

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет робототехніки та штучного інтелекту

(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки, фізики та SMART-систем

(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «БАКАЛАВР»**

**РАДАР ЯК ОСНОВА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ADAS
RADAR AS THE BASIS FOR THE FUNCTIONING OF THE ADAS
SYSTEM**

спеціальність

171 Електроніка

(шифр і назва спеціальності)

освітня програма

«Автомобільна електроніка»

(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕЛ(АЕ)-41
Вознюк Кирило Олександрович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Мороз Сергій Анатолійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«__» червня 2026 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Приступа Станіслав Олексійович

(підпис)

Луцьк – 2026 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій

Кафедра електроніки та телекомунікацій

Ступінь вищої освіти: бакалавр

Галузь знань: 17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації

Спеціальність: 171 Електроніка

Освітня програма: «Автомобільна електроніка»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

_____ доц. В. ЗАБЛОЦЬКИЙ
« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Вознюку Кирилу Олександровичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема кваліфікаційної роботи *Радар як основа функціонування системи ADAS*

керівник роботи: *к.т.н., доцент Мороз С. А.*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «31» грудня 2025 року №560/01-02

2. Термін подання здобувачем кваліфікаційної роботи: 04.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи: апаратна платформа – AWR1843BOOST; робочий діапазон частот радара – 76...81 ГГц; тип радара – FMCW з лінійно-частотною модуляцією; кількість передавальних (приймальних) каналів – 3 (4); макс. дальність виявлення до 40 м;

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ

Розділ 1 Аналітичний огляд інформаційних джерел

Розділ 2 Теоретичні аспекти побудови автомобільних радарних систем

Розділ 3 Схемне представлення та проєктування об'єкта дослідження

Розділ 4 Охорона праці та безпека у надзвичайних ситуаціях

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу:

Демонстраційний матеріал у вигляді презентації Power Point.

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
<i>Розділ 1</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 2</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 3</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		
<i>Розділ 4</i>	<i>Заблоцький В. Ю., доцент</i>		
<i>Нормоконтроль</i>	<i>Селепина Й. Р., доцент</i>		
<i>Гарант ОП</i>	<i>Пристаупа С. О., доцент</i>		
<i>Показник запозичень тексту</i>		_____ %	
<i>Академічна доброчесність</i>	<i>Мороз С. А., доцент</i>		

7. Дата видачі завдання 31 грудня 2025 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	<i>Розділ 1</i>	до 25.04.2026 р.	
2.	<i>Розділ 2</i>	до 01.05.2026 р.	
3.	<i>Розділ 3</i>	до 04.05.2026 р.	
4.	<i>Розділ 4</i>	до 14.05.2026 р.	
5.	<i>Висновки</i>	до 20.05.2026 р.	
6.	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	до 25.05.2026 р.	
7.	<i>Оформлення ілюстративного матеріалу</i>	до 30.05.2026 р.	
8.	<i>Нормоконтроль</i>	до 02.06.2026 р.	
9.	<i>Інструментальна перевірка на академічний плагіат</i>	до 03.06.2026 р.	
10.	<i>Представлення кваліфікаційної роботи бакалавра до захисту</i>	до 04.06.2026 р.	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Вознюк К. О.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Мороз С. А.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Вознюк К. О. Радар як основа функціонування системи ADAS. Рукопис

Кваліфікаційна робота бакалавра освітньої програми «Автомобільна електроніка». Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2026.

У кваліфікаційній роботі розглянуто особливості застосування автомобільних радарів як основного сенсорного модуля інтелектуальних систем допомоги водієві, аналіз еволюції систем ADAS. Розглянуто принципи функціонування автомобільних радарів. У роботі виконано аналіз побудови та функціонування модуля автомобільного радара на основі мікросхеми AWR1843, призначеного для систем автоматизованого паркування.

Ключові слова: ADAS, автомобільний радар, FMCW, AWR1843, радіолокація, активна безпека.

ANNOTATION

Voznyuk K. Radar as the basis for the functioning of the ADAS system. Manuscript

Bachelor's qualification work of the educational program «Automotive Electronics». Lutsk National Technical University. Lutsk, 2026.

The qualification work considers the features of the use of automotive radars as the main sensor module of intelligent driver assistance systems, analysis of the evolution of ADAS systems. The principles of the functioning of automotive radars are considered. The work analyzes the construction and functioning of the automotive radar module based on the AWR1843 chip, designed for automated parking systems.

Keywords: ADAS, Automotive Radar, FMCW, AWR1843, Radar, Active Safety.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ.....	8
1.1 Аналіз розвитку інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS...	8
1.2 Розвиток та застосування автомобільних радарних систем у ADAS	13
1.3 Сучасні автомобільні радарні системи та тенденції їх удосконалення.....	19
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ АВТОМОБІЛЬНИХ РАДАРНИХ СИСТЕМ	24
2.1 Принцип роботи та класифікація автомобільних радарних систем ...	24
2.2 Принцип функціонування імпульсних радарних систем.....	28
2.3 Принцип функціонування FMCW-радарів у системах ADAS.....	31
РОЗДІЛ 3 СХЕМНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА ПРОЄКТУВАННЯ ОБ'ЄКТА ДОСЛІДЖЕННЯ.....	36
3.1 Архітектура та особливості функціонування автомобільного FMCW-радара	36
3.2 Мікросхема AWR1843	40
3.3 Блок-схема та електрична схеми модуля AWR1843BOOST	43
3.4 Теоретичні основи проєктування радарної системи та параметри FMCW-сенсора.....	49
3.5 Загальна будова та призначення функціональних складових модулю AWR1843BOOST.....	55
3.6 Калібрування радарних систем ADAS.....	63
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ	67
4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів.....	67
4.2 Заходи з охорони праці під час роботи з радарними системами ADAS	68
4.3 Забезпечення пожежної безпеки та безпеки у надзвичайних ситуаціях.....	70

ВИСНОВКИ	72
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	73
ДОДАТКИ	75

ВСТУП

Сучасний розвиток автомобільної промисловості характеризується активним впровадженням інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS (Advanced Driver Assistance Systems), спрямованих на підвищення рівня безпеки дорожнього руху та зниження кількості дорожньо-транспортних пригод. Основною причиною більшості аварій залишається людський фактор, тому одним із пріоритетних напрямів розвитку автомобільної електроніки є створення систем, здатних контролювати дорожню обстановку та автоматично реагувати на потенційно небезпечні ситуації.

Важливу роль у функціонуванні сучасних систем ADAS відіграють сенсори навколишнього середовища, серед яких особливе місце займають автомобільні радары. На відміну від відеокамер і лідарів, радарні системи здатні стабільно працювати за несприятливих погодних умов, у темний час доби, під час дощу, туману, снігопаду або запиленості повітря. Завдяки цьому автомобільні радары стали основою функціонування адаптивного круїз-контролю, автоматичного екстреного гальмування, контролю сліпих зон, систем допомоги при паркуванні та інших сучасних функцій активної безпеки.

Подальший розвиток напівпровідникових технологій та міліметрової радіолокації дозволив створити компактні інтегровані однокристальні радарні системи, які поєднують радіочастотний тракт, цифрову обробку сигналів та мікроконтролерні підсистеми в межах одного кристала. Одним із таких рішень є радар AWR1843 компанії Texas Instruments, що використовується в сучасних автомобільних системах допомоги водієві.

У зв'язку зі зростанням рівня автоматизації транспортних засобів та розвитком концепції автономного керування дослідження принципів побудови та функціонування автомобільних радарних систем є актуальним науково-технічним завданням.

Мета роботи – дослідження принципів побудови та функціонування автомобільних радарів як основи роботи сучасних систем ADAS, аналіз архітектури FMCW-радару AWR1843 та особливостей його використання у

системах автоматизованого паркування і активної безпеки транспортних засобів.

Завдання роботи:

1. Провести аналітичний огляд інформаційних джерел стосовно розвитку інтелектуальних систем допомоги водієві та їх складових компонентів.
2. Проаналізувати принципи функціонування імпульсних та FMCW-радарів.
3. Дослідити архітектуру та принцип роботи однокристального радара AWR1843.
4. Дослідити алгоритми цифрової обробки радіолокаційної інформації модулем AWR1843BOOST.

Об'єкт дослідження – автомобільні радарні системи міліметрового діапазону, що використовуються у складі інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS.

Предмет дослідження – принципи функціонування FMCW-радарів, методи цифрової обробки радіолокаційних сигналів та архітектура автомобільного радара на основі мікросхеми AWR1843.

Під час виконання кваліфікаційної роботи бакалавра було використано інструменти штучного інтелекту для редагування та форматування тексту, виключно як допоміжний засіб для пошуку ідей, уточнення формулювань та опрацювання літератури. Усі твердження, висновки та результати дослідження належать автору та ґрунтуються на власному аналізі, а отримані результати від генеративного ШІ були перевірені на достовірність та відповідність академічній доброчесності.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Аналіз розвитку інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS

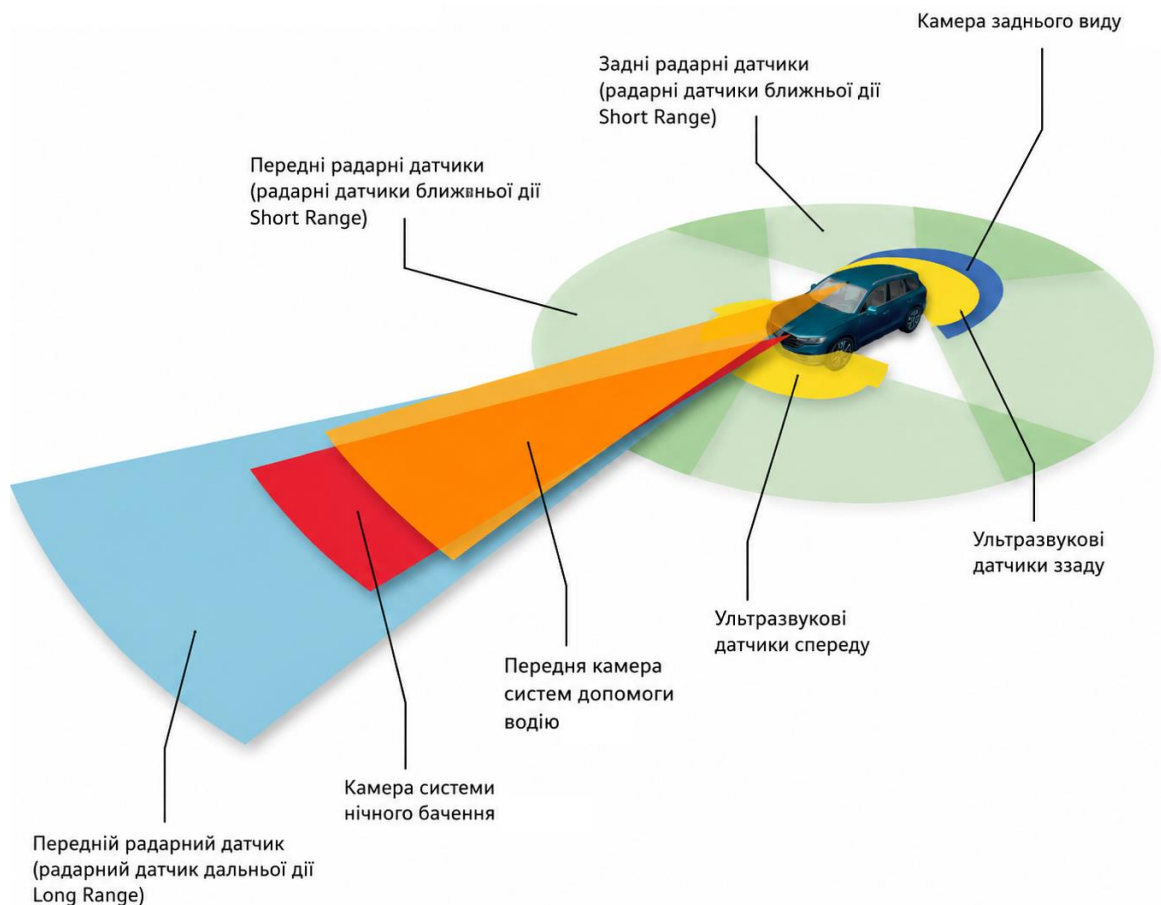
Однією з основних причин виникнення дорожньо-транспортних пригод є вплив людського фактора, який проявляється у порушенні водіями правил дорожнього руху, помилковій оцінці дорожньої ситуації, втраті концентрації уваги, перевтомі та відволіканні на сторонні чинники. У зв'язку з цим одним із пріоритетних напрямів розвитку автомобільної промисловості стало створення систем, здатних частково або повністю компенсувати помилки водія шляхом автоматизації процесів контролю дорожньої обстановки та виконання окремих функцій керування транспортним засобом. Група систем, призначених для підвищення активної безпеки та полегшення процесу керування транспортним засобом, об'єднана під загальною назвою Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) – інтелектуальні системи допомоги водієві. Сучасні системи ADAS реалізують не лише функції автоматичного втручання в керування транспортним засобом, але й виконують превентивні функції. Зокрема, вони забезпечують попередження водія про можливе зіткнення, активацію окремих елементів пасивної безпеки та підготовку систем автомобіля до аварійної ситуації.

До основних сенсорів, що використовуються в системах ADAS, належать: автомобільні радары; лідари; ультразвукові датчики; інфрачервоні далекоміри; відеокамери (рис. 1.1, а).

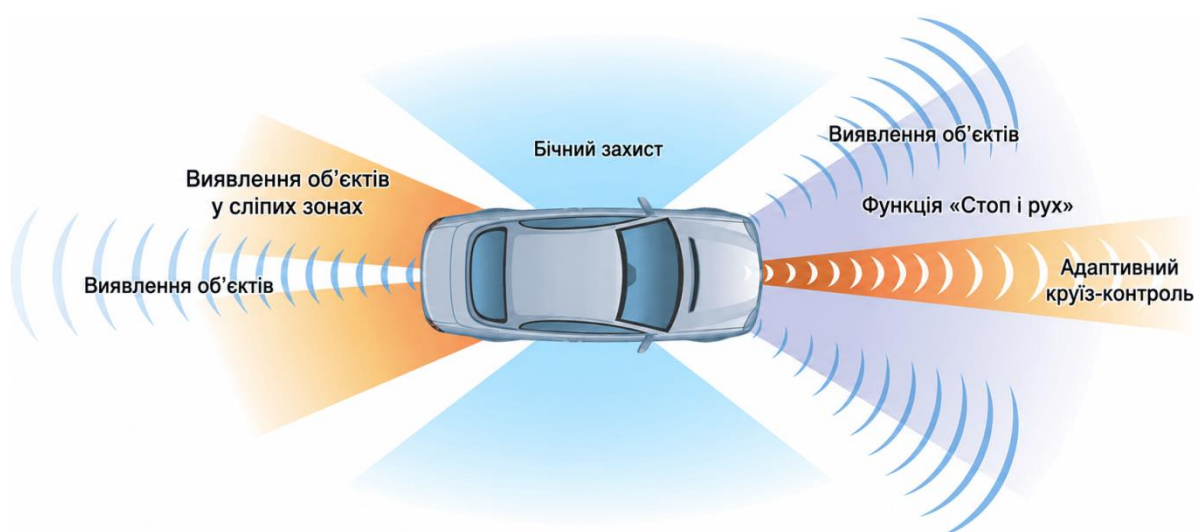
Застосування радарної технології в системах ADAS проілюстровано на рисунку 1.1, б. Комплексне використання декількох типів сенсорів дозволяє реалізувати моніторинг простору навколо автомобіля в секторі 360°. Радарні системи забезпечують виявлення та супровід об'єктів, визначення їх відносної швидкості, дистанції та траєкторії руху.

До сучасних систем ADAS належать такі основні системи: система електронного контролю стійкості (ESC / ESP); система попередження про можливе зіткнення (FCW); система автоматичного екстреного гальмування

(АЕВ); адаптивний круїз-контроль (ACC); система допомоги руху в заторах; система утримання у смузі руху (LSS); система допомоги при паркуванні; система кругового огляду (AVM); система контролю сліпих зон (BSD / BSW).



а)



б)

Рисунок 1.1 – Давачі системи технічного зору автомобіля (а) та застосування радарної технології у системах ADAS (б) [1]

Перші спроби застосування радарних технологій в автомобільній техніці були здійснені ще у 1959 році на концептуальному автомобілі Cadillac Cyclone. У конструкції автомобіля використовувалися радарні датчики, розташовані у передній частині кузова в наконечниках стилізованих крил (рис. 1.2). Дані датчики здійснювали сканування простору перед транспортним засобом та формували попередження водію про наявність можливих перешкод. Незважаючи на високий рівень інноваційності, система не отримала подальшого серійного застосування через значну вартість реалізації.



