineering and Technology*, 2 p.
- [12] Mao X., He X., Ding L., Li D. and Yan H. (2017) Ultra-high resolution (0.05m) SAR image formation processing. *2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*. DOI: 10.1109/isap.2017.8228773

## Оценка параметров фильтров для формирования плоского фронта волны в радиолокационной станции с синтезированной апертурой

Слюсарчук А. А.

Задача достижения разрешающей способности в полосовой РЛС с синтезированием апертуры повышенной дальности для распознавания целей является актуальной в настоящее время, несмотря на значительные достижения в этом вопросе. С точки зрения распознавания объектов определенного типа, вида или класса разрешение 0.2÷0.3 метра достаточно для решения этой задачи. Однако проблема получения сверхвысокого разрешения в полосовой РЛС с синтезированием апертуры повышенной дальности действия требует решения ряда вопросов, в частности оценки параметров фильтров для формирования плоского фронта волны в радиолокационных станциях с синтезированной апертурой. Для формирования квазиплоского фронта волны в полосовой РЛС с синтезированием апертуры повышенной дальности в алгоритмах обработки необходимо использовать цифровые фильтры с импульсными характеристиками конечной длины и линейной фазовой характеристикой. С точки зрения получения минимальных потерь в разрешающей способности РСА по путевой дальности в процессе искусственного формирования плоского фронта

волны зондирующего сигнала целесообразно использовать чебышевскую аппроксимацию АЧХ оптимальных фильтров с минимаксной ошибкой. Ширина переходной полосы таких фильтров значительно меньше, чем в других оптимальных фильтрах с такими же значениями количества отсчетов импульсных характеристик, амплитудами пульсаций в полосе пропускания и режекции.

**Ключевые слова:** радиолокация; синтезированная апертура; сверхвысокое разрешение; формирование плоского фронта волны; параметры фильтров; путевая дальность; полоса наблюдения; полоса пропускания; полоса непропускания

## Parameter Evaluation of Filters for Formation the Plane Wave Front in Radiolocation Stations with Synthesized Aperture

Sliusarchuk O. O.

The task of achieving the resolution in the bandwidth radar with the increased range synthesis aperture for the purpose of recognizing the targets is relevant at the present time, despite significant achievements in this topic. From the point of view of the recognition of objects to a certain type or class of distinction 0.2÷0.3 meters is sufficient to solve this problem. However, the problem of obtaining ultra-distinction in a bandwidth radar station with the increased range synthesis aperture requires solving a number of issues, in particular the evaluation of filter parameters for the formation of a flat wave front in a radars with synthetic aperture. One of the solutions of this problem is the inclusion of additional algorithms for the reflected signal processing, which artificially forms a quasi-flat front of the sounding signal wave. In the current article, the question of the selection and evaluation of filter parameters for the formation of a flat wave front in a radar station with ultra-high resolution is being solved. In order to achieve this goal, the article proposes: - a step-by-step procedure for digital filters calculating; - estimation of the number of samples of digital filters with impulse characteristics of finite length in the channels and the observation band; - estimation of the number of samples of impulse characteristics of filters. For the formation of a quasi-flat wave front in a radar station with the increased range synthesis aperture it is necessary to use digital filters with impulse characteristics of finite length and linear phase characteristics in processing algorithms. From the point of view of obtaining minimal losses in the resolution of radar stations with a synthesized aperture along the traveling distance in the process of artificial formation of the flat front of the sounding signal wave, it is expedient to use Chebyshev approximation of the amplitude-frequency characteristic of optimal filters with a minimax error. The width of the transition band of such filters is much smaller than that of other optimal filters with the same values of the countdowns

**Key words:** radiolocation; synthesized aperture; ultra-high resolution; formation of a plane wave front; filter parameters; range; track band; bandwidth; non-bandwidth band