

DOI: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-59-37>

УДК 621.396.96

Якимчук Наталія Миколаївна, к.т.н., доцент

<https://orcid.org/0000-0002-8173-449X>

Ткачук Валентина Вікторівна, начальник науково-дослідної частини

<https://orcid.org/0000-0003-3296-3111>

Редька Олексій Ярославович, студент

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

МОДЕЛЬ АДАПТИВНОГО ЧАСТОТНОГО ПЛАНУВАННЯ В ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ FMCW-РАДАРНИХ МЕРЕЖАХ З УРАХУВАННЯМ КОНФЛІКТНОСТІ КАНАЛІВ

Якимчук Н. М., Ткачук В. В., Редька О. Я. Модель адаптивного частотного планування в децентралізованих FMCW-радарних мережах з урахуванням конфліктності каналів. У статті розглянуто задачу беззавадного частотного планування в багатокористувацьких FMCW-радарних мережах з урахуванням взаємних перешкод між сигналами. Запропоновано аналітичні умови для уникнення перекриття чіп-сигналів у частотно-часовому просторі та сформульовано оптимізаційну задачу мінімізації зайнятого спектру з урахуванням обмежень на допустимі частоти та часові слоти передачі. Основну увагу приділено моделюванню частотного нахилу як ключового параметра, що визначає рівень взаємних інтерференцій. Вперше запропоновано підхід із використанням вагової функції пріоритетності частот, що дозволяє адаптувати розподіл спектру під поточні умови навантаження, типи сигналів або зовнішні обмеження. Розроблена модель цільової функції з багатокритеріальною оптимізацією, яка одночасно враховує бажаність частоти, ступінь конфлікту та точність розташування в спектрі. Обґрунтовано доцільність застосування спектрального моніторингу та локальних рішень для децентралізованих систем. Цей підхід відкриває шлях до побудови більш інтелектуальних і самоналаштовуваних FMCW-систем, здатних адаптуватися до змін у середовищі без потреби в централізованому координуванні. Отримані результати можуть бути використані для побудови адаптивних алгоритмів планування в автономних транспортних системах, інтелектуальних сенсорних мережах та когнітивних радіосистемах нового покоління.

Ключові слова: FMCW-радар, частотне планування, інтерференція, спектральний моніторинг, адаптивний алгоритм.

Yakymchuk N., Tkachuk V., Redka O. Adaptive Frequency Planning Model in Decentralized FMCW Radar Networks with Channel Conflict Awareness. The article addresses the problem of interference-free frequency planning in multi-user FMCW radars, taking into account mutual interference between signals. Analytical conditions are proposed to prevent the overlapping of chirp signals in the time-frequency domain, and an optimization problem is formulated to minimize the occupied spectrum under constraints on allowable frequencies and transmission time slots. Particular attention is given to modeling the chirp frequency slope as a key parameter that determines the level of mutual interference. For the first time, a priority-weighted frequency function approach is proposed, allowing adaptive spectrum allocation based on current traffic conditions, signal types, or external constraints. A multi-objective optimization model for the cost function is developed, simultaneously considering frequency preference, conflict level, and spectral accuracy. The study justifies the use of spectral monitoring and local decision-making for decentralized systems. This approach paves the way for the development of more intelligent and self-configuring FMCW systems capable of adapting to environmental changes without centralized coordination. The obtained results can be applied to develop adaptive planning algorithms in autonomous transport systems, intelligent sensor networks, and next-generation cognitive radio systems.

Keywords: FMCW radar, frequency planning, interference, spectral monitoring, adaptive.

Постановка наукової проблеми. Зі зростанням популярності FMCW-радарів у транспортній галузі, системах безпеки, робототехніці та промисловій автоматизації, актуалізується проблема їх взаємного впливу в умовах високої щільності розміщення пристроїв. У середовищах, де одночасно функціонує багато радарних систем, частотне перекриття та завади між сигналами різних пристроїв стають основним джерелом похибок у вимірюваннях, зниження точності, а іноді й повної втрати функціональності. Оскільки доступні радіочастотні ресурси обмежені, особливо в діапазонах, дозволених для безліцензійного використання, постає завдання оптимізації використання спектра. Частотне планування забезпечує ефективний розподіл цього ресурсу між численними пристроями без шкоди для точності вимірювань.

Розробка ефективних методів частотного планування дає змогу вирішити одразу кілька критичних проблем. Передусім, це мінімізація взаємної інтерференції між радарними сигналами шляхом уникнення накладання переданих і прийнятих сигналів у частотно-часовому просторі. Таке планування дозволяє зберегти стабільність роботи навіть за умов динамічного змінення кількості активних пристроїв, що особливо актуально для автономного транспорту та мобільних сенсорних систем.