Рисунок 1.2 – Радарні системи автомобіля Cadillac Cyclone [2]

Подальший розвиток технологій технічного зору та електронних систем керування привів до появи у 1992 році автомобіля Mitsubishi Debonair третього покоління – першого серійного транспортного засобу, оснащеного системою виявлення об'єктів на основі лазерного радара (лідара). Система забезпечувала розпізнавання транспортних засобів попереду та виконувала функцію попередження водія про можливу небезпеку, однак без втручання у процес керування автомобілем.

У 1995 році подібна система була реалізована на автомобілі Mitsubishi Diamante [3]. Використовуючи дані лідара, система визначала відстань до транспортного засобу, що рухався попереду, та шляхом керування режимами роботи двигуна автоматично підтримувала безпечну дистанцію.

Важливим етапом розвитку систем ADAS стало впровадження

адаптивного круїз-контролю (Adaptive Cruise Control – ACC). У серпні 1997 року система ACC була представлена на автомобілі Toyota Celsior для японського ринку [4]. На початковому етапі система забезпечувала підтримання дистанції лише шляхом керування дросельною заслінкою та трансмісією без використання гальмівних механізмів. Подальше вдосконалення системи дозволило реалізувати функцію автоматичного гальмування. Зокрема, у 2000 році модернізована система на автомобілі Toyota Celsior (Lexus LS) вже могла задіювати гальмівні механізми для підтримання безпечної дистанції до транспортного засобу попереду [4]. У 2005 році на автомобілях Mercedes-Benz S-Class була впроваджена система DISTRONIC Plus, здатна виконувати повне автоматичне зупинення транспортного засобу в разі необхідності [5].

У 2008 році компанія Subaru представила комплекс систем активної безпеки EyeSight, який використовував стереоскопічну відеокамеру як основний елемент технічного зору [6]. Дана система стала одним із перших прикладів ефективного використання технологій комп'ютерного зору в автомобільних системах безпеки.

У 2015 році компанія Volvo стала одним із перших автовиробників, який серійно впроваджував системи автоматичного екстреного гальмування практично на всіх моделях автомобілів. Компанія Honda з 2012 року також інтегрувала системи автоматичного гальмування у транспортні засоби для японського ринку, хоча їх функціональні можливості були обмежені лише зменшенням швидкості руху транспортного засобу.

Подальший розвиток систем технічного зору сприяв появі систем допомоги руху по смузі та систем контролю непроглядних («сліпих») зон. Однією з перших у Європі систем попередження про вихід за межі смуги руху стала система, розроблена компанією Itecs для вантажних автомобілів Mercedes-Benz Actros [7].

У 2003 році компанія Honda представила систему Lane Keep Assist System (LKAS), яка забезпечувала утримання транспортного засобу у межах смуги руху шляхом формування коригуючих впливів на рульове керування [8]. Для визначення положення автомобіля використовувалася відеокамера, встановлена

у верхній частині вітрового скла поблизу дзеркала заднього виду. Блок керування аналізував інформацію з відеокамери, швидкість руху автомобіля та його кутову швидкість для формування необхідного керуючого сигналу.

У 2007 році на автомобілі Volvo S80 була впроваджена система контролю сліпих зон (Blind Spot Detection – BSD), яка використовувала інформацію з відеокамер, розташованих у зовнішніх дзеркалах заднього виду [9].

Відповідно до спільного звіту Motor and Equipment Manufacturers Association (MEMA) та Boston Consulting Group (BCG) «A Roadmap to Safer Driving Through Advanced Driver Assistance Systems» [10], широке впровадження систем ADAS дозволить суттєво знизити рівень аварійності. Згідно з прогнозами, до 2035 року рівень дорожньо-транспортних пригод може бути зменшений до 90 %.

1.2 Розвиток та застосування автомобільних радарних систем у ADAS

Автомобільні радарні системи є одним із пріоритетних напрямів розвитку сучасних інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS. Використання радарних технологій у транспортних засобах спрямоване на забезпечення безперервного моніторингу дорожньої обстановки, своєчасне виявлення потенційно небезпечних об'єктів та підвищення рівня активної безпеки автомобіля. Розробленням радарних сенсорів, мікроелектронних компонентів та спеціалізованих модулів для систем ADAS займаються провідні світові компанії, зокрема Bosch, Continental, TRW, Freescale, Sensor Dynamics, STMicroelectronics, BMW та інші.

Перші дослідження у сфері автомобільних радарних систем були розпочаті наприкінці 1950-х років. Експериментальні радіолокаційні комплекси функціонували у X- та Ku-діапазонах із робочими несучими частотами приблизно 10 ГГц і 16 ГГц відповідно. Для формування зондувальних сигналів застосовувалися різні методи модуляції, серед яких імпульсні, частотно-модульовані та лінійно-частотно-модульовані сигнали типу FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). У більшості ранніх реалізацій радарних систем

використовувався один діаграмоутворювальний промінь, призначений для виявлення об'єктів у напрямку руху автомобіля. Попри значний потенціал таких розробок, перші автомобільні радари характеризувалися великими габаритами, складністю конструкції та високою вартістю, що обмежувало можливість їх інтеграції у серійні транспортні засоби.

З метою зменшення розмірів антенних систем та підвищення компактності обладнання у подальших розробках було здійснено перехід до вищих робочих частот – 35 ГГц та 50 ГГц. У 1972 році урядом Федеративної Республіки Німеччина було профінансовано дослідження систем запобігання зіткненням NTO-49, які проводилися компанією AEG-Telefunken у місті Ульм. У межах даного проєкту був створений автомобільний радар, що працював на частоті 35 ГГц (рис. 1.3).



а)



б)

Рисунок 1.3 – Експериментальний автомобіль із радарною системою виявлення перешкод (а) та радарний модуль раннього покоління (б) [11]

У системі застосовувався імпульсний зондувальний сигнал тривалістю приблизно 10 нс. Антенний тракт було реалізовано із використанням параболічної антени, ширина діаграми спрямованості якої за азимутом становила близько $2,5^\circ$. Максимальна дальність виявлення об'єктів досягала орієнтовно 100 м. Для формування та обробки надвисокочастотних сигналів використовувалися діоди Ганна та Шотткі. Підвищення значення несучої частоти дало змогу істотно зменшити розміри антенної системи та забезпечити інтеграцію радара у передню частину транспортного засобу.

Перші серійні автомобільні радарні системи з'явилися на початку 1990-х років. Розробленням таких систем займалися компанії Philips, Fujitsu, Nissan, TRW та інші виробники автомобільної електроніки. У більшості комерційних рішень як зондувальний сигнал використовувався частотно-модульований сигнал безперервного випромінювання типу FMCW. Основною перевагою такого підходу є спрощення процесів генерації, приймання та цифрової обробки сигналів. Використання FMCW-модуляції дозволило реалізувати ефективні радарні системи без застосування високопродуктивних і дорогих обчислювальних процесорів надвисокої швидкодії. Однією з перших масштабних реалізацій автомобільних радарних систем стала система попередження про зіткнення EATON-VORAD Collision Warning System (CWS) (рис. 1.4), яка встановлена у 1992 році на автобусах компанії Greyhound у США. Система була інтегрована приблизно у 1600 транспортних засобів. За результатами аналізу експлуатаційних даних було встановлено, що використання даної системи дозволило знизити рівень аварійності приблизно на 21 % у порівнянні з попереднім роком.



Рисунок 1.4 – Радар системи попередження про зіткнення EATON-VORAD Collision Warning System [12]

У системі EATON-VORAD застосовувалися фазовані антенні решітки, виконані за планарною технологією та розраховані на роботу в частотному діапазоні 24 ГГц. Радіолокаційна система формувала один передавальний і один приймальний промінь із шириною діаграми спрямованості за азимутом близько $3,5^\circ$. Як зондувальний сигнал використовувався безперервний сигнал із лінійно-частотною FMCW-модуляцією. Середня потужність випромінювання

радара становила приблизно 0,5 мВт, при цьому максимальна дальність виявлення об'єктів досягала близько 100 м.

Незважаючи на позитивні результати практичної експлуатації, подальше впровадження системи було обмежене низкою технічних та організаційних чинників. Одним із них стали заперечення профспілок водіїв, пов'язані з можливістю реєстрації та збереження інформації про маршрути руху транспортних засобів. Крім того, виникали взаємні електромагнітні завади між автомобільними радарними системами та поліцейськими радарними через використання однакових або близьких частотних діапазонів.

Подальший розвиток автомобільних радарів став можливим завдяки вдосконаленню напівпровідникових технологій, зменшенню вартості мікрохвильових компонентів та стандартизації частотних діапазонів Федеральною комісією зв'язку США (FCC). Для комерційних автомобільних радарних систем були виділені частотні діапазони 71–76 ГГц, 81–86 ГГц та 92–95 ГГц, що створило передумови для масового впровадження радарних технологій у транспортній галузі.

На сучасному етапі автомобільні радарні системи є одним із ключових елементів інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS. Вони широко використовуються у системах адаптивного круїз-контролю (ACC), автоматичного екстреного гальмування (АЕВ), попередження про фронтальне зіткнення, контролю сліпих зон, допомоги при паркуванні та інших системах активної безпеки транспортних засобів. Особливе поширення отримали радарні міліметрового діапазону, які працюють у смузі 76...77 ГГц. Такі радарні належать до категорії Long Range Radar (LRR) – радарів дальнього радіуса дії. Вони забезпечують виявлення об'єктів на відстанях від 1 до 150 м і більше, визначення відносної швидкості, кута азимуту та відстані до цілі з роздільною здатністю близько 1 м.

Сучасні системи ACC переважно базуються на використанні міліметрових радарів, що працюють у діапазоні 40...300 ГГц. Більшість автомобільних радарів функціонує у мікрохвильовому діапазоні частот від 200 МГц до 95 ГГц, що відповідає довжинам хвиль від 0,67 м до 3,16 мм.

Міліметровий діапазон додатково поділяється на піддіапазони:

- Q-діапазон – 36–46 ГГц;
- V-діапазон – 46–56 ГГц;
- W-діапазон – 56–100 ГГц.

Суттєвий вплив на розвиток автомобільних радарних систем мало впровадження монолітних мікрохвильових інтегральних схем ММІС (Monolithic Microwave Integrated Circuit). Використання таких технологій забезпечило значне зменшення вартості радарних модулів, підвищення рівня функціональної інтеграції, а також зниження масогабаритних показників обладнання, що сприяло широкому впровадженню радарних систем у серійні транспортні засоби.

Першою серійною системою допомоги водієві для легкових автомобілів стала система, представлена компанією Mercedes-Benz у 1999 році. Дана система була орієнтована на реалізацію функції адаптивного круїз-контролю та встановлювалася переважно на автомобілях преміального сегмента. Розроблення системи здійснювалося спільно з компанією Daimler, а сама система отримала назву DISTRONIC [13].

У системі DISTRONIC застосовувався автомобільний радар виробництва Continental, який функціонував у діапазоні 77 ГГц. Максимальна дальність виявлення об'єктів становила близько 150 м, що забезпечувало ефективний моніторинг дорожньої обстановки попереду транспортного засобу та автоматичне підтримання безпечної дистанції до автомобіля, який рухався попереду. Основним режимом експлуатації системи був рух автомагістралями та заміськими дорогами. Подальший розвиток технології привів до створення вдосконаленої системи DISTRONIC PLUS, яка була представлена приблизно через 8 років після впровадження базової версії. На відміну від попереднього покоління, нова система використовувала комбіновану сенсорну архітектуру, до складу якої входив один радар дальнього радіуса дії з робочою частотою 77 ГГц та два радари ближнього радіуса дії, що працювали у діапазоні 24 ГГц.

На сьогодні розробкою автомобільних радарів займається значна кількість компаній, серед яких Bosch, Continental, Delphi, Veoneer, Valeo та

інші. Найбільш поширеними є радарні системи компаній Bosch і Continental, які активно застосовуються в автомобілях Mercedes-Benz та Volkswagen Group.

Автомобільні радары діапазону 77 ГГц зазвичай мають апертурний кут близько 10°. Однак для реалізації функцій Stop-and-Go, що передбачають автоматичне зупинення та початок руху в умовах міського трафіку, необхідне розширення сектору огляду. Саме тому сучасні транспортні засоби додатково оснащуються радарми короткого радіуса дії Short Range Radar (SRR), які працюють у діапазоні 24 ГГц.

Одним із ключових напрямів розвитку автомобільних систем активної безпеки є створення систем кругового огляду з контролем простору навколо транспортного засобу в секторі 360°.

У лютому 2002 року FCC офіційно затвердила використання частоти 24 ГГц для автомобільних радарів короткого радіуса дії SRR. У Європі підтримку даному частотному діапазону забезпечили організації SARA, CEPT та ETSI.

Крім стандартизації робочих частот, регламентуються також рівні випромінюваної потужності. Максимальна еквівалентна ізотропно випромінювана потужність EIRP для автомобільних радарів визначається на рівні приблизно 100 мВт (+20 дБм для частот понад 10 ГГц).

Радари 24 ГГц, що працюють на коротких дистанціях до 20 м, активно застосовуються для запобігання аваріям та реалізації функцій автоматичного екстреного гальмування. Наприклад, автомобілі Mercedes-Benz S-Class оснащуються радарми 24 ГГц для реалізації функції автоматичного жорсткого гальмування при загрозі зіткнення.

Сучасні радарні системи також широко застосовуються як бічні та задні сенсори у системах: попередження про виїзд зі смуги руху (LDW); допомога утримання смуги руху (LKA); допомога зі зміною смуги руху (LCA); система контролю сліпих зон (BSD); система автоматичного паркування. Крім того, радары використовуються у системах нічного бачення та автоматичного розпізнавання об'єктів у непроглядних зонах.

Однією з найважливіших переваг радарних систем є: можливість

прихованого монтажу за непровідними матеріалами; стабільна робота за будь-яких погодних умов; висока швидкодія та довговічність; можливість паралельної обробки сигналів; низький рівень взаємних завад; висока точність та надійність отримуваної інформації.

1.3 Сучасні автомобільні радарні системи та тенденції їх удосконалення

Автомобільні радары Bosch пройшли кілька поколінь (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Розвиток автомобільних радарів [14]

Перший серійний автомобільний радар компанії Bosch ACC1 (Adaptive cruise control) був представлений у 2000 році. Він був зібраний з дискретних компонентів: генератор сигналу, НВЧ приймач, система цифрової обробки сигналів. Генератор сигналів був виготовлений на основі арсенід галієвої технології (GaAs). Для формування необхідного кута огляду використовувалася діелектрична лінза. Радар мав розміри 124 91 97 мм, вага 600 г, центральна частота 77 ГГц, дальність дії до 150 м і кут огляду 8 градусів [12, 13].

Радар другого покоління (ACC2) був представлений у 2004 році (рис. 1.6, а). У радарі використовувався один широкий промінь на передачу та 4 прийомні промені, що формуються за допомогою діелектричної лінзи в аналоговому вигляді. Як зондуючий сигнал використовувався ЛЧМ сигнал із трикутним законом зміни частоти. ACC2 має масу 300 г, кут огляду становить 16 градусів. У порівнянні з першим поколінням дальність дії була збільшена до 200 м. Габарити ACC2 зменшилися до розмірів 73×70×60 мм.

У 2009 році було представлено нове (третє) покоління радара дальньої дії (Long Range Radar) LRR3 (рис. 1.6, б). Високочастотний тракт був інтегрований

в кремнієво-германієву (SiGe) мікросхему. Обробка сигналів здійснювалася на спеціальній мікросхемі типу ASIC. Дальність дії радару становила 250 м, сектор огляду 30 градусів, вага становила 285 г, габаритні розміри 77 74 58 мм, максимальна кількість контрольованих об'єктів становила 32 [13].



а)



б)

Рисунок 1.6 – Радар другого покоління (а) та третього покоління (б) [14]

У наступних поколіннях радарів компанія Bosch відмовилася від діелектричної лінзи і перейшла на планарну технологію. У 2013 році представлений радар ближньої дії для контролю обстановки з обох боків автомобіля. Дальність дії радару – 160 м, кут огляду ± 45 градусів (рис. 1.7, а).

Четверте покоління радару дальньої дії (LRR4) могло контролювати одночасно до 24 об'єктів. Радар працював у декількох зонах: дальня зона з кутом огляду ± 6 градусів і дальністю дії до 200 м і ближня зона з кутом огляду ± 20 градусів і дальністю дії до 5 м для контролю транспортних засобів, що в'їжджають або залишають зону огляду [14].

У п'ятому поколінні радарів використовується монолітна інтегральна НВЧ мікросхема (MMIC) з трьома передавачами та чотирма приймачами (рис. 1.7, б). Цифрову обробку сигналів складає здійснює мікроконтролер. Це перший радар компанії Bosch, у якому було заявлено можливість оцінки висоти. Дальність дії радару становить до 210 м, кут огляду за азимуту становить ± 60 градусів, по кутку місця ± 15 градусів, розміри 63x72x19 мм.