Крім того, ускладнення структури мультисенсорних систем, які поєднують радар, лідар і відеоаналітику, вимагає від радарів підвищеної надійності та передбачуваності. Це можливо лише

за умови стабільної роботи без впливу зовнішніх радарних сигналів. Частотне планування також сприяє зменшенню обчислювального навантаження на системи цифрової обробки сигналів, що позитивно впливає на енергоефективність та час реакції пристроїв.

Таким чином, дослідження у сфері частотного планування в FMCW-радарних системах є надзвичайно актуальним з огляду на технічні виклики, що виникають унаслідок масштабування радарних мереж, зростання вимог до точності та зменшення спектральних ресурсів. Розв'язання цього завдання є ключовим для надійної та безпечної роботи радарних технологій нового покоління.

Аналіз досліджень. Сучасні радіолокаційні системи з частотно-модульованим безперервним сигналом (FMCW) відіграють ключову роль у широкому спектрі застосувань – від автомобільної безпеки до автономної навігації, промислової автоматизації та безконтактного моніторингу. Висока точність визначення відстані та швидкості об'єктів, компактність реалізації та енергоефективність роблять FMCW-технологію особливо привабливою для впровадження у високодинамічні середовища. Однак зі зростанням кількості таких систем, зокрема в умовах щільного розміщення – наприклад, в автопарках, на перехрестях чи в промислових кластерах – зростає ризик взаємного впливу радарів один на одного.

Технологія FMCW-радарів (Frequency-Modulated Continuous Wave) є однією з ключових у сучасних сенсорних системах, що застосовуються в автомобільній промисловості, робототехніці, безпілотних платформах та індустрії 4.0. Класичні аспекти функціонування таких радарів, включно з генерацією чіп-сигналів, принципом гетеродинного прийому та обробкою відбитого сигналу, докладно описані у фундаментальних працях [1] та [2]. У цих джерелах визначено базові характеристики FMCW-систем і технічні переваги використання міліметрового діапазону (особливо 76–81 ГГц) у компактних сенсорах високої точності.

Однією з критичних проблем, що описані в актуальних дослідженнях, є забезпечення ефективного частотного планування. Обмеженість доступного спектра, а також необхідність запобігання інтерференції між окремими радарами ставлять нові виклики перед розробниками апаратного забезпечення й алгоритмів керування сигналами. У роботі [3] запропоновано методи мінімізації завад шляхом зміщення частот переданих сигналів, а також проаналізовано ефективність частотного рознесення у типових сценаріях міського середовища. Додатково, у роботі [4] наведено огляд методів цифрової обробки сигналів, які можуть частково компенсувати вплив інтерференції. Нарешті, в [5] представлено схему координованої передачі FMCW-сигналів на основі часово-частотного планування для автотранспортних систем, що дозволяє уникати колізій без централізованого керування. У загальному оглядовому дослідженні [6] підсумовуються актуальні аспекти техніки обробки сигналів автомобільних радарів, включаючи дизайн сигналу, алгоритми оцінки та компроміс між складністю та роздільною здатністю реалізації для складних середовищ, а також унікальні проблеми, пов'язані з автомобільними радарами, наприклад виявлення пішоходів. Проте автори підкреслюють, що пріоритет має запобігання завадам ще на етапі планування сигналу, що підтверджує доцільність дослідження частотного розподілу як базової стратегії.

Суміжні напрями також включають застосування адаптивного управління і роботи нейромереж у багаторадарних системах. У дослідженні [7] розроблено адаптивний алгоритм частотного планування, який реагує на зміну щільності розміщення радарів, забезпечуючи ефективний розподіл спектра за умов обмеженого ресурсу. Особливої уваги заслуговує робота [8], де застосовано алгоритми глибокого навчання з підкріпленням для динамічного керування частотами в умовах високої мобільності. Огляд [9] демонструє потенціал машинного навчання у задачах динамічного розподілу частот, зокрема для адаптації до змін навколишнього середовища без потреби в попередньому моделюванні. Цей підхід демонструє потенціал інтеграції штучного інтелекту в системи частотного керування FMCW-радарами.

Таким чином, сучасна наукова думка визнає частотне планування як ключовий елемент забезпечення надійної, масштабованої та безперешкодної роботи FMCW-радарів. Попри існування низки ефективних рішень, актуальним залишається пошук нових стратегій, здатних працювати в умовах невизначеності, без централізованої синхронізації, та з мінімальним енергоспоживанням. У неконтрольованих або динамічних середовищах, де відсутня централізована координація між пристроями, особливу актуальність набувають адаптивні стратегії частотного планування та розподілу спектра.

Метою дослідження є розробка підходу до частотного планування в FMCW-радарних системах, який дозволяє зменшити рівень взаємної інтерференції між радарами, забезпечити ефективне використання обмеженого частотного ресурсу та зберегти стабільність роботи систем у

динамічному багатокористувацькому середовищі. Запропонований підхід орієнтовано на автономне функціонування радарних пристроїв без потреби в централізованій координації, що робить його перспективним для застосування в транспортних, побутових і промислових умовах.

Виклад основного матеріалу й обґрунтування отриманих результатів дослідження.

У типовій FMCW-радарній системі передавальний сигнал являє собою чірп, тобто сигнал з лінійною частотною модуляцією. Його миттєва частота описується як [1]:

$$f_{Tx}(t) = f_c + \mu t, 0 \leq t \leq T_c \quad (1)$$

де f_c – початкова (центральна) частота чірпу;
 $\mu = B/T_c$ – крутизна чірпу (швидкість зміни частоти);
 B – ширина смуги частот чірпу;
 T_c – тривалість одного чірпу.

У системах FMCW-радарів відстань до об'єкта визначається шляхом порівняння переданого й прийнятого сигналів, частотна різниця між якими прямо залежить від часу затримки – тобто віддаленості об'єкта. Радар формує лінійно зростаючий або спадний чірп-сигнал, що відбивається від цілі та надходить назад до приймача. Цей сигнал змішується з власним переданим чірпом, внаслідок чого утворюється сигнал проміжної частоти ПЧ, який несе інформацію про дальність та швидкість об'єкта.

Однак у реальних умовах навколишнього середовища часто одночасно працює кілька радарів, і в таких випадках виникає явище міжрадарної інтерференції. Проблема, зображена на рисунку 1, ілюструє критичний випадок інтерференції між двома FMCW-радарми, коли сигнали агресора та жертви мають однаковий нахил чірпів та перекриваються в часі. У такій ситуації приймач жертви сприймає інтерференційний сигнал від агресора як відбитий сигнал від реальної цілі. Після змішування з власним переданим сигналом, цей сторонній сигнал утворює стабільну синусоїду на виході аналого-цифрового перетворювача, яку система обробки інтерпретує як наявність об'єкта. В результаті виникає так званий «фантомний» об'єкт, або «ghost target», який не має фізичного джерела у просторі, однак повністю імітує справжню ціль за характеристиками. Це призводить до хибних рішень у навігації, керуванні чи виявленні, що особливо небезпечно в умовах високої щільності трафіку, наприклад, у системах допомоги водієві або автоматизованого керування. Подібна ситуація підкреслює важливість надійного частотного планування та координації параметрів чірп-сигналів для уникнення конфліктів між радарми, що працюють у спільному середовищі.

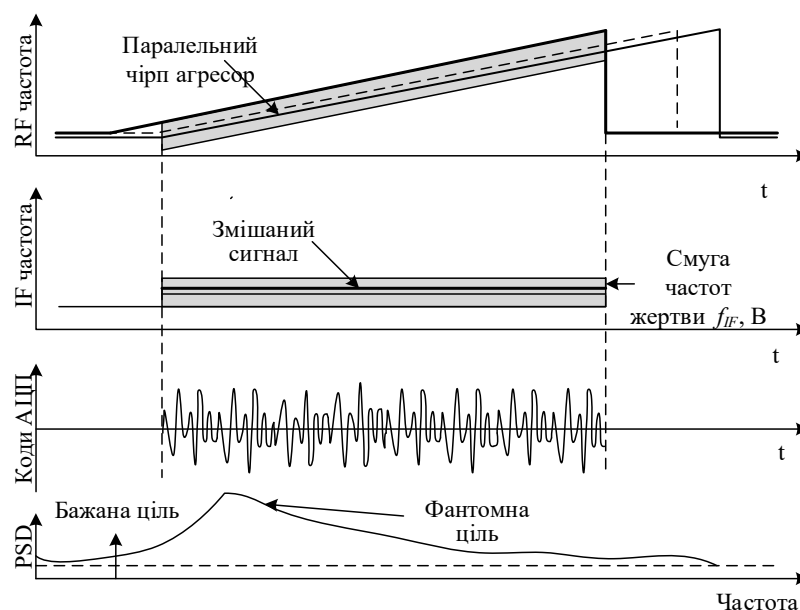


Рис. 1 – Інтерференція між двома FMCW-радарми, при накладанні сигналів з паралельними чірпами

Для N незалежних радарів, які функціонують у спільному середовищі, виникає необхідність координувати частотні параметри кожного з них, щоб уникнути перекриття їх сигналів у частотно-часовому просторі.

Нехай для кожного радара i задається власна пара параметрів (f_{c_i}, t_{0_i}) , де f_{c_i} – початкова частота чірпу радара i , t_{0_i} – момент початку передавання чірпу.