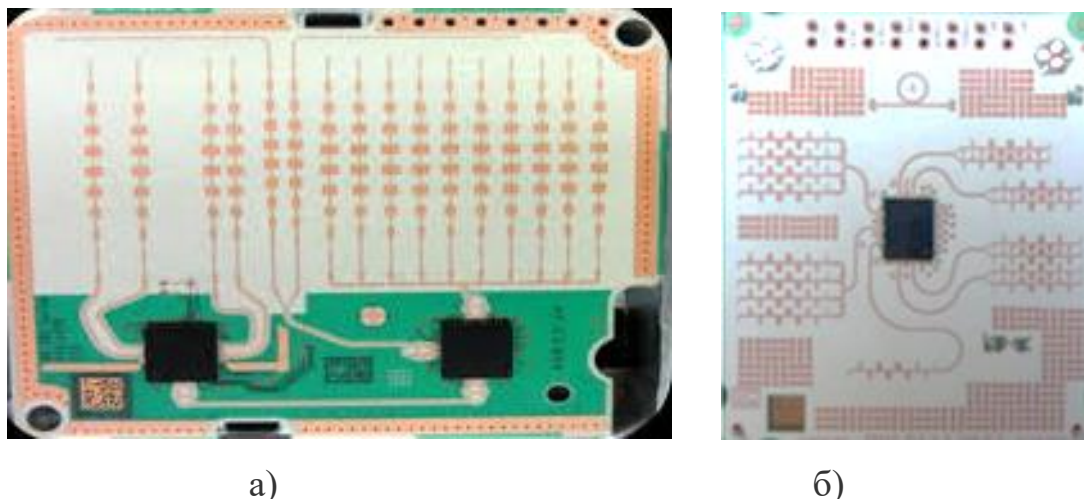


Рисунок 1.7 – Радар четвертого покоління (а) та п'ятого покоління (б) [14]

Наймасовішим радаром компанії Continental став радар ARS404/ARS408, випущений у 2012 році (рис. 1.8). Радар використовує MIMO антенну решітку з 4 передавачами та 12 приймачами. Підхід з кількома передавачами та кількома приймачами, що працюють спільно, дозволяє зменшити ширину променя радара (збільшити вирішальну здатність радара за кутовими координатами) без збільшення лінійних розмірів пристрою. Радар працює в 2 режимах: ближня зона з шириною огляду ± 60 градусів та дальністю дії близько 20 м, та дальня зона з шириною огляду ± 4 градуси та дальністю дії 250 м. Для високочастотного тракту радара та цифрової частини радара використовуються окремі мікросхеми. Радар дозволяє одночасно виявляти та супроводжувати до 32 об'єктів. Радар ставився на автомобілях концерну Volkswagen Group, BMW.



Рисунок 1.8 – Радар ARS404/ARS408 [15]

Кількість стартапів, які розробляють автомобільні радари, обчислюється десятками. В даний час розвивається новий клас автомобільних радарів – 4D-imaging радари, які оцінюють обстановку у широкому секторі кутів по азимуту. При цьому радари мають високу роздільну здатність за дальністю, швидкістю, азимутом і кутом місця. Одним із найвідоміших представників цього класу пристроїв – радар компанії Arbe (рис. 1.9).

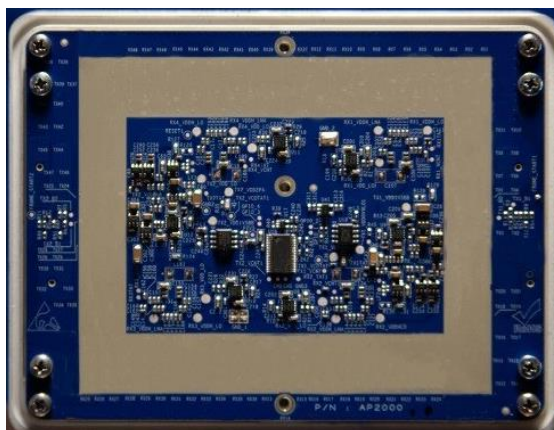


Рисунок 1.9 – Радар на основі чіпсета Arbe [16]

Антенна решітка радара складається з 48 каналів і 48 приймальних каналів. Роздільна здатність за дальністю становить до 7,5 см, по азимуту 1 градус, по кутку місця 1,5 градуса.

В даний час як зонduючий сигнал для автомобільних радарів використовується FMCW сигнал, що формується в аналоговому вигляді. Компанія Bosch прогнозує, що до 2035 року автомобільні радари використовуватимуть сигнали з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM), що формується у цифровому вигляді представленому на рисунку 1.10).

Перевага такого сигналу в тому, що форма сигналу повністю відома, що дозволяє спростити передачу інформації від одного радара до іншого (організувати радіозв'язок між автомобілями), а також організувати взаємодію між кількома радарми, встановленими на одному автомобілі. Таким чином, радари працюватимуть не тільки в моностатичному режимі, але і в бістатичному режимі, що дозволить збільшити дальність виявлення, здатність,

що дозволяє, по азимуту і куту місця, точність оцінки параметрів об'єктів і т.д. Однак, на відміну від FMCW-сигналу, OFDM вимагає обробки всієї випромінюваної лінії сигналу, що в даний час економічно не доцільно.

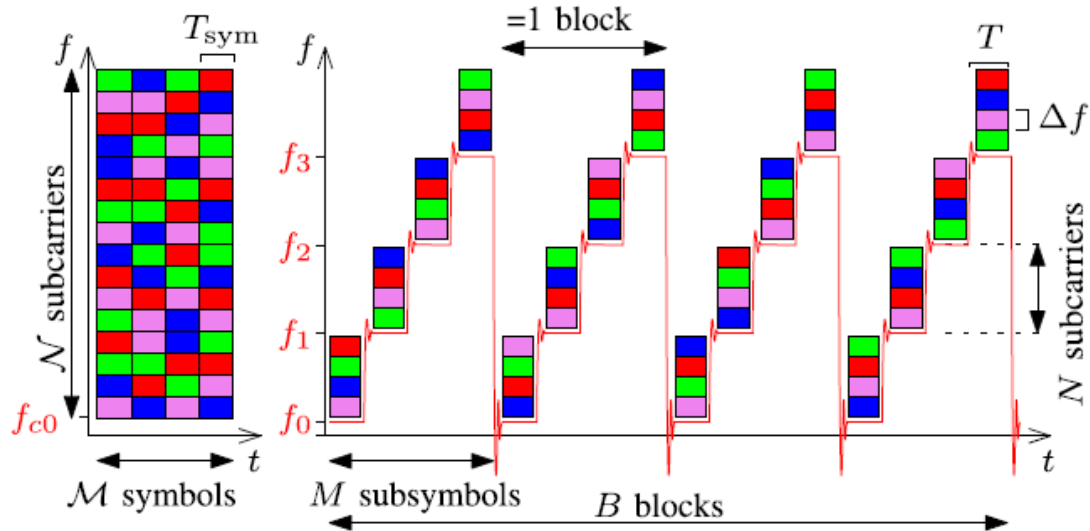


Рисунок 1.10 – Загальний вигляд сигналів з ортогональним частотним поділом каналів (OFDM) [17]

Для підвищення характеристик радара і стабільності його роботи в радарх застосовуються алгоритми трекінгу цілей, що включають кластеризацію, асоціацію, фільтрацію координат. Для розпізнавання об'єктів зазвичай використовують SVM: Support vector machine або дерево рішень [18]. В останні кілька років на додаток або як альтернатива стандартним методам обробки сигналів пропонується застосовувати машинне навчання. З урахуванням того, що роздільна здатність радарів покращується, відображення від об'єкта є хмарою крапок. В результаті машинне навчання може дозволити покращити розуміння дорожньої обстановки.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ АВТОМОБІЛЬНИХ РАДАРНИХ СИСТЕМ

2.1 Принцип роботи та класифікація автомобільних радарних систем

Основними структурними компонентами радарної системи є передавач (трансмітер), антена та приймач (ресивер). Основне призначення радара полягає у виявленні об'єктів у зоні дії електромагнітного випромінювання та визначенні їх просторових і кінематичних параметрів на основі аналізу відбитого сигналу.

Передавач формує високочастотний електромагнітний сигнал, який підсилюється за допомогою НВЧ-підсилювача та випромінюється антенною системою у навколишній простір. Після відбиття сигналу від об'єкта електромагнітна хвиля приймається антеною радара та надходить до приймального тракту, де виконується її перетворення в електричний сигнал для подальшої обробки.

Одним із головних завдань приймальної системи є відокремлення корисного сигналу від шумів та завад. З цією метою у тракті цифрової обробки сигналів здійснюється безперервне порівняння амплітуди прийнятого сигналу з пороговим рівнем, який може задаватися фіксовано або визначатися адаптивними алгоритмами залежно від поточної завадової обстановки.

Визначення відстані до об'єкта базується на вимірюванні часу проходження електромагнітного сигналу від радара до цілі та назад. Якщо відстань до об'єкта становить R , то час проходження сигналу визначається виразом:

$$t = \frac{2R}{c}, \quad (2.1)$$

де R – відстань до об'єкта;

c – швидкість поширення електромагнітної хвилі.

Оскільки швидкість поширення електромагнітних хвиль практично не залежить від умов навколишнього середовища та є близькою до швидкості світла, радарні системи забезпечують значно вищу точність вимірювання відстані порівняно з ультразвуковими сенсорами.

Після виявлення об'єкта радарна система здійснює його супровід, визначаючи координати та швидкість руху. У більшості сучасних автомобільних радарів використовується моностатична конфігурація, у якій передавальна та приймальна антени об'єднані в єдину антенну систему. Саме такі радари становлять основу сучасних систем ADAS. У бістатичних радарах передавальна та приймальна антени розташовуються окремо.

Положення об'єкта визначається у сферичній системі координат, початок якої розташований у фазовому центрі антени радара. Напрямок основного випромінювання антени (boresight direction) приймається за вісь X (рис. 2.1). Просторове положення об'єкта характеризується: відстанню до цілі R (range); кутом азимуту θ ; кутом місця або кутом підвищення φ .

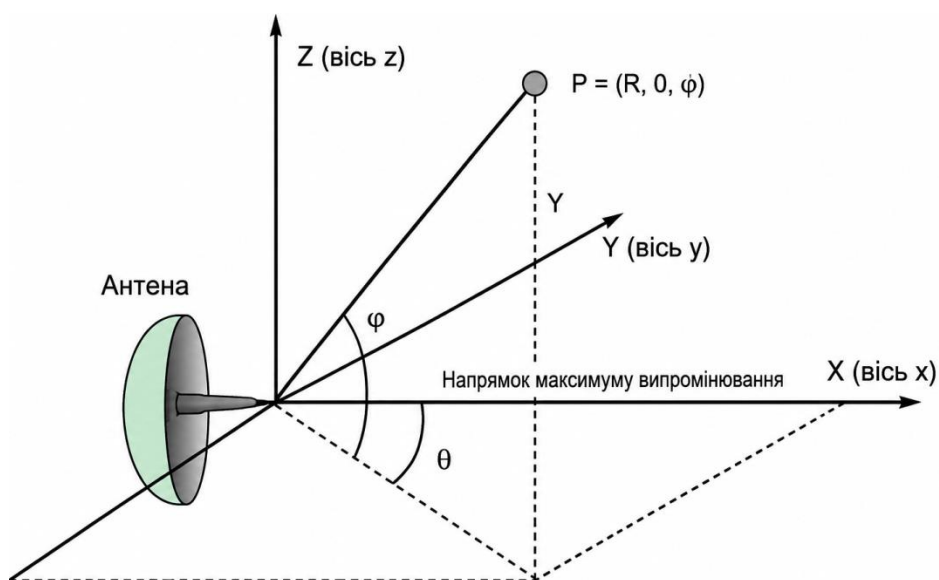


Рисунок 2.1 – Сферична координатна система для радарних вимірювань [10]

У більшості автомобільних систем адаптивного круїз-контролю кут місця може не враховуватися через порівняно незначні вертикальні зміни положення об'єктів.

Кутове положення цілі визначається шляхом аналізу параметрів

відбитого хвильового сигналу. Кут азимуту визначається як кут між напрямком основного випромінювання антени та прямою, що з'єднує фазовий центр антени з об'єктом. Відстань до цілі визначається як довжина прямої між фазовим центром антени та об'єктом.

На точність визначення координат можуть впливати температурні зміни, нестабільність живлення та флуктуації параметрів електромагнітних хвиль. Відносна похибка вимірювання відстані може становити приблизно 10–30 %. Для зменшення похибок у сучасних радарних системах застосовуються процедури калібрування та алгоритми компенсації впливу зовнішніх факторів.

Оцінювання швидкості руху об'єкта здійснюється на основі ефекту Доплера (рис. 2.2). Доплерівський ефект полягає у зміні частоти прийнятого сигналу внаслідок відносного переміщення джерела сигналу та приймача.

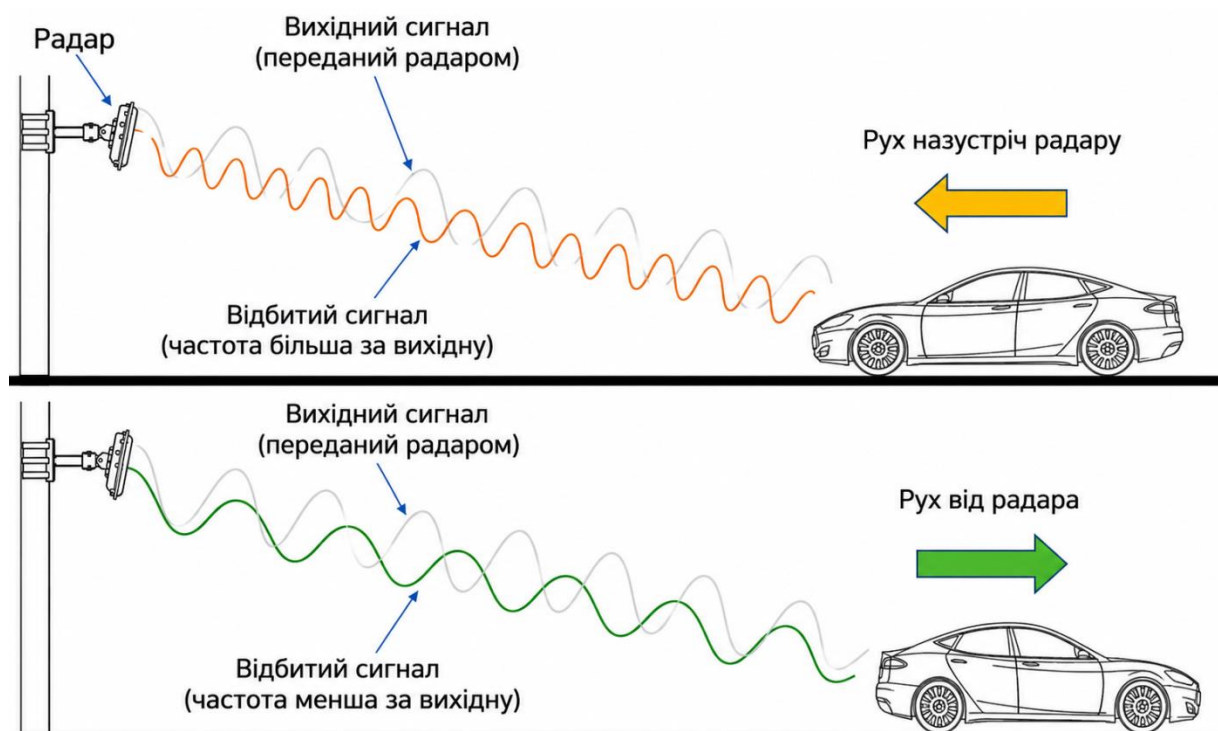


Рисунок 2.2 – Ефект Доплера [10]

Якщо об'єкт і радар залишаються нерухомими відносно один одного, частота прийнятого сигналу практично не відрізняється від частоти переданого сигналу. У разі віддалення об'єкта від радара частота відбитого сигналу зменшується, а довжина хвилі збільшується. Якщо об'єкт наближається до

радар, частота прийнятого сигналу збільшується, а довжина хвилі зменшується.

На основі вимірювання зміни частоти радар визначає радіальну складову швидкості об'єкта, тобто проєкцію швидкості на напрямок між радаром та ціллю. Доплерівський метод дозволяє визначати лише радіальну складову швидкості, однак аналіз послідовності вимірювань координат і швидкості дозволяє оцінювати траєкторію руху об'єкта у тривимірному просторі.

Крім визначення координат і швидкості об'єктів, радарні системи можуть використовуватися для формування двовимірних радіолокаційних зображень навколишнього середовища. Такі зображення застосовуються для навігації, аналізу дорожньої ситуації та створення карт місцевості. Проте просторове розділення радарних зображень поступається оптичним системам, тому радар не використовується як основний засіб формування візуального зображення в автомобільній електроніці. Водночас радарні системи мають важливу перевагу – здатність стабільно функціонувати за умов туману, опадів, пилу та недостатнього освітлення.