Умова беззавадного частотного планування між будь-якими двома радарями i та j формулюється як [1, 6]:

$$|f_{c_i} - f_{c_j}| + |\mu(t_{0_i} - t_{0_j})| \geq B, \forall i \neq j. \quad (2)$$

Ця умова гарантує, що передані чірпи не накладатимуться один на одного у просторі частота-час.

Загальна задача оптимального частотного планування може бути сформульована як задача мінімізації загальної ширини зайнятого спектру:

$$\min_{f_{c_1}, \dots, f_{c_N}, t_{0_1}, \dots, t_{0_N}} \left(\max_i f_{c_i} + \mu T_c - \min_i f_{c_i} \right), \quad (3)$$

за умови виконання наведеного вище критерію розділення для всіх пар i, j .

Задача ускладнюється, якщо частотний діапазон обмежений, наприклад:

$$f_{\min} \leq f_{c_i} \leq f_{\max} - \mu T_c \quad (4)$$

де $f_{\min}$ і $f_{\max}$ – межі допустимого спектру.

Чірп-сигнал у FMCW-радарях має лінійно змінну частоту, і його нахил (градієнт частоти) впливає на взаємні перешкоди між сигналами від різних користувачів. Градієнт частоти чірпа оцінюється за формулою:

$$k = \frac{\Delta f}{T_k} \quad (5)$$

де Δf – зміна частоти чірпа на проміжку часу T_k .

Взаємні перешкоди в багатокористувацькому FMCW-радарі виникають через накладання сигналів із різними нахилами, зокрема чим крутіший нахил (або вищий градієнт частоти k), тим менше часове перекривання між сигналами різних користувачів, а отже і зменшуються взаємні інтерференції сигналів.

Якщо два користувачі використовують чірп-сигнали з різними нахилами k_1 і k_2 , їхні спектри можуть частково перекриватися, створюючи інтерференцію. Частотна різниця між двома сигналами в момент часу t визначається як:

$$\Delta f_{12}(t) = |(k_1 - k_2)t| \quad (6)$$

Чим менше значення $|k_1 - k_2|$, тим більший час перекривання між сигналами по частоті, що підвищує рівень взаємних перешкод. При дуже малих градієнтах частоти k сигнали користувачів можуть накладатися в частотній області, що призводить до збільшення взаємних перешкод.

Рівень взаємних перешкод визначається виразом:

$$I = \int |S_1(f)S_2(f)|df \quad (7)$$

де $S_1(f)$ та $S_2(f)$ – спектри сигналів різних користувачів.

Отже, оптимальний нахил чірпа вибирається так, щоб мінімізувати перекривання сигналів в частотному домені між різними користувачами. Щоб мінімізувати взаємні перешкоди, можна

використовувати ортогональні нахили чірп-сигналів, при чому сигнали різних радарів мають нахили, які мінімально корелюють між собою. Для сигналів із різними нахилами це досягається, коли:

$$|k_1 - k_2| \gg \frac{B}{T_c} = \mu \quad (8)$$

Тобто різниця нахилів повинна бути достатньо великою, щоб зменшити перекриття частотних діапазонів. Крім того, слід уникати великого рознесення частотних градієнтів, щоб уникнути великої різниці в часових затримках і можливого розходження сигналів у приймальному.

Навіть якщо два користувачі мають однакові або близькі нахили, але їхні сигнали не передаються одночасно, вони не створюють взаємних перешкод [3]. Кожен користувач має часовий слот $T_i \subseteq [0, T_{frame}]$ і перешкоди виникають лише при перетині часових вікон, тобто $T_i \cap T_j \neq \emptyset \Rightarrow$ перевіряємо $|k_i - k_j| \geq \Delta k_{min}$.

Якщо часові вікна ортогональні (не перетинаються), допустимий навіть ідентичний нахил. Тоді, оптимальний нахил k_{opt} можна оцінити як [3]:

$$k_{opt} = \Delta f_{max}/T, \text{ при } I \rightarrow \min, T_i \cap T_j = \emptyset, \quad (9)$$

де Δf_{max} – максимальна допустима різниця частот між користувачами.

На графіку зображено розподіл ортогональних нахилів чірп-сигналів між кількома радарями (користувачами). Кожному користувачу присвоєно унікальний нахил з урахуванням мінімального розриву $\Delta k = 0,3 \times 10^{12}$ Гц/с, що забезпечує взаємну ортогональність сигналів. Такий підхід демонструє концепцію ієрархічного квантування нахилів, де користувачі займають неконфліктні частотні канали у просторі нахилів.