Однією з основних характеристик радарної системи є тип модуляції зондувального сигналу, який визначає спосіб отримання інформації про відстань та швидкість об'єктів.

Існує декілька основних типів радарних систем. За принципом формування сигналу вони поділяються на імпульсні радары та радары безперервного випромінювання (Continuous Wave, CW).

Імпульсні радары можуть бути недоплерівськими та доплерівськими.

Радары безперервного випромінювання поділяються на:

- немодульовані CW-радары;
- FMCW-радары (Frequency Modulated Continuous Wave);
- радары з частотною маніпуляцією;
- радары з розширеним спектром сигналу.

У сучасних автомобільних системах ADAS найбільшого поширення набули FMCW-радары, оскільки вони забезпечують одночасне визначення відстані до об'єкта та його швидкості при відносно невисокій складності

апаратної реалізації.

Сучасні автомобільні радары дедалі частіше використовують багатоканальні МІМО-антенні системи, цифрове формування променя та алгоритми машинного навчання для підвищення точності виявлення та класифікації об'єктів.

2.2 Принцип функціонування імпульсних радарних систем

Класичний імпульсний радар функціонує шляхом випромінювання короточасних електромагнітних імпульсів тривалістю від одиниць до десятків наносекунд з подальшим прийманням відбитих сигналів від об'єктів. Після передачі імпульсу система переходить у режим очікування відлуння, а час затримки між передачею та прийомом сигналу використовується для визначення відстані до цілі.

У недоплерівських імпульсних радарах інформація про швидкість руху об'єкта безпосередньо не вимірюється. Визначення швидкості можливе лише шляхом аналізу зміни координат об'єкта у часі на основі послідовних вимірювань відстані.

Типова імпульсна радарна система з кореляційним приймачем містить:

- генератор імпульсів;
- передавальний тракт;
- антенну систему;
- приймальний тракт;
- блок цифрової обробки сигналів.

Функціональні діаграми імпульсних радарів показано на рисунку 2.3.

Генератор імпульсів формує зондувальний сигнал, який через передавальний тракт подається на антену та випромінюється у навколишній простір. Електромагнітний сигнал, відбитий від об'єкта, приймається антеною та надходить до приймального тракту, де виконується його підсилення, фільтрація та подальша цифрова обробка.

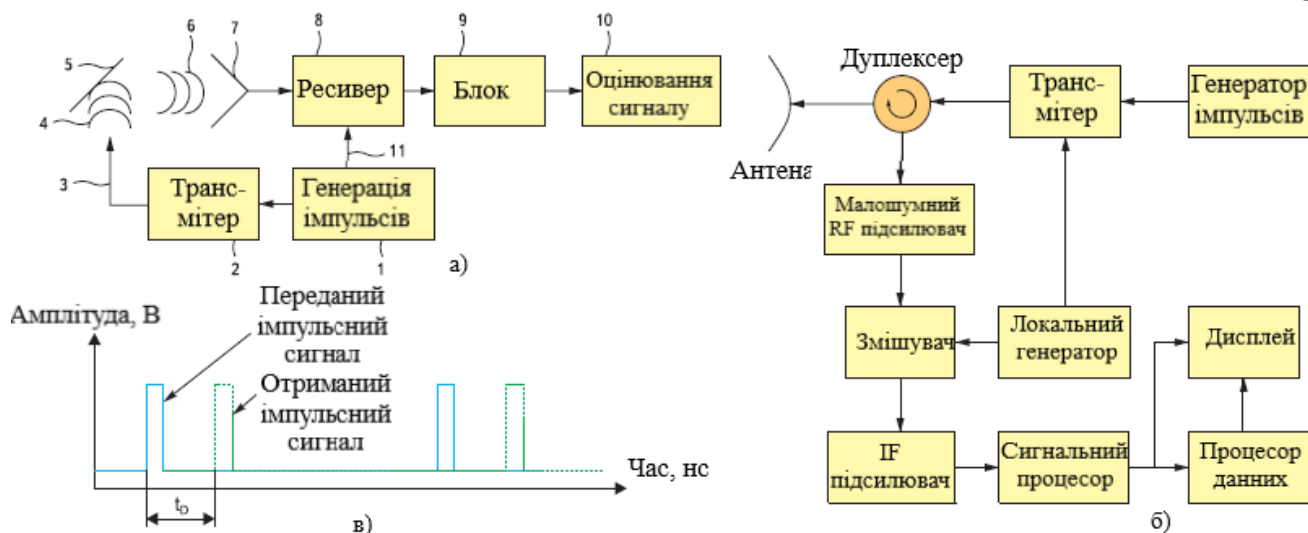


Рисунок 2.3 – Функціональні схеми та діаграми імпульсних радарів: а) радарна система з кореляційним ресивером; б) функціональна схема імпульсного моно статичного радара; в) часова діаграма імпульсного радара відстані

Особливістю кореляційного приймача є використання опорного сигналу, сформованого генератором імпульсів. Прийнятий відбитий сигнал порівнюється з опорним сигналом, у результаті чого визначається часова затримка між переданим та прийнятим імпульсом. На основі цієї затримки обчислюється відстань до об'єкта.

У більшості імпульсних радарів передавальна та приймальна системи працюють спільно через дуплексер, який також називають циркулятором або перемикачем T/R (Transmit / Receive). Дуплексер забезпечує почергове підключення антени до передавача або приймача. Під час передачі імпульсу антена підключається до передавального тракту, а після завершення передачі – до приймального тракту для приймання відбитого сигналу.

Приймальний тракт сучасного імпульсного радара зазвичай реалізується за супергетеродинною схемою. Першим каскадом приймача є малешумний підсилювач високої частоти (LNA – Low Noise Amplifier), який забезпечує підсилення слабких відбитих сигналів при мінімальному внесенні власних шумів.

Після підсилення сигнал проходить через один або декілька каскадів перетворення частоти, у яких за допомогою змішувачів та локальних

генераторів (LO – Local Oscillator) високочастотний сигнал переводиться у проміжну частоту IF (Intermediate Frequency), а далі – у базову смугу частот.

Після перетворення частоти сигнал надходить до сигнального процесора, який виконує:

- узгоджену фільтрацію;
- імпульсне стискання;
- доплерівську фільтрацію;
- інтеграцію сигналів;
- компенсацію руху;
- виявлення цілей.

Тип вихідної інформації визначається призначенням радарної системи. Радари виявлення формують набір параметрів об'єкта, слідкуючі радари забезпечують безперервний супровід координат і швидкості цілі, а радіолокаційні системи формування зображень генерують двовимірні або тривимірні радіолокаційні карти навколишнього середовища.

У ряді сучасних імпульсних радарів частина обробки сигналу виконується безпосередньо на проміжній частоті IF, що дозволяє зменшити обчислювальне навантаження на цифрову систему обробки.

Потужність передавачів імпульсних радарів може змінюватися у широких межах – від міліват до мегават залежно від сфери застосування системи.

Інтервал часу між двома сусідніми імпульсами називається інтервалом повторення імпульсів PRI (Pulse Repetition Interval), а величина, обернена до PRI, називається частотою повторення імпульсів PRF (Pulse Repetition Frequency). Значення PRF можуть змінюватися від одиниць імпульсів за секунду до десятків тисяч імпульсів за секунду.

Для імпульсних радарів характерний малий робочий цикл, який зазвичай не перевищує 1 %. Тривалість імпульсів може становити від кількох наносекунд до сотень мікросекунд, а в окремих системах – до одиниць мілісекунд.

Імпульсні радарні системи, призначені для одночасного виявлення декількох об'єктів, потребують широкосмугової та високошвидкісної цифрової

обробки сигналів.

Якщо часовий інтервал між переданими імпульсами є недостатнім, відбитий сигнал від віддаленого об'єкта може бути прийнятий уже після випромінювання наступного імпульсу. У такому випадку виникає неоднозначність визначення дальності. Максимальна однозначно вимірювана дальність радару визначається співвідношенням:

$$R_{max} = \frac{c}{2 \cdot PRF}, \quad (2.2)$$

де R_{max} – максимальна дальність;

c – швидкість світла;

PRF – частота повторення імпульсів.

Наприклад, часовий інтервал між імпульсами тривалістю 1 мкс дозволяє електромагнітному сигналу пройти приблизно 150 м до об'єкта та назад до приймача.

Для визначення швидкості руху об'єкта в імпульсних радарх застосовується доплерівський метод. Відносний рух об'єкта викликає зміну частоти відбитого сигналу порівняно з частотою переданого сигналу. Аналіз доплерівського зміщення дозволяє визначити радіальну складову швидкості цілі.

У сучасних радарних системах для аналізу доплерівського зміщення широко використовується швидке перетворення Фур'є (FFT – Fast Fourier Transform). FFT дозволяє визначати фазові зсуви між переданим та прийнятим сигналами, що забезпечує можливість оцінювання швидкості руху об'єкта та формування спектрального представлення сигналу.

2.3 Принцип функціонування FMCW-радарів у системах ADAS

Одним із найбільш поширених типів сучасних автомобільних радарів є радари з безперервним випромінюванням та частотною модуляцією – FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Саме цей тип радарів сьогодні

використовується у більшості систем ADAS, зокрема у системах адаптивного круїз-контролю (ACC), автоматичного екстреного гальмування (АЕВ), контролю сліпих зон та моніторингу дорожньої обстановки.

На відміну від класичних імпульсних радарів, які працюють шляхом почергової передачі та приймання коротких імпульсів, радары безперервного випромінювання (Continuous Wave, CW) здійснюють безперервне випромінювання гармонічного сигналу фіксованої частоти. Приймання відбитого сигналу також відбувається безперервно.

Основною перевагою CW-радарів є простота апаратної реалізації, оскільки відсутня необхідність у: високошвидкісному формуванні імпульсів; складній синхронізації передавального та приймального трактів; широкосмугових імпульсних підсилювачах. Перевагами FMCW-радарів також є: можливість одночасного визначення відстані та швидкості; відносно невисока складність апаратної реалізації; висока енергетична ефективність; компактність; можливість інтеграції у монолітні MMIC-мікросхеми; висока точність вимірювань; хороша завадостійкість.

Класичний CW-радар здатний визначати лише відносну швидкість об'єкта на основі доплерівського зміщення частоти. При цьому визначення відстані до об'єкта є неможливим, оскільки сигнал випромінюється безперервно та не містить часової прив'язки.

Для усунення цього недоліку в автомобільних радарних системах застосовується частотна модуляція безперервного сигналу, що реалізується у FMCW-радарх. У таких системах частота переданого сигналу змінюється у часі за визначеним законом, найчастіше – лінійним. Як правило, використовується трикутний або пилкоподібний закон зміни частоти.

У FMCW-радарі генератор формує високочастотний сигнал, частота якого плавно збільшується та зменшується протягом певного періоду часу. Такий сигнал називається chirp-сигналом або ЛЧМ-сигналом (лінійно-частотно-модульованим сигналом).

Принцип роботи FMCW-радара полягає у порівнянні переданого та прийнятого сигналів. Відбитий від об'єкта сигнал надходить до приймального

тракту із певною часовою затримкою, яка визначається відстанню до цілі. Після цього частина переданого сигналу змішується з прийнятим сигналом у змішувачі. У результаті формується так званий beat-сигнал – сигнал різницевої частоти.

Частота beat-сигналу містить інформацію про:

- відстань до об'єкта;
- відносну швидкість руху;
- кутове положення цілі.

Для цифрової обробки beat-сигнал оцифровується за допомогою аналого-цифрового перетворювача, після чого надходить до цифрового сигнального процесора. Подальша обробка сигналу виконується із застосуванням швидкого перетворення Фур'є (FFT), що дозволяє виділити спектральні компоненти сигналу та визначити параметри об'єктів.

У FMCW-радарх відстань до цілі визначається за частотою beat-сигналу, яка прямо пропорційна часовій затримці між переданим та прийнятим сигналами. Відносна швидкість об'єкта визначається на основі доплерівського зміщення частоти.

При використанні трикутної модуляції частоти радар формує сигнали зі зростаючою та спадною частотою. Порівняння beat-сигналів для висхідного та низхідного схилів дозволяє одночасно визначати дальність та швидкість об'єкта.

У сучасних автомобільних радарх FMCW часто застосовується багатосхилова модуляція (multi-slope FMCW), яка дозволяє підвищити точність вимірювання параметрів цілей та покращити роздільну здатність системи. У класичному FMCW-радарі використовується один ЛЧМ-сигнал із фіксованим нахилом частоти. У multi-slope FMCW система послідовно формує кілька chirp-сигналів з різними параметрами нахилу, що дозволяє точніше визначати дальність, швидкість та відокремлювати кілька цілей.

Наприклад, у системах адаптивного круїз-контролю компанії Robert Bosch використовується формування декількох лінійних частотних схилів із різною тривалістю та швидкістю зміни частоти. FMCW-радар передає

частотно-модульований сигнал для даного періоду оцінки порядком 1 мс, отримує відражене від об'єкта ехо і змішує частину переданого сигналу з отриманими в цей період оцінки для отримання так званого beat-сигнала, який оцифровується і піддається перетворенню Фур'є за допомогою, наприклад, цифрового сигнального процесора. За частотою та іншими характеристиками отриманого сигналу можуть бути вираховані основні параметри цілі – швидкість і відстань до неї, а також азимут. Відносно вихідної частоти beat-сигнала включає компоненти суми та різниці, які представляють собою тимчасову затримку, пропорційне розташування до цілі та доплерівський зсув, який є відносною швидкістю (рис. 2.4).

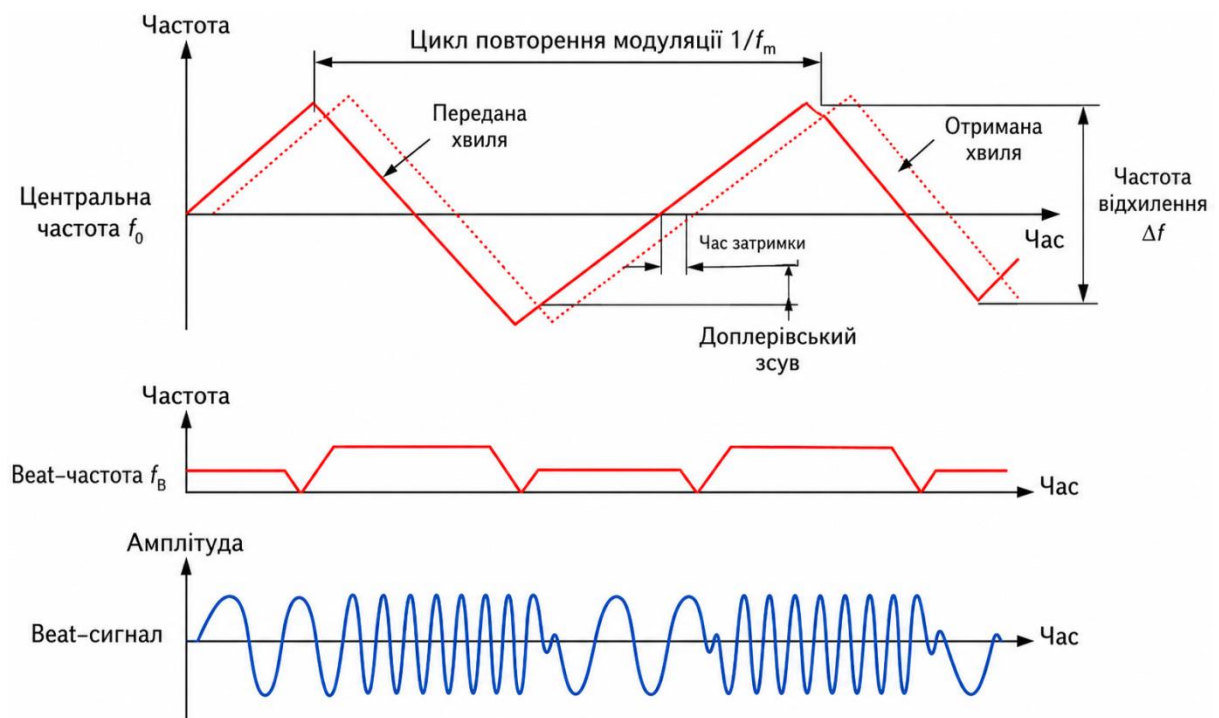


Рисунок 2.4 – Модулювання несучої частоти трикутною хвилею у FMCW радарях

Типовий цикл роботи FMCW-радару становить близько 1 мс. Протягом цього часу радар:

1. Формує та випромінює ЛЧМ-сигнал:

$$f(t) = f_0 + kt, \quad (2.3)$$

де f_0 – початкова частота;

k – швидкість зміни частоти;

t – час.

2. Приймає відбитий сигнал.
3. Виконує змішування сигналів.
4. Формує beat-сигнал.
5. Здійснює аналого-цифрове перетворення.
6. Виконує спектральний аналіз.

У сучасних радарних системах обробка сигналів виконується за допомогою DSP-процесорів або спеціалізованих ASIC-мікросхем.