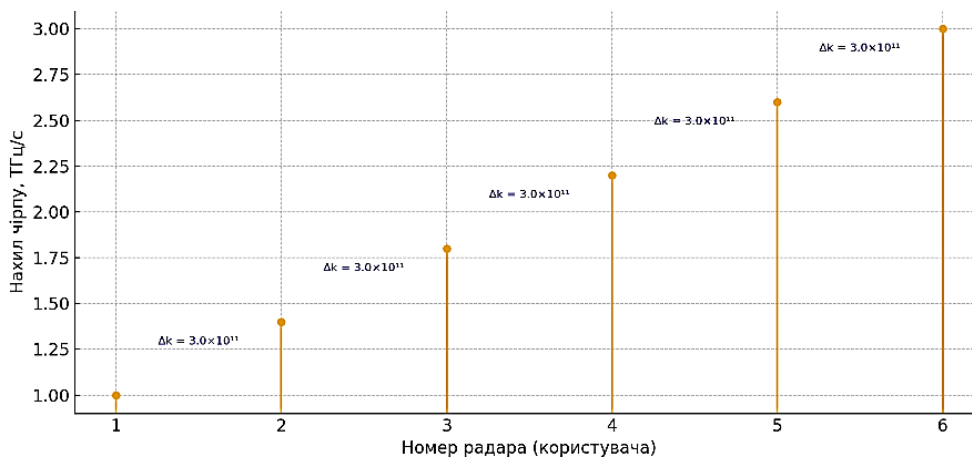


Рис. 2 – Розподіл ортогональних нахилів між радарями

У багатокористувацьких FMCW-радарях, особливо в мобільних системах (автомобілі, дрони, БПЛА) або в інфраструктурах з динамічно змінним навантаженням (смарт-міста, кооперативні мережі), набір активних радарів постійно змінюється. Узгодження ортогональних нахилів потребує централізованого або узгодженого розподілу частотних нахилів k_i , знання конфігурації всіх активних радарів, високої точності синхронізації у часі та частоті. У реальному часі це майже недосяжно без складного обміну службовими повідомленнями, що створює затримки, навантаження на канал зв'язку, і ризики конфлікту при одночасному доступі до спектру.

Для роботи у децентралізованому середовищі, кращу ефективність прийняття локальних рішень можна отримати за допомогою спектрального моніторингу [2]. Типовий алгоритм роботи наступний: новий користувач ініціює передачу з нахилом k_n . Система перевіряє, чи знаходиться він на відстані Δk_{min} від усіх існуючих. Якщо є конфлікт (нахил занадто близький до хоча б одного k_i),

тоді система або центр координації виконує пошук найближчого вільного нахилу k_v , який задовольняє нерівність $\forall i: |k_v - k_i| \geq \Delta k_{min}$.

Новому користувачу призначається k_v . Якщо вільних нахилів немає – система може запропонувати дзеркальний чіп (спектральне віддзеркалення, тобто зміна знаку нахилу з $+k$ на $-k$), що також забезпечує ортогональність.

В реальних застосуваннях використання рівномірного розподілу коефіцієнтів обмежує ефективність використання частотного ресурсу. Деякі частоти можуть бути більш важливими для певних користувачів через технічні обмеження або переваги, зокрема схильність до перешкод. У випадку, коли є кілька можливих частот для вибору, пріоритет може бути відданий тим частотам, де менше перешкод від інших користувачів або де частотні ресурси розподілені більш рівномірно. Деякі частоти можуть вимагати менших енергетичних витрат для досягнення необхідної потужності сигналу. У цьому випадку система повинна надавати пріоритет вибору таких частот для максимального збереження енергії. Слід додатково враховувати, що у великих телекомунікаційних системах може бути обмеження на використання деяких частотних ділянок, наприклад, через ліцензування або зовнішні обмеження.

Розширимо попередню модель введенням ваг для пріоритетних частот, щоб при виборі k_v ураховувався не лише відступ від інших користувачів, а й бажаність певних нахилів через функцію ваг $\omega(k)$.

Тобто, для кожного можливого k у спектрі обчислюємо не лише відстань до вже зайнятих частот, а й «вагу» цього вибору в залежності від пріоритетності ділянки частот:

$$J(k) = \alpha |k - k_v| - \beta \cdot \omega(k), \quad (10)$$

де α – коефіцієнт, що визначає важливість мінімізації відстані до бажаного значення k_v ,

β – коефіцієнт, що визначає важливість ваги для вибору частоти,

$\omega(k)$ – функція ваги для частоти k , що може бути задана у вигляді гаусової функції для пріоритетних частот, дійсною оцінкою якості частоти, наприклад, залежно від впливу перешкод або ефективності радіопередачі на різних частотах.

Розглянемо сценарії, оптимального використання ваги для частот.

1) У системах, де деякі частоти використовуються для передачі критичної інформації, наприклад, для безпеки або контролю, для таких частот може бути введена більша вага $\omega(k)$. Наприклад:

$$\omega(k) = \exp\left(-\frac{(k - k_k)^2}{2\sigma^2}\right). \quad (11)$$

Тут k_k – це критична частота, на якій здійснюється передача важливих даних, а σ – ширина пріоритетної зони. Це означає, що частоти, близькі до k_k , будуть мати вищу пріоритетність.

2) Якщо система використовує різні частоти для різних типів сигналів (наприклад, для передачі даних або для зв'язку в умовах низького сигналу), для кожної з цих частот може бути введена специфічна вага в залежності від її ефективності. Наприклад:

$$\omega(k) = \begin{cases} 1, & \text{для частот, де ефективність висока,} \\ 0.5, & \text{для частот, де ефективність низька.} \end{cases} \quad (12)$$

3) Якщо система вже інтенсивно використовує певні частоти, але деякі ділянки спектра менш навантажені іншими користувачами, для таких частот можна ввести вищу вагу. Це дозволить системі вибрати ці частоти з більшими шансами, навіть якщо відстань до інших користувачів трохи менша.

В такому випадку цільова функція оптимізації є мінімумом об'єднаної функції втрат:

$$J(k, s, T) = \alpha \cdot |k - k_v| - \beta \cdot \omega(k) + \gamma \cdot C(k, s, T), \quad (13)$$

де $C(k, s, T) = \sum_i \mathbb{I}[(T \cap T_i \neq \emptyset) \wedge D((k, s), (k_i, s_i)) < \Delta k_{min}]$ – функція конфлікту з іншими користувачами,

$\| [\cdot]$ – індикатор: 1, якщо умова виконується, інакше 0,

α, β, γ – параметри визначають вагу точності, бажаності та конфліктності відповідно.

Параметр конфліктності γ вказує на ступінь пріоритету уникнення інтерференції у процесі вибору параметрів FMCW-сигналу. Він визначає, наскільки сильно система штрафує такі частотно-часові поєднання (k, s, T) , які можуть спричинити накладання з іншими радарми. Таким чином, збільшення γ призводить до вибору більш «обережних», хоча й можливо менш ефективних у сенсі ресурсу, рішень, що знижують ймовірність появи фантомних цілей або шуму.

Для оцінки ефективності цільової функції було проведено моделювання на обмеженому частотному діапазоні, який умовно поділявся на двадцять дискретних каналів. Центральним бажаним каналом обрано канал із номером десять, навколо якого здійснювалось частотне планування. При моделюванні було враховано розподіл бажаності каналів у спектрі: зокрема, вважалося, що ділянки в межах п'ятого–восьмого та п'ятнадцятого–вісімнадцятого каналів є менш навантаженими та, відповідно, мають вищу бажаність для використання.

Для імітації спектрального середовища в моделі передбачено наявність п'яти активних користувачів, які вже займають певні частотні канали, що наближені до 3-го, 7-го, 10-го, 12-го та 17-го каналів. Введено обмеження у вигляді мінімальної допустимої відстані між частотами активних користувачів та потенційно вибраним каналом, яка фіксована на рівні двох каналів. Це дозволило сформувати конфліктну функцію, що оцінює кількість випадків небажаного перекриття у частотній області.

Моделювання виконувалося для трьох варіантів вагових коефіцієнтів, які регулювали вплив відповідно точності розміщення, бажаності частоти та кількості конфліктів з іншими користувачами. Усі розрахунки проводилися у вигляді незалежних реалізацій функції втрат для кожного з варіантів параметризації, що дозволило візуалізувати зміни профілю цільової функції та зробити висновки щодо впливу кожного з факторів на результат частотного планування.

Графіки, отримані для трьох варіантів параметризації функції (рис. 3), демонструють суттєву зміну профілю цільових значень у залежності від ваги кожного із трьох факторів. У випадку рівномірного врахування всіх компонентів ($\alpha=1, \beta=1, \gamma=1$), функція виявляє помірну реакцію як на віддалення від бажаного частотного центру, так і на ступінь завантаженості каналу та можливість конфліктів. Така конфігурація забезпечує збалансоване рішення, однак може призводити до вибору частот із незначними конфліктами, якщо вони є географічно чи часово ближчими до бажаного центру.