Для визначення кутового положення об'єктів сучасні FMCW-радары використовують багатоканальні антенні системи типу MIMO (Multiple Input Multiple Output). Використання декількох передавальних та приймальних каналів дозволяє реалізувати цифрове формування діаграми спрямованості та підвищити роздільну здатність за азимут.

Сучасні автомобільні FMCW-радары здатні: одночасно супроводжувати десятки об'єктів; формувати 3D та 4D хмари точок; оцінювати висоту об'єктів; виконувати класифікацію транспортних засобів, пішоходів та перешкод.

Очікується, що наступні покоління автомобільних радарів забезпечуватимуть ще вищу роздільну здатність, більшу дальність виявлення та можливість реалізації кооперативної взаємодії між транспортними засобами в системах V2X та автономного керування.

FMCW-радары стали базовою технологією для сучасних автомобільних систем міліметрового діапазону 24 ГГц та 77 ГГц.

РОЗДІЛ 3

СХЕМНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА АНАЛІЗ ФУНКЦІОНУВАННЯ ОБ'ЄКТА ПРОЄКТУВАННЯ

3.1 Архітектура та особливості функціонування автомобільного FMCW-радара

Одним із сучасних прикладів інтегрованих автомобільних радарних систем міліметрового діапазону є проєкт TIDEP-01011 компанії Texas Instruments, побудований на базі однокристального FMCW-радара AWR1843. Модуль AWR1843 являє собою інтегроване однокристальне рішення для автомобільних радарів діапазону 76...81 ГГц. На одному кристалі реалізовано високочастотний FMCW-приймач-передавач, цифровий сигнальний процесор TI C674x, мікроконтролер ARM Cortex-R4F, апаратний прискорювач обробки сигналів HWA, аналого-цифрові перетворювачі та генератори PLL. Такий рівень інтеграції дозволяє суттєво зменшити габарити системи, енергоспоживання та складність побудови автомобільного радара.

Демонстраційна система реалізована на базі оціночного модуля AWR1843BOOST, який містить три передавальні та чотири приймальні антени, вбудовані інтерфейси UART і JTAG, а також систему живлення та програмування (рис. 3.1). Радіолокаційний модуль забезпечує виявлення об'єктів на відстанях від 4 см до 40 м у секторі огляду $\pm 50^\circ$ за азимутом та $\pm 15^\circ$ за кутом місця.

Модуль містить вбудовані засоби програмування та налагодження, що дозволяє виконувати розроблення програмного забезпечення без використання зовнішніх емуляторів. Для реалізації базового інтерфейсу користувача на платі передбачені кнопки керування та світлодіодні індикатори.

Завдяки використанню стандартних 20-контактних роз'ємів BoosterPack модуль сумісний із широким спектром мікроконтролерних платформ TI LaunchPad, що значно спрощує створення прототипів та інтеграцію додаткових периферійних модулів.

До основних характеристик оціночного модуля AWR1843BOOST

належать: наявність двох 20-контактних роз'ємів LaunchPad; вбудований інтерфейс емуляції JTAG на базі XDS110 для програмування та налагодження; підтримка програмування зовнішньої QSPI Flash-пам'яті; UART-інтерфейс для передачі даних та реєстрації результатів обробки сигналів; інтегрована антена міліметрового діапазону; високошвидкісний 60-контактний роз'єм високої щільності для передачі необроблених даних АЦП через інтерфейс LVDS; вбудований CAN-FD приймач для інтеграції в автомобільні мережі; кнопка керування та світлодіодні індикатори стану; живлення від зовнішнього джерела постійної напруги 5 В.

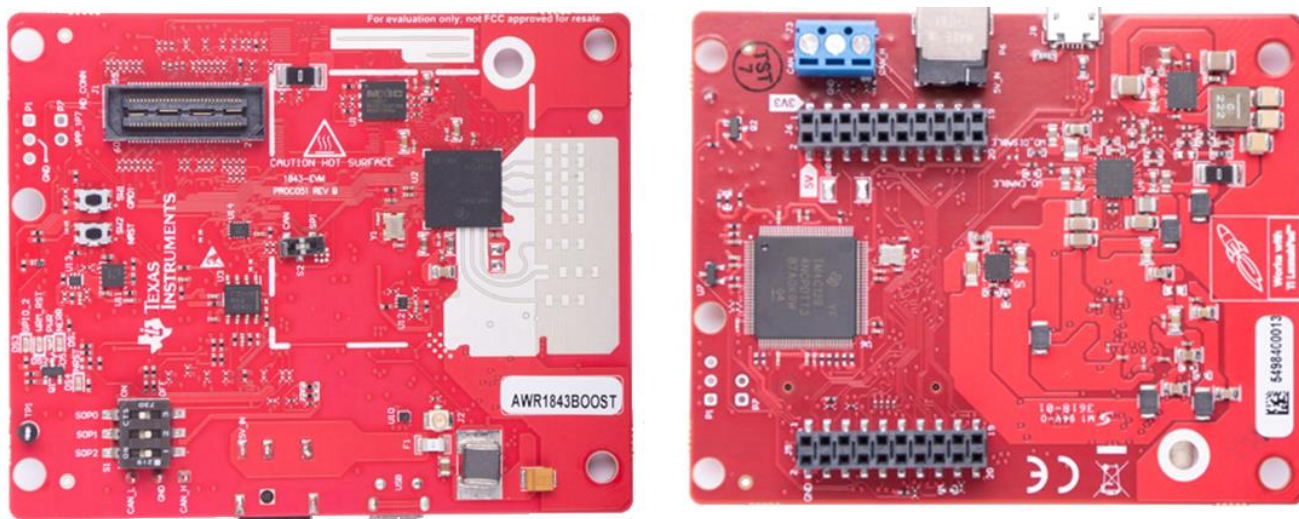


Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд модуля AWR1843BOOST

Даний проєкт демонструє можливості використання радарного сенсора міліметрового діапазону 77 ГГц та орієнтований насамперед на застосування у системах автоматизованого паркування, допомоги при паркуванні, попередження про перехресний рух та системах запобігання зіткненням. Однією з ключових переваг mmWave-радарів є можливість їх прихованого встановлення за пластиковими елементами кузова без необхідності створення додаткових отворів у бамперах. Це забезпечує не лише покращення зовнішнього вигляду транспортного засобу, але й підвищує надійність системи.

Важливою особливістю радарних датчиків Texas Instruments є підтримка мультимодальної роботи. Один і той самий радарний модуль може виконувати

різні функції залежно від режиму руху автомобіля. Наприклад, під час руху транспортного засобу задні бокові радары можуть використовуватися для контролю сліпих зон, а в режимі паркування – для контролю навколишнього простору та автоматизованого маневрування. Такий підхід дозволяє зменшити кількість необхідних сенсорів для формування системи кругового огляду 360°.

Радар AWR1843 використовує принцип FMCW-радіолокації з формуванням лінійно-частотно-модульованих сигналів. Переданий chirp-сигнал після відбиття від об'єкта приймається антенною системою та змішується з опорним сигналом. У результаті формується beat-сигнал, параметри якого містять інформацію про дальність до цілі, доплерівське зміщення та кутове положення об'єкта.

Повна цифрова обробка радіолокаційної інформації виконується безпосередньо на борту пристрою за допомогою DSP-процесора C674x та апаратного прискорювача HWA. Процес обробки включає декілька послідовних етапів. На першому етапі виконується обробка дальності, що включає виконання сигналу та одновимірне швидке перетворення Фур'є (1D FFT) для кожного приймального каналу. Даний етап забезпечує визначення дальності до об'єктів.

На рисунку 3.2 представлена реалізація автоматизованого процесу обробки паркування. Вона складається з наступних блоків, реалізованих як код DSP, що виконується на ядрі C674x мікропроцесора AWR1843.

Наступним етапом є доплерівська обробка, у межах якої здійснюється двовимірне виконання та двовимірне швидке перетворення Фур'є (2D FFT). Це дозволяє оцінити швидкість руху об'єктів та сформувати дальнісно-доплерівське представлення сцени.

Для автоматичного виявлення цілей використовуються алгоритми CFAR (Constant False Alarm Rate), зокрема CASO-CFAR та CA-CFAR. Дані алгоритми дозволяють підтримувати сталу ймовірність хибної тривоги незалежно від рівня шумів та завад у системі.

Після виявлення цілей виконується оцінювання кутових координат. Для цього використовується алгоритм цифрового формування променя

(beamforming), який дозволяє визначити азимутальне положення та кут місця об'єкта. Подальша обробка забезпечує формування тривимірної хмари точок навколишнього середовища.

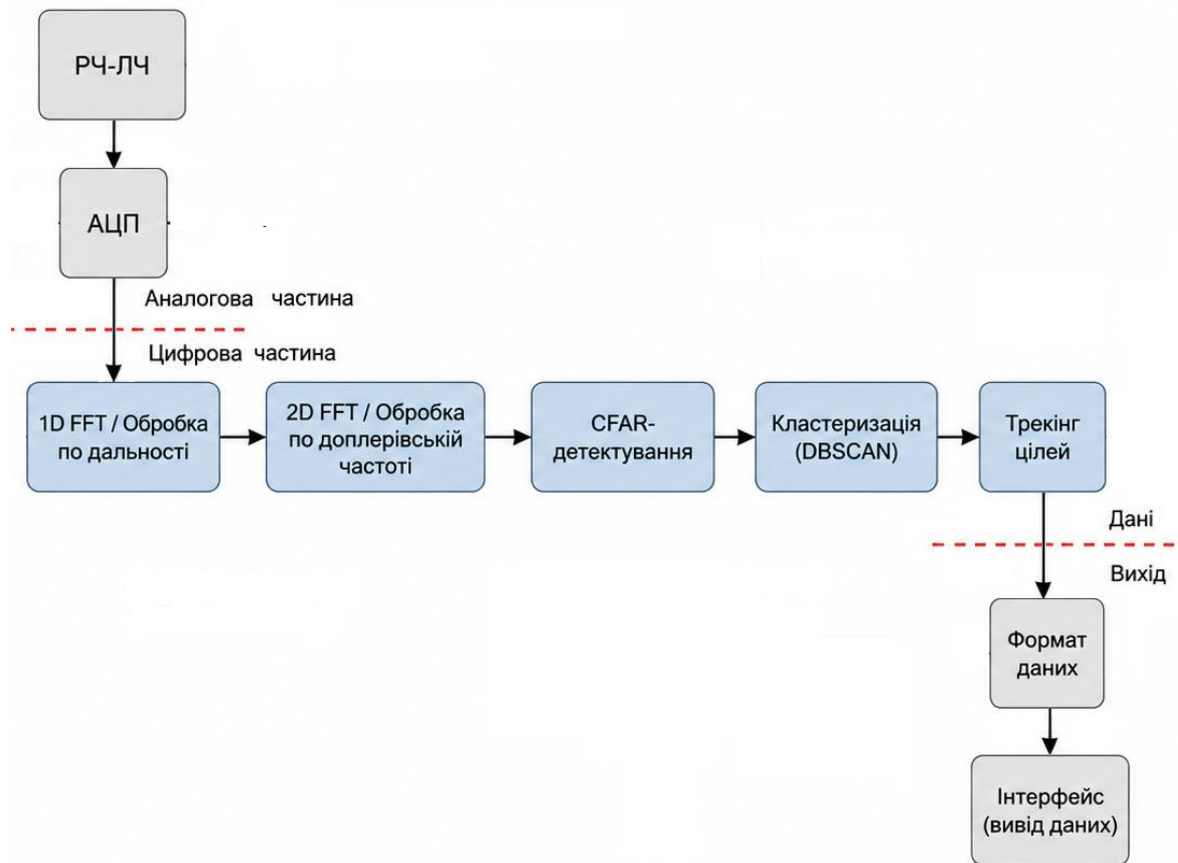


Рисунок 3.2 – Блок-схема технічної реалізації TIDEP-01011

Для групування окремих відбиттів у реальні фізичні об'єкти використовується алгоритм кластеризації DBSCAN. У результаті система формує інформацію про просторове положення, розміри та кількість виявлених об'єктів. Результати обробки передаються через UART-інтерфейс на зовнішній комп'ютер для подальшої візуалізації та аналізу.

Однією з найважливіших особливостей системи є використання технології TDM-MIMO (Time Division Multiplexing Multiple Input Multiple Output). Передавальні антени працюють по черговому, що дозволяє сформувати віртуальну антенну решітку з дванадцяти каналів. Такий підхід забезпечує значне підвищення кутової роздільної здатності без збільшення фізичних розмірів антенної системи.

У сформованому віртуальному масиві реалізовано вісім антен в азимутальній площині та чотири антени у площині кута місця. Завдяки цьому система здатна не лише визначати дальність і швидкість об'єктів, але й оцінювати їх просторове положення у тривимірному просторі.

Основними технічними характеристиками системи TIDEP-01011 є максимальна дальність виявлення до 40 м, роздільна здатність за дальністю 0,175 м, максимальна вимірювана швидкість 8,33 м/с та роздільна здатність за швидкістю 0,131 м/с. Важливими параметрами радарної системи також є поле зору, кутова роздільна здатність та точність оцінювання координат об'єктів.

3.2 Мікросхема AWR1843

Пристрій побудований на основі енергоефективної 45-нм RFCMOS-технології компанії Texas Instruments, що забезпечує реалізацію монолітної радарної системи з трьома передавальними каналами (3TX) та чотирма приймальними каналами (4RX). До складу мікросхеми інтегровано фазові автопідстроювачі частоти (PLL), аналого-цифрові перетворювачі (ADC), радіочастотний тракт та цифрові модулі обробки сигналів.

Однією з ключових особливостей AWR1843 є наявність високопродуктивної підсистеми цифрової обробки сигналів на базі DSP-процесора TI C674x, який виконує операції радіолокаційної обробки даних у реальному часі. DSP-процесор реалізує алгоритми швидкого перетворення Фур'є (FFT), доплерівської обробки, виявлення цілей, оцінювання координат та інших функцій цифрової обробки FMCW-сигналів.

Для конфігурації та керування радіочастотною частиною в мікросхемі передбачена спеціалізована підсистема BIST (Built-In Self-Test), яка забезпечує автоматичне налаштування, контроль та калібрування радарного тракту. Це дозволяє підвищити стабільність роботи системи та зменшити вплив температурних і технологічних відхилень параметрів компонентів.

Крім DSP-процесора, до складу AWR1843 інтегровано програмований мікроконтролер ARM Cortex-R4F, який використовується для реалізації

автомобільних інтерфейсів, керування периферією та виконання високорівневих функцій системи. Така архітектура забезпечує розподіл обчислювального навантаження між цифровою обробкою сигналів та системними задачами керування.

Для підвищення продуктивності обчислень у мікросхемі реалізовано апаратний прискорювач HWA (Hardware Accelerator), який виконує частину операцій обробки радарних сигналів апаратними засобами. Використання HWA дозволяє зменшити навантаження на DSP-процесор та вивільнити обчислювальні ресурси для реалізації алгоритмів вищого рівня, зокрема кластеризації, трекінгу та класифікації об'єктів.

Архітектура AWR1843 підтримує можливість динамічної реконфігурації параметрів радара, що дозволяє реалізовувати багаторежимні сенсорні системи короткого, середнього та дальнього радіуса дії в межах одного апаратного рішення. Зміна параметрів FMCW-сигналу, структури кадру та режимів роботи забезпечує адаптацію сенсора до різних сценаріїв застосування

Блок-схема (рис. 3.3) відображає архітектуру однокристального чіпа радіолокаційної системи AWR1843, яка поєднує радіочастотний тракт, підсистему цифрової обробки сигналів, мікроконтролер та інтерфейси обміну даними. Основним призначенням системи є формування, приймання та обробка FMCW-сигналів у діапазоні 76–81 ГГц для реалізації автомобільних радарів систем ADAS.

Функціонування системи починається з радіочастотної (RF/аналогової) підсистеми. Передавальні антени формують лінійно-частотно-модульований сигнал (chirp), який генерується синтезатором частоти Synth та блоком Ramp Generator. Сигнал проходить через підсилювачі потужності PA та випромінюється в простір через три передавальні антени. Після відбиття від об'єкта електромагнітна хвиля приймається чотирма приймальними антенами.

Прийнятий сигнал надходить до малошумних підсилювачів LNA, де здійснюється первинне підсилення слабкого відбитого сигналу. Далі сигнал потрапляє у змішувачі, де виконується перетворення частоти шляхом змішування прийнятого та опорного сигналів. У результаті формується сигнал

проміжної частоти IF, який містить інформацію про дальність та швидкість об'єкта. Після цього сигнал оцифровується аналого-цифровими перетворювачами ADC.