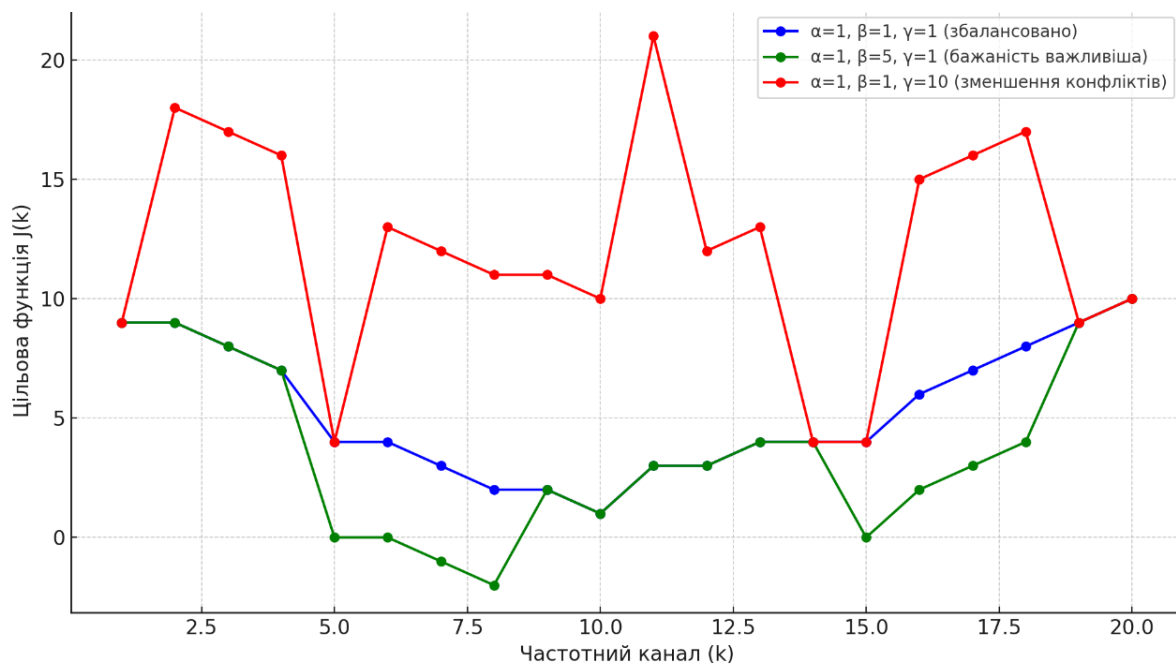


Рис. 3 – Розрахунок цільової функції частотного планування від номера каналу при різних вагових коефіцієнтах

При збільшенні ваги коефіцієнта бажаності ($\beta=5$), значення цільової функції суттєво зменшуються для каналів, які системно визначено як менш завантажені. Це відображає здатність функції адаптивно реагувати на статистичну інформацію про спектральне навантаження і спрямовувати планування у бік частот, що потенційно є менш зашумленими або менш використовуваними. Візуально це проявляється як чітке зниження функції втрат у діапазонах каналів 5–8 та 15–18, які заздалегідь були позначені як пріоритетні.

Найбільш помітний ефект спостерігається у варіанті з перевагою фактору конфліктності ($\gamma=10$), коли система активно уникає каналів, які перебувають у спектральній близькості до вже зайнятих. Графік демонструє локальні піки значень функції саме поблизу частот, що відповідають каналам інших користувачів, що дозволяє зробити висновок про ефективну роботу механізму уникнення конфліктів. Такий підхід є особливо корисним у сценаріях високої щільності розміщення радарів, де ризик міжсистемних завад суттєво зростає.

Узагальнюючи, результати моделювання підтверджують доцільність використання параметризованої об'єднаної функції втрат, як засобу адаптивного частотного планування. Регулювання вагових коефіцієнтів дозволяє гнучко адаптуватися до умов спектрального середовища, змінюючи пріоритети системи в залежності від конкретних потреб – від точності до уникнення конфліктів чи ефективного використання доступного ресурсу. Таким чином, сформульований підхід відкриває можливість для інтелектуального планування частот у багатокористувацьких FMCW-системах, що особливо важливо для когнітивних радіосистем нового покоління. Подальші дослідження в цьому напрямку передбачають інтеграцію просторової та кутової селективності, а також застосування методів глибинного навчання для прогнозування активності інших учасників спектру.

Висновки. На основі проведеного аналізу, у статті представлено формалізацію та розширення задачі беззавадного частотного планування для багатокористувацьких FMCW-радарів з урахуванням конфліктів між передавачами. Розглянуто ключові фактори, які впливають на взаємні перешкоди між радаром, зокрема частотний нахил чірп-сигналів, часове вікно передачі та просторове рознесення сигналів. Показано, що оптимізація частотного плану повинна враховувати не лише жорсткі умови уникнення перекривання спектрів, але й адаптивну вагову пріоритезацію частот відповідно до сценаріїв застосування, технічних обмежень або спектральної ситуації.

Запропоновано ієрархічний підхід до розподілу нахилів чірпів з урахуванням їх ортогональності, динамічного моніторингу спектру та введення вагових коефіцієнтів до частотних компонентів. Це дозволяє значно покращити ефективність та гнучкість планування в умовах обмеженого та зашумленого спектра, особливо в децентралізованих або мобільних мережах.