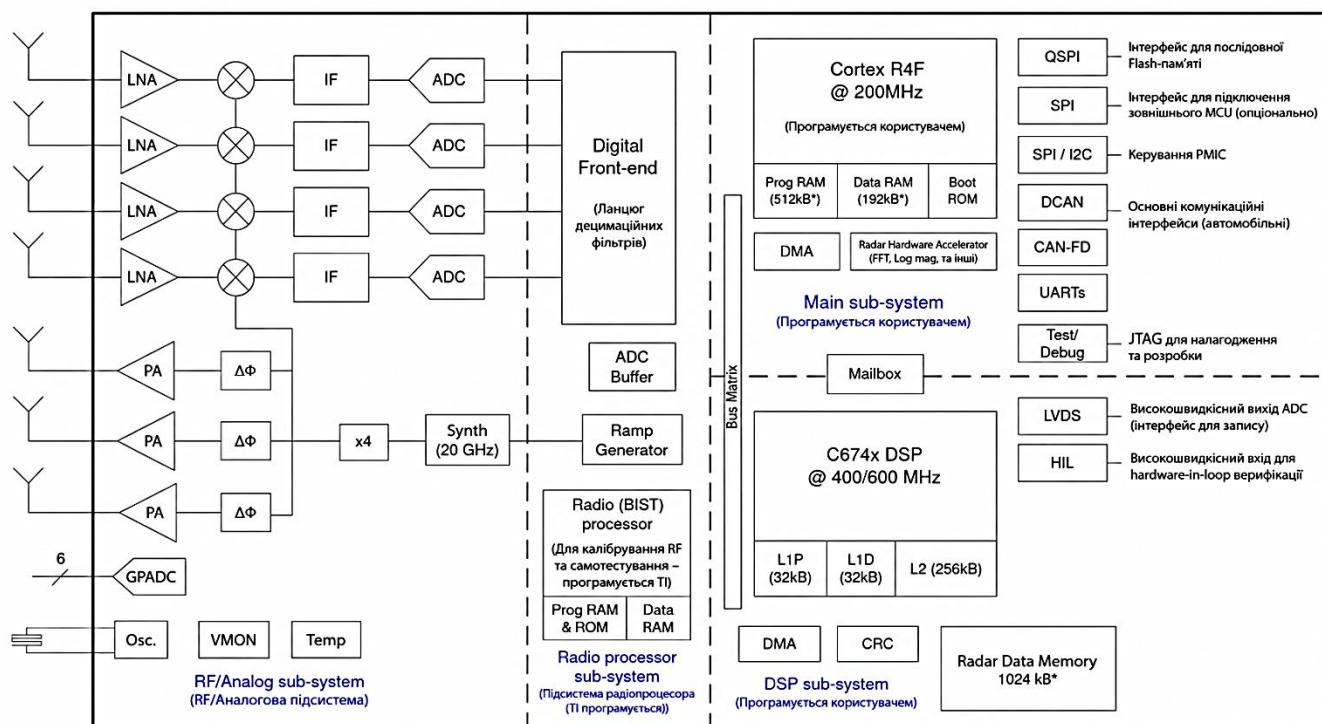


Рисунок 3.3 – Блок-схема AWR1843

Оцифровані дані передаються до цифрового фронтенду Digital Front-end, у якому виконується децимація та попередня цифрова фільтрація сигналів. Буфер ADC Buffer забезпечує тимчасове збереження вибірок АЦП перед їх подальшою обробкою.

Важливу роль у роботі системи виконує підсистема радіопроцесора Radio (BIST) processor. Даний блок відповідає за калібрування радіочастотних трактів, самотестування системи та контроль стабільності параметрів радіолокатора. Це дозволяє підтримувати необхідну точність вимірювань у процесі роботи радара.

Центральною частиною цифрової обробки є сигнальний процесор C674x DSP. DSP виконує математичну обробку радіолокаційних сигналів, зокрема швидке перетворення Фур'є (FFT), формування карти «дальність-швидкість», фільтрацію перешкод, виявлення цілей та оцінювання їх координат. Для

прискорення обчислень використовується апаратний прискорювач Radar Hardware Accelerator, який реалізує FFT та інші операції цифрової обробки.

Підсистема Main subsystem на базі процесора Cortex R4F забезпечує керування всією системою, конфігурування режимів роботи радара, взаємодію з автомобільними електронними системами та передачу результатів обробки. Обмін даними між підсистемами виконується через внутрішню системну шину Bus Matrix та механізми DMA, що забезпечують швидке переміщення великих обсягів даних без значного навантаження на процесор.

Для зовнішнього обміну інформацією передбачені інтерфейси SPI, UART, CAN-FD, LVDS та JTAG. Інтерфейс CAN-FD використовується для інтеграції радара в електронну систему автомобіля, UART – для передачі діагностичної інформації та даних обробки, а LVDS забезпечує високошвидкісне передавання необроблених даних АЦП.

Архітектура AWR1843 реалізує повний цикл роботи автомобільного FMCW-радара – від генерації та випромінювання ЛЧМ-сигналу до цифрової обробки відбитих сигналів та формування інформації про положення, швидкість і напрямок руху об'єктів у зоні контролю.

3.3 Блок-схема та електрична схеми модуля AWR1843BOOST

Розглянемо блок-схему модуля AWR1843BOOST (рис. 3.4) та електричну схему підключення модуля AWR1843BOOST. Подана блок-схема ілюструє функціонування радарного модуля на основі мікросхеми AWR1843. Центральним елементом системи є мікросхема AWR1843, яка виконує формування, приймання та цифрову обробку радіолокаційних сигналів.

Живлення системи здійснюється від зовнішнього джерела напругою 5 В, що подається через роз'єм JACK/MCU. Далі напруга надходить на імпульсний перетворювач LM53635 Buck, який формує стабілізовану напругу 3,3 В. Наступний перетворювач LP87702 Buck/Boost генерує декілька рівнів живлення, необхідних для роботи внутрішніх вузлів радарного чипа. Лінійний стабілізатор TPS7A53 LDO забезпечує низький рівень шумів для чутливих

аналогових та високочастотних кіл. Через LC-фільтри формуються напруги 1,8 В, 1,2 В, 1,0 В та 3,3 В, які подаються на відповідні блоки AWR1843. Додатково може використовуватись опційний стабілізатор VPP LDO для формування напруги 1,7 В.

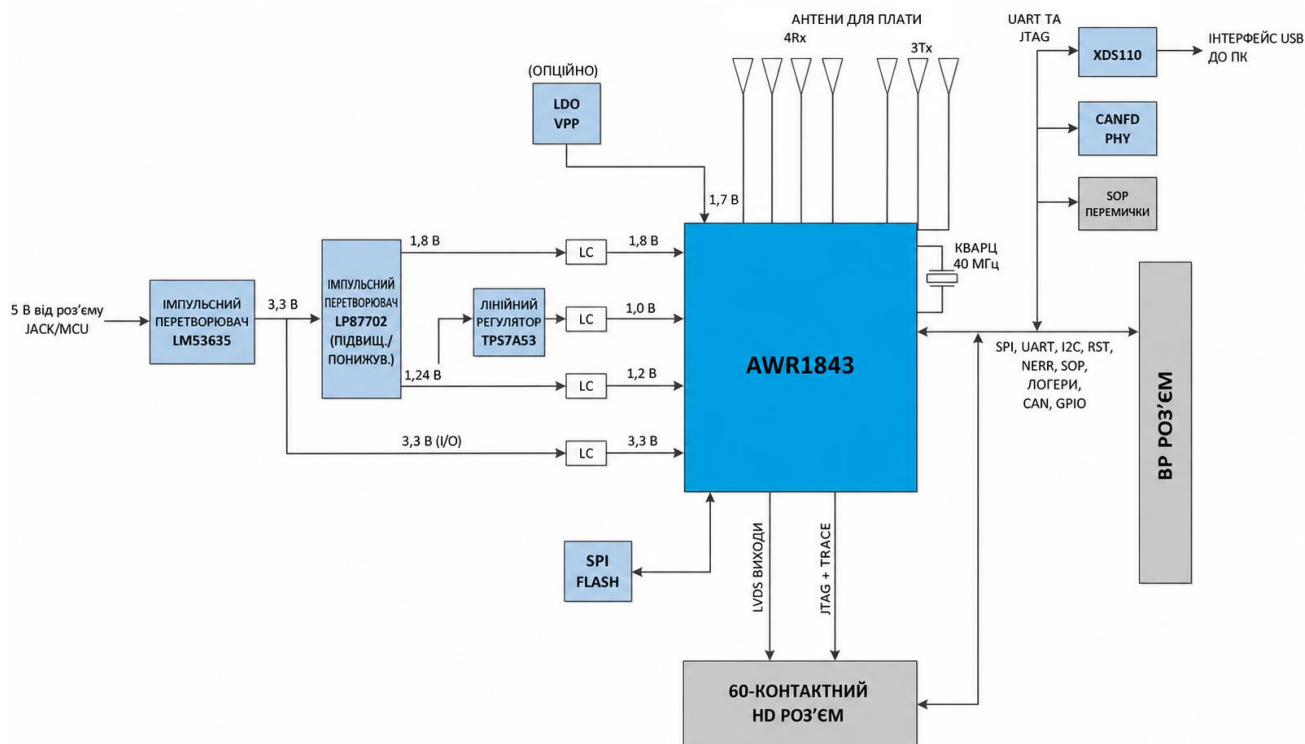


Рисунок 3.4 – Блок-схема модуля AWR1843BOOST

Мікросхема AWR1843 містить вбудований радіочастотний тракт та забезпечує роботу з антенними системами. До неї підключені антени типу 4Rx (чотири приймальні канали) та 3Tx (три передавальні канали), що дозволяє реалізувати багатоканальний FMCW-радар із просторовою обробкою сигналів. Для синхронізації роботи використовується кварцовий резонатор частотою 40 МГц.

Передача та приймання даних між мікросхемою та зовнішніми пристроями реалізується через інтерфейси SPI, UART, I2C, CAN, GPIO, а також сигнали керування RST, NERR та SOP. Для програмування та налагодження системи використовується модуль XDS110, який забезпечує інтерфейс UART/JTAG та підключення до персонального комп'ютера через USB.

Для роботи з автомобільними мережами застосовується фізичний

інтерфейс CANFD PHY, який забезпечує підтримку високошвидкісного протоколу CAN FD. Конфігурація режимів запуску здійснюється за допомогою SOP перемичок.

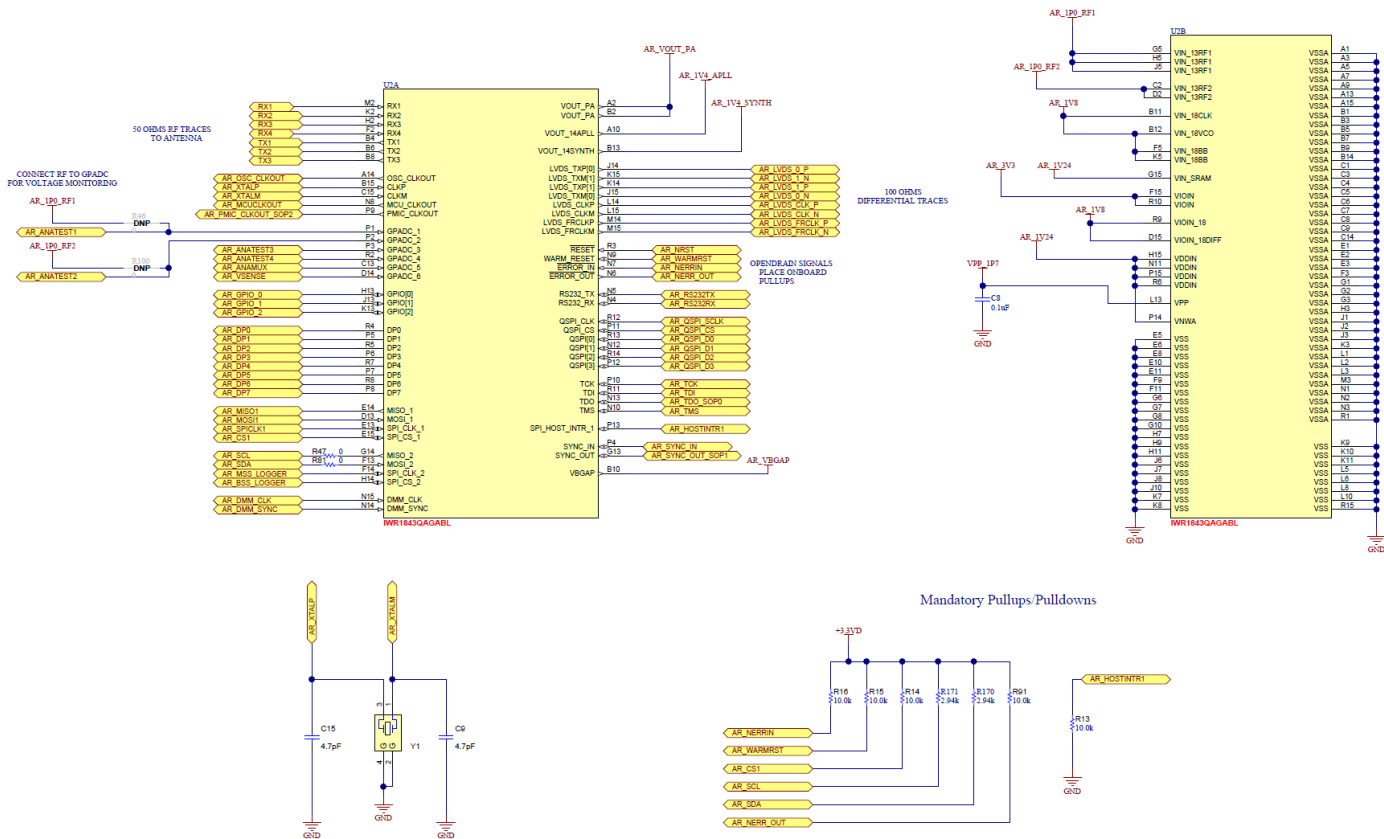


Рисунок 3.5 – Схема підключення модуля AWR1843BOOST

Зберігання програмного коду та службових даних виконується у зовнішній пам'яті QSPI Flash, яка підключена до AWR1843. Для підключення додаткових модулів або високошвидкісної передачі даних використовується 60-контактний HD-роз'єм, через який доступні інтерфейси LVDS, JTAG та інші сигнали трасування.

Блок-схема демонструє повноцінну архітектуру автомобільного міліметрового FMCW-радару, що поєднує підсистеми живлення, радіочастотної обробки, антенний тракт, цифрову обробку сигналів, пам'ять та комунікаційні інтерфейси.

Схема функціонує як інтегрована автомобільна FMCW-радарна система, у якій усі основні вузли формування, приймання та цифрової обробки

радіолокаційних сигналів реалізовані всередині мікросхеми AWR1843ABL. Робота системи починається з формування опорного тактового сигналу кварцовим генератором Y1, який забезпечує синхронізацію внутрішніх блоків мікросхеми, зокрема PLL-синтезатора, цифрових процесорів та радіочастотного тракту.

Після подачі живлення на відповідні шини живлення 1,0 В, 1,8 В, 1,24 В та 3,3 В внутрішні стабілізатори та вузли керування ініціалізують роботу радарного чипа. Сигнали SOP0 та SOP1 визначають режим запуску мікросхеми – функціональний режим, режим налагодження або режим програмування Flash-пам'яті. Після завершення ініціалізації активується радіочастотний тракт.

Передавальна частина радара формує лінійно-частотно-модульовані FMCW chirp-сигнали у діапазоні 76–81 ГГц. Сформовані сигнали через передавальні канали TX1–TX3 надходять до антенної системи та випромінюються у простір. У режимі TDM-MIMO передавачі активуються по чергово, що дозволяє формувати віртуальну антенну решітку та підвищувати кутову роздільну здатність системи.

Електромагнітні хвилі після відбиття від об'єктів повертаються до приймальних антен RX1–RX4. Приймальні сигнали надходять до малошумних підсилювачів LNA, де виконується первинне підсилення слабких відбитих сигналів. Далі сигнали змішуються із копією переданого chirp-сигналу, внаслідок чого формується сигнал проміжної частоти IF. Частота цього сигналу містить інформацію про дальність до об'єкта та його відносну швидкість.

Після аналогової обробки сигнали IF надходять до аналого-цифрових перетворювачів ADC, де виконується дискретизація та перетворення сигналів у цифрову форму. Отримані цифрові відліки тимчасово записуються у буфери ADC Buffer, після чого за допомогою контролера EDMA передаються до DSP-процесора без навантаження центрального ядра.

Цифровий сигнальний процесор C674x виконує основну математичну обробку радарної інформації. На цьому етапі реалізуються алгоритми швидкого перетворення Фур'є FFT, формування карти дальності та швидкості, доплерівська обробка, фільтрація шумів та виявлення цілей. Для визначення

координат об'єктів використовуються алгоритми формування променя та обробки сигналів від віртуальної антенної решітки.

Отримані результати обробки передаються через внутрішню шину даних до підсистеми ARM Cortex-R4F, яка відповідає за високорівневе керування системою, конфігурацію режимів роботи та взаємодію із зовнішніми пристроями. Передача службової інформації, телеметрії та результатів обробки може здійснюватися через інтерфейси UART, SPI або CAN-FD.

Для високошвидкісної передачі сирих радіолокаційних даних використовується диференційний інтерфейс LVDS, який дозволяє передавати великі обсяги інформації до зовнішніх систем запису та аналізу, наприклад DCA1000.

Система також містить блоки самодіагностики та моніторингу живлення, зокрема GPADC, сигнали контролю помилок NERR та систему апаратного скидання NRST. Завдяки цьому забезпечується стабільність функціонування радарної системи в умовах автомобільного середовища та підвищується надійність роботи ADAS-комплексів.

Базова схема системи живлення модуля AWR1843BOOST забезпечує формування, стабілізацію та контроль усіх напруг живлення, необхідних для функціонування радарної системи AWR1843 (рис. 3.6). Робота схеми починається з подачі зовнішньої напруги 5 В через роз'єм P6. Вхідна напруга проходить через запобіжник F1, який виконує функцію захисту плати від перевантаження по струму та короткого замикання. Після цього напруга надходить до системи фільтрації, утвореної конденсаторами C79, C26, C21, C23, C25 та C27, які зменшують пульсації та високочастотні завади у вхідному колі живлення.

Далі напруга VIN подається на імпульсний понижувальний перетворювач U8 типу LM53635. Даний вузол виконує перетворення вхідної напруги 5 В у стабілізовану напругу 3,3 В. У середині мікросхеми реалізований високочастотний ключовий перетворювач, робота якого базується на широтно-імпульсній модуляції. У процесі роботи транзисторні ключі періодично накопичують енергію в дроселі L1 та передають її до навантаження.

Конденсатори C29–C31 згладжують вихідні пульсації та формують стабільну шину живлення 3V3.

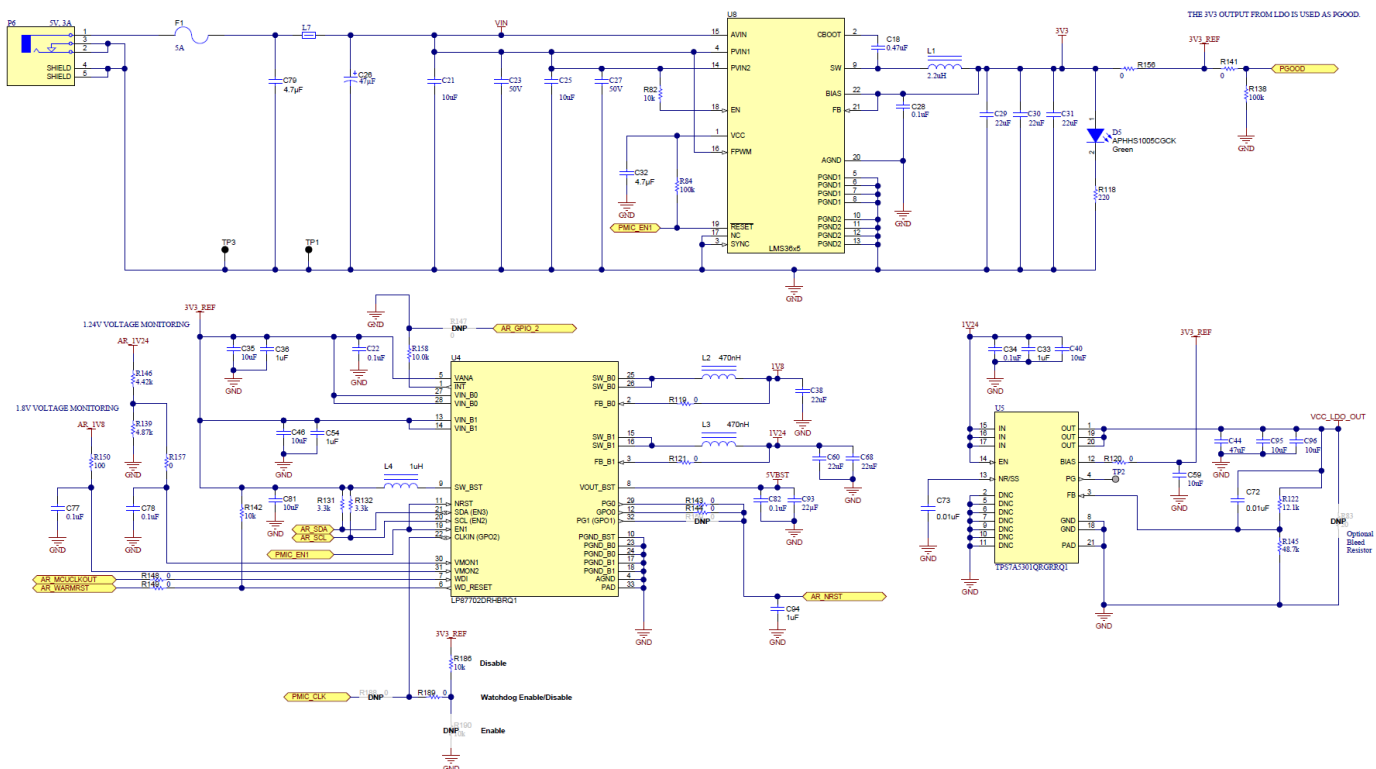


Рисунок 3.6 – Базова схема системи живлення модуля AWR1843BOOST

Після стабілізації напруги формується сигнал PGOOD, який свідчить про нормальний режим роботи джерела живлення. Даний сигнал використовується для синхронізації запуску інших вузлів системи та дозволяє запобігти запуску радара при нестабільному живленні.

Сформована напруга 3,3 В використовується як основне джерело живлення для цифрових вузлів плати, а також надходить до мікросхеми керування живленням U4 типу LP87702D. Дана мікросхема виконує функцію PMIC (Power Management IC) та формує декілька додаткових стабілізованих напруг, необхідних для роботи радіочастотних та цифрових блоків AWR1843.

За допомогою імпульсних перетворювачів усередині PMIC формуються напруги 1,8 В та 1,24 В. Напруга 1,8 В використовується для живлення цифрової логіки, DSP-процесора, ARM-ядра та інтерфейсних блоків. Напруга 1,24 В призначена переважно для живлення високочастотних вузлів, PLL-синтезатора, генераторів та радіочастотного тракту.

У процесі перетворення енергії використовуються дроселі L2 та L3, які разом із конденсаторами C38, C60 та C68 утворюють LC-фільтри. Вони забезпечують зменшення пульсацій, стабілізацію струму та зниження рівня електромагнітних завад у високочастотних колах.

Для живлення найбільш чутливих радіочастотних вузлів застосовується додатковий малошумний LDO-стабілізатор U5 типу TPS7A301. На відміну від імпульсних перетворювачів, LDO формує живлення з мінімальним рівнем шумів та пульсацій, що особливо важливо для стабільної роботи PLL, VCO, ADC та генератора FMCW chirp-сигналів.

Система також реалізує контроль напруг живлення за допомогою резистивних дільників та ліній моніторингу AR_1V24 і AR_1V8. Це дозволяє контролювати стан джерел живлення та виконувати внутрішню діагностику системи. У випадку виникнення нестабільності або аварійного режиму може бути активований сигнал скидання AR_NRST, який забезпечує перезапуск радара.

Окрему роль у роботі схеми виконує вузол Watchdog Enable / Disable, який дозволяє активувати або деактивувати систему апаратного контролю зависання мікросхеми. Це підвищує надійність функціонування системи в умовах автомобільного середовища.

3.4 Теоретичні основи проєктування радарної системи та параметри FMCW-сенсора

Радарний сенсор AWR1843 є інтегрованою FMCW-радарною системою, що поєднує високошвидкісний радіочастотний фронтенд, мікроконтролер ARM Cortex-R4F та цифровий сигнальний процесор TI C674x DSP для реалізації алгоритмів цифрової обробки сигналів у реальному часі. Така архітектура забезпечує можливість побудови компактних автомобільних радарних систем для застосувань ADAS, автоматизованого паркування та моніторингу навколишнього середовища.

Конфігурація радарного фронтенду AWR1843 визначається параметрами

передаваного ЛЧМ-сигналу, характеристиками радіочастотного приймально-передавального тракту, геометрією антенної решітки, а також доступними обчислювальними ресурсами та обсягом пам'яті. Сукупність цих параметрів безпосередньо впливає на основні характеристики радіолокаційної системи.

Одним із ключових параметрів є максимальна дальність виявлення. У FMCW-радарі дальність до об'єкта визначається за beat-частотою, що формується після змішування переданого та відбитого сигналів. Значення beat-частоти пропорційне часу проходження електромагнітної хвилі до об'єкта та назад. Для заданого нахилу частотної розгортки chirp-сигналу максимальна теоретична дальність визначається максимальною beat-частотою, яку здатний обробити приймальний тракт радара. Практична дальність залежить від співвідношення сигнал/шум (SNR) та порогового рівня детектування.

Важливою характеристикою є роздільна здатність за дальністю, яка визначає мінімальну відстань між двома цілями, за якої радар здатний розпізнати їх як окремі об'єкти. Даний параметр залежить від ширини смуги частот ЛЧМ-сигналу. Зі збільшенням смуги частот chirp-сигналу підвищується точність просторового розділення об'єктів.

Точність вимірювання дальності залежить від рівня шумів у системі та значення SNR прийнятого сигналу. Із підвищенням співвідношення сигнал/шум зменшується дисперсія похибки визначення координат об'єкта.

Радар AWR1843 забезпечує також вимірювання радіальної швидкості цілей. Визначення швидкості здійснюється шляхом аналізу фазового зсуву dechirped-сигналу між послідовними chirp-імпульсами в межах одного кадру. Максимальна однозначно вимірювана швидкість визначається періодом повторення chirp-сигналів. Для усунення неоднозначностей вимірювання швидкості, пов'язаних з ефектом aliasing, використовуються додаткові алгоритми цифрової обробки.

Роздільна здатність за швидкістю визначає мінімальну різницю швидкостей між двома цілями, які знаходяться на однаковій відстані. Даний параметр залежить від загального часу накопичення chirp-сигналів у межах одного кадру. Збільшення тривалості спостереження забезпечує підвищення

точності розділення об'єктів за швидкістю.

Точність вимірювання швидкості також визначається співвідношенням сигнал/шум та характеристиками алгоритмів цифрової обробки сигналів.

Однією з важливих характеристик автомобільного радара є поле зору (Field of View, FoV), яке визначає сектор простору, в межах якого система здатна ефективно виявляти об'єкти. Поле зору залежить від діаграми спрямованості передавальної та приймальної антенних решіток, а також від алгоритмів формування променя. Зазвичай поле зору визначається окремо для азимутальної площини та площини кута місця.

Кутова роздільна здатність характеризує здатність радара розділяти дві цілі, що мають однакову дальність та швидкість, але розташовані під різними кутами. Цей параметр визначається кількістю антенних елементів та їх геометричним розташуванням у передавальній та приймальній решітках. Для сучасних автомобільних радарів кутова роздільна здатність задається окремо для азимуту та кута місця.

Точність оцінювання кутових координат залежить від рівня SNR, параметрів антенної системи та алгоритмів цифрової обробки, зокрема FFT та цифрового формування променя (Beamforming).

Під час проєктування структури кадру та параметрів ЛЧМ-сигналу для систем автоматизованого паркування виконується оптимізація параметрів проміжної частоти IF з урахуванням компромісу між максимальною дальністю виявлення, максимальною швидкістю та роздільною здатністю за дальністю. Конфігурація chirp-сигналу визначається параметрами частотної розгортки, тривалістю chirp-імпульсу, частотою повторення та структурою кадру. У демонстраційних проєктах Texas Instruments параметри ЛЧМ-сигналу задаються у конфігураційному файлі `ra_config_chirp_design_USRR20.h`. Зміна даного файлу та подальша компіляція програмного забезпечення дозволяють адаптувати радарну систему до різних режимів роботи та умов застосування.

TIDER-01011 використовує чотири приймачі та три передавальні антени, як показано на рисунку 3.7. Коли система працює в режимі мультиплексування з часовим поділом (TDM) MIMO, досягається неоднорідний синтезований

масив з 12 антен, як показано на рисунку 3.7. Режим роботи TDM досягається шляхом передачі чирпів за допомогою TX1, TX3 та TX2 по черзі. З 8 синтезованими антенами в азимутальному напрямку, ця антена забезпечує точнішу роздільну здатність азимутального кута і також може бути використана для оцінки кута місця.

Конфігурація MIMO синтезує масив з дванадцяти віртуальних RX антен: 8 антен в азимутальній площині та 4 антени в площині місця, як показано на рисунку 3.7. Цей метод покращує роздільну здатність кута вдвічі порівняно з конфігурацією з одним передавач.

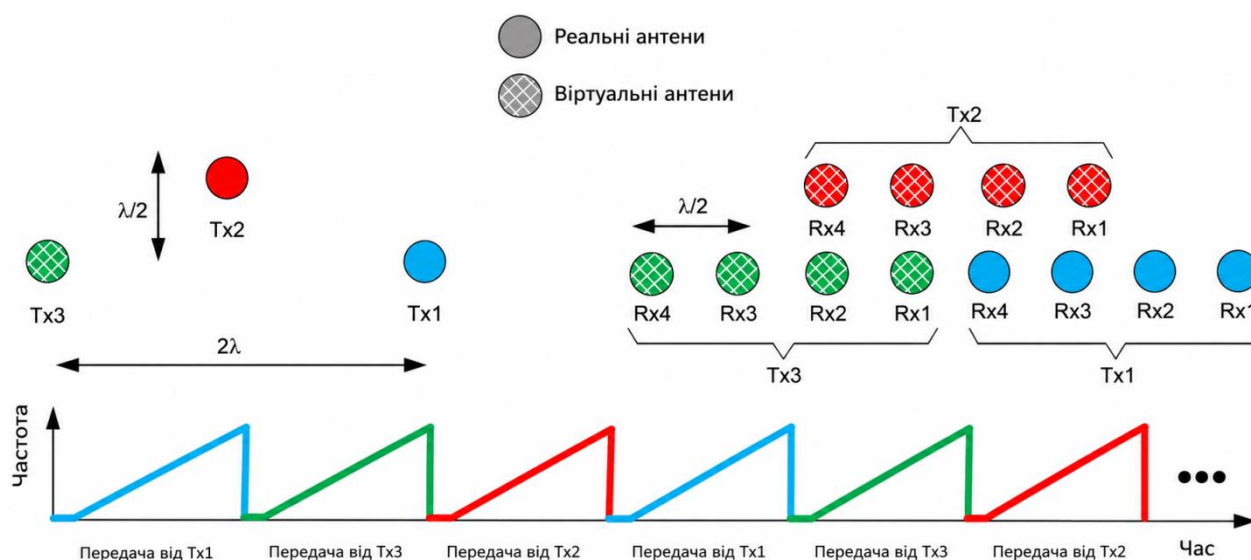


Рисунок 3.7 – Конфігурація антени

Коло обробки сигналів у проєкті TIDEP-01011 реалізований на базі оціночного модуля AWR1843 EVM та призначений для виконання задач автоматизованого паркування з використанням FMCW-радару надкороткого радіуса дії. Архітектура системи забезпечує повний цикл формування, приймання, оцифрування та цифрової обробки радіолокаційних сигналів у режимі реального часу.

Основою кола обробки є радіочастотний фронтенд (Front End), який включає передавальні та приймальні антени, а також аналоговий RF-приймач і передавач. Даний модуль реалізує генерацію та випромінювання FMCW chirp-сигналів, приймання відбитих сигналів та їх попередню аналогову обробку. До

складу фронтенду входять підсилювачі, змішувачі, фільтри та інші апаратні вузли формування й кондиціонування сигналу. Ефективність роботи фронтенду значною мірою визначається правильністю налаштування параметрів chirp-сигналу та структури кадру відповідно до конкретного сценарію використання.

Після аналогової обробки сигнал надходить до аналого-цифрового перетворювача ADC. АЦП виконує дискретизацію сигналу проміжної частоти та формує цифрові вибірки, які передаються до системи цифрової обробки сигналів. Отримані дані тимчасово зберігаються у буферах ADC Buffer для подальшої обробки DSP-процесором.

Для швидкого переміщення великих масивів даних між різними областями пам'яті використовується контролер EDMA (Enhanced Direct Memory Access). Даний модуль забезпечує передачу інформації без безпосереднього залучення центрального процесора, що дозволяє суттєво знизити обчислювальне навантаження на DSP та підвищити загальну продуктивність системи. Контролер EDMA підтримує автоматичний запуск операцій передачі та може виконувати попереднє впорядкування даних під час копіювання.

Основним елементом цифрової обробки є сигнальний процесор TI C674x DSP. Даний процесор виконує низькорівневу цифрову обробку радіолокаційних сигналів, включаючи швидке перетворення Фур'є (FFT), формування карти «дальність–швидкість», доплерівську обробку, фільтрацію шумів та виявлення цілей. DSP також забезпечує реалізацію алгоритмів оцінювання координат об'єктів та підготовку даних для подальших високорівневих алгоритмів кластеризації й трекінгу.