Розроблена модель цільової функції з багатокритеріальною оптимізацією, яка одночасно враховує бажаність частоти, ступінь конфлікту та точність розташування в спектрі. Цей підхід відкриває шлях до побудови більш інтелектуальних і самоналаштовуваних FMCW-систем, здатних адаптуватися до змін у середовищі без потреби в централізованому координуванні. Така методика є особливо цінною для інфраструктур майбутнього – інтелектуальних транспортних систем, автономних платформ і когнітивних бездротових мереж.

Список бібліографічного опису

1. Skolnik, M. I. Radar Handbook (3rd ed.). McGraw-Hill. 2008. 1328 p.
2. Hasch J., Topak, E., Schnabel R., Zwick, T., Weigel R., Waldschmidt C. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3), 2012, pp. 845–860. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2178427>
3. Xu Z., Wei S. FMCW Radar System Interference Mitigation Based on Time-Domain Signal Reconstruction. *Sensors*, 23(16), 7113, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23167113>
4. Zhou Y., Cao R., Zhang A., Li P. An Interference Mitigation Method for FMCW Radar Based on Time-Frequency Distribution and Dual-Domain Fusion Filtering. *Sensors*, 24(11), 3288, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24113288>
5. Son, Y.-S., Sung, H.-K., & Heo, S. W. Automotive Frequency Modulated Continuous Wave Radar Interference Reduction Using Per-Vehicle Chirp Sequences. *Sensors*, 18(9), 2831, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18092831>
6. Patole S. M., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive Radars: A Review of Signal Processing Techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 2017, pp. 22–35. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>
7. Liu, P., Liu, Y., Huang, T., Lu, Y., & Wang, X. Decentralized automotive radar spectrum allocation to avoid mutual interference using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(1), 2020, pp. 190–205. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02629>
8. Xu, Lifan & Zheng, Ruxin & Sun, Shunqiao. A Deep Reinforcement Learning Approach for Integrated Automotive Radar Sensing and Communication. *2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2022, pp. 316–320. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAM53842.2022.9827815>

9.Xiang P., Shan H., Su Z., Zhang Z., Chen C. & Li E-P. Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Decentralized Spectrum Access in Vehicular Networks With Emergent Communication. *IEEE Communications Letters*, 27(1), 2023, pp. 195-199. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3214792>

References

- 1.Skolnik, M. I. Radar Handbook (3rd ed.). McGraw-Hill. 2008. 1328 p.
- 2.Hasch J., Topak E., Schnabel R., Zwick T., Weigel R., Waldschmidt C. Millimeter-Wave Technology for Automotive Radar Sensors in the 77 GHz Frequency Band. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 60(3), 2012, pp. 845–860. DOI: <https://doi.org/10.1109/TMTT.2011.2178427>
- 3.Xu Z., Wei S. FMCW Radar System Interference Mitigation Based on Time-Domain Signal Reconstruction. *Sensors*, 23(16), 7113, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/s23167113>
- 4.Zhou Y., Cao R., Zhang A., Li P. An Interference Mitigation Method for FMCW Radar Based on Time-Frequency Distribution and Dual-Domain Fusion Filtering. *Sensors*, 24(11), 3288, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24113288>
- 5.Son, Y.-S., Sung, H.-K., & Heo, S. W. Automotive Frequency Modulated Continuous Wave Radar Interference Reduction Using Per-Vehicle Chirp Sequences. *Sensors*, 18(9), 2831, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18092831>
- 6.Patole S. M., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive Radars: A Review of Signal Processing Techniques. *IEEE Signal Processing Magazine*, 34(2), 2017, pp. 22–35. DOI: <https://doi.org/10.1109/MSP.2016.2628914>
- 7.Liu, P., Liu, Y., Huang, T., Lu, Y., & Wang, X. Decentralized automotive radar spectrum allocation to avoid mutual interference using reinforcement learning. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 57(1), 2020, pp. 190-205. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.02629>
- 8.Xu, Lifan & Zheng, Ruxin & Sun, Shunqiao. A Deep Reinforcement Learning Approach for Integrated Automotive Radar Sensing and Communication. *2022 IEEE 12th Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (SAM)*, 2022, pp. 316-320. DOI: <https://doi.org/10.1109/SAM53842.2022.9827815>
- 9.Xiang P., Shan H., Su Z., Zhang Z., Chen C. & Li E-P. Multi-Agent Reinforcement Learning-Based Decentralized Spectrum Access in Vehicular Networks With Emergent Communication. *IEEE Communications Letters*, 27(1), 2023, pp. 195-199. DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2022.3214792>