У процесі функціонування системи DSP-процесор використовує декілька типів фізичної пам'яті, що забезпечують зберігання проміжних результатів обчислень, буферизацію даних та обмін інформацією між апаратними модулями. Така архітектура дозволяє реалізувати високошвидкісну потокову обробку радарної інформації у режимі реального часу.

Завдяки інтеграції радіочастотного фронтенду, АЦП, контролера EDMA та DSP-процесора система TIDEP-01011 забезпечує ефективну реалізацію

алгоритмів автомобільної радіолокації для задач автоматизованого паркування, виявлення перешкод та просторового аналізу навколишнього середовища.

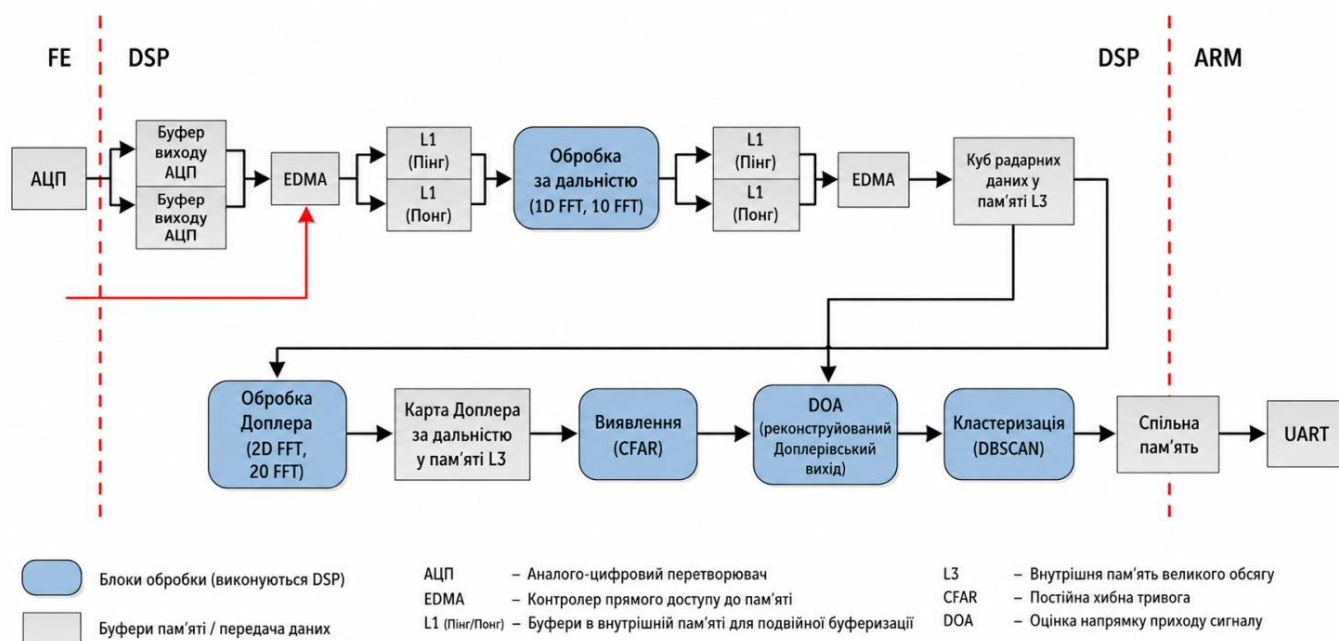


Рисунок 3.8 – Коло обробки сигналів

Коло обробки сигналів реалізовано на цифровому сигнальному процесорі (DSP). У колі обробки використовується кілька ресурсів фізичної пам'яті, які описані в додатку А.

Під час проєктування структури кадру та параметрів лінійно-частотно-модульованого сигналу (chirp) для системи паркувального асистента компанія Texas Instruments виконувала оптимізацію параметрів проміжної частоти (IF bandwidth) з урахуванням компромісу між максимальною дальністю виявлення, максимальною вимірюваною швидкістю та роздільною здатністю за дальністю.

Параметри chirp-сигналу визначають основні характеристики функціонування радарної системи, зокрема точність визначення координат об'єктів, швидкодію системи та ефективність роботи в умовах багатокористувацького середовища. Збільшення смуги частот ЛЧМ-сигналу дозволяє підвищити роздільну здатність за дальністю, однак одночасно впливає на допустиму максимальну дальність та швидкість вимірювання, що потребує оптимального балансування параметрів системи.

Приклад конфігурації chirp-сигналу, використаного у системі автоматизованого паркування:

- тривалість кадру – 50 мс;
- частота дискретизації – АЦП 10 MSPS;
- дійсна смуга пропускання розгортки ЛЧМ-сигналу – 858 МГц;
- нахил ЛЧМ-сигналу – 40 МГц/мкс;
- час обробки ЛЧМ-сигналу – 25,6 мкс;
- час повторення ЛЧМ-сигналу – 115,8 мкс;
- кількість вибірок на ЛЧМ-сигнал – 256;
- кількість ЛЧМ-сигналів на кадр – 64;
- розмір радарного куба – 192 КБ.

Для зміни режимів роботи радара користувач повинен модифікувати параметри у спеціальному конфігураційному файлі та виконати повторну компіляцію програмного забезпечення.

3.5 Загальна будова та призначення функціональних складових модулю AWR1843BOOST

Розглянемо детальніше оціночний модуль AWR1843BOOST. Плата забезпечує пряме підключення до системи LaunchPad та призначена для створення, налагодження і тестування програмного забезпечення для вбудованого цифрового сигнального процесора C67x і малопотужного мікроконтролера ARM Cortex-R4F.

Оціночний модуль забезпечує повноцінну платформу для дослідження алгоритмів FMCW-радіолокації, цифрової обробки сигналів, реалізації MIMO-конфігурацій та розроблення автомобільних систем ADAS. Загальна будова оціночного модуля AWR1843BOOST наведено на рисунку 3.9. Розглянемо детальніше функціональні складові модулю.

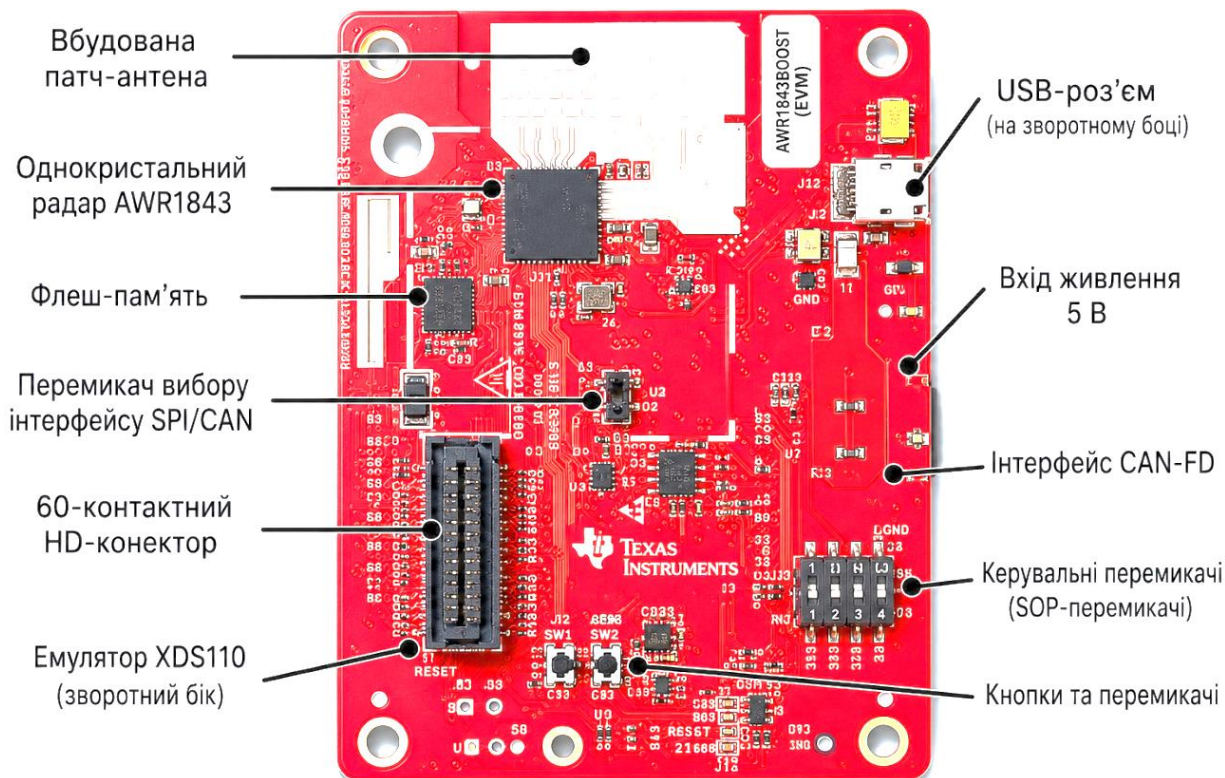


Рисунок 3.9 – Загальна будова оціночного модуля AWR1843BOOST

Живлення оціночного модуля AWR1843BOOST здійснюється через роз'єм подачі постійної напруги 5 В із допустимим обмеженням струму до 2,5 А. Після подачі живлення на плату повинні активуватися світлодіодні індикатори «5V» та «NRST», що свідчить про коректне ввімкнення та готовність системи до роботи.

Для забезпечення стабільного запуску апаратної платформи після подачі напруги живлення рекомендується виконати апаратне перезавантаження системи шляхом натискання кнопки NRST (SW2). Дана процедура забезпечує надійне ініціалізування внутрішніх функціональних модулів та коректне завантаження програмного забезпечення радару.

Схема підключення живлення оціночного модуля xWR1843BOOST наведена на рисунку 3.10.

Оціночний модуль xWR1843BOOST оснащений стандартними 20-контактними роз'ємами LaunchPad (J5 та J6), які забезпечують можливість безпосереднього підключення плати до мікроконтролерних платформ Texas Instruments LaunchPad (рис. 3.10). Використання стандартизованого інтерфейсу спрощує інтеграцію радарного модуля з іншими апаратними засобами та

дозволяє швидко створювати прототипи вбудованих систем.

Роз'єми модуля забезпечують передачу:

- сигналів живлення;
- цифрових керуючих сигналів;
- інтерфейсів обміну даними;
- службових сигналів налагодження та програмування.

Під час підключення модуля AWR1843BOOST до інших плат LaunchPad необхідно контролювати правильність орієнтації контактів. Для цього слід перевірити відповідність маркування сигнальних ліній «3V3» та «5V», нанесених на друкованих платах. Неправильне підключення роз'ємів може призвести до некоректної роботи системи або пошкодження апаратних компонентів.

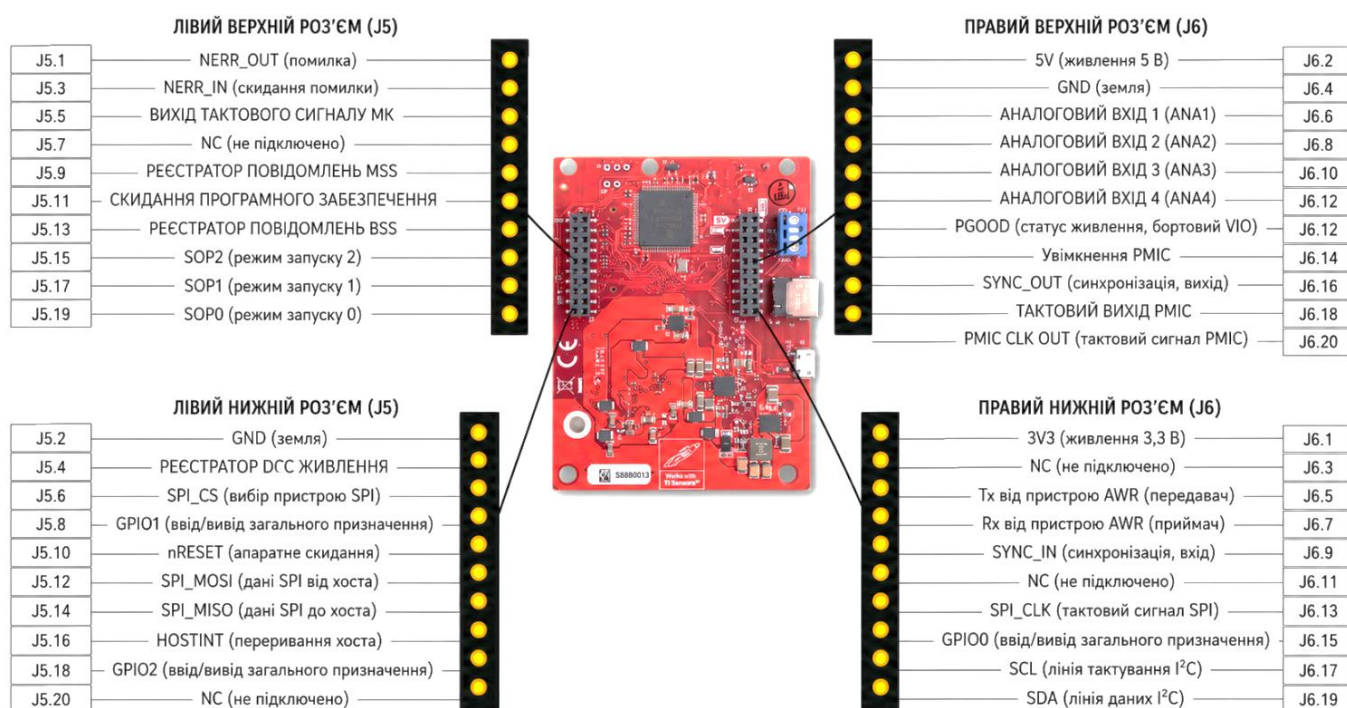


Рисунок 3.10 – 20-контактні роз'єми LaunchPad (J5 та J6)

Оціночний модуль AWR1843BOOST оснащений 60-контактним високощільним роз'ємом HD (High Density Connector), який забезпечує передачу високошвидкісних даних та службових сигналів між радарним модулем і зовнішніми пристроями.

Через даний роз'єм передаються: високошвидкісні LVDS-дані; сигнали

керування SPI; UART-інтерфейс; інтерфейс I2C; сигнали NRST, NERR та SOP; сигнали налагодження JTAG.

Використання LVDS-інтерфейсу дозволяє передавати великі обсяги необроблених даних аналого-цифрового перетворювача з високою швидкістю та низьким рівнем завад, що є важливим для реалізації алгоритмів цифрової обробки радіолокаційних сигналів.

Роз'єм HD може використовуватися для підключення плати MMWAVE-DEVPACK, що забезпечує сумісність із платформою TSW1400 та дозволяє виконувати захоплення, запис і подальший аналіз сирих радарних даних.

Оціночний модуль AWR1843BOOST оснащений роз'ємом J3, який забезпечує підключення до автомобільної мережі CAN через вбудований приймач-передавач CAN-FD типу TCAN1042HGVDRQ1 (рис. 3.11). Через даний роз'єм виводяться сигнали CAN_H та CAN_L, що дозволяє безпосередньо інтегрувати радарний модуль у шину Controller Area Network (CAN).

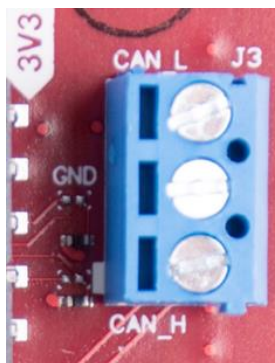


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд CAN роз'єму

Інтерфейс CAN використовується для обміну даними між електронними блоками керування автомобіля та забезпечує передачу службової інформації, параметрів роботи систем ADAS, діагностичних повідомлень і результатів обробки радіолокаційних даних.

Особливістю архітектури пристрою AWR1843 є мультиплексування цифрових сигналів інтерфейсу CAN із сигналами інтерфейсу SPI. У зв'язку з цим одночасне використання обох інтерфейсів неможливе, тому необхідно

обирати активний режим роботи за допомогою перемикача S2.

Для активації CAN-інтерфейсу перемикач S2 необхідно встановити у положення «CAN». У даному режимі сигнали передаються через вбудований CAN-FD трансивер TCAN1042HGVDRQ1, який забезпечує високошвидкісний та завадостійкий обмін даними відповідно до автомобільних стандартів.

Антенна система радару AWR1843BOOST. Оціночний модуль AWR1843BOOST містить інтегровану антенну систему, реалізовану безпосередньо на друкованій платі методом травлення провідникових структур. До складу антенної системи входять чотири приймальні антени (RX) та три передавальні антени (TX), що забезпечують реалізацію MIMO-конфігурації для формування віртуальної антенної решітки та просторового аналізу навколишнього середовища (рис. 3.12).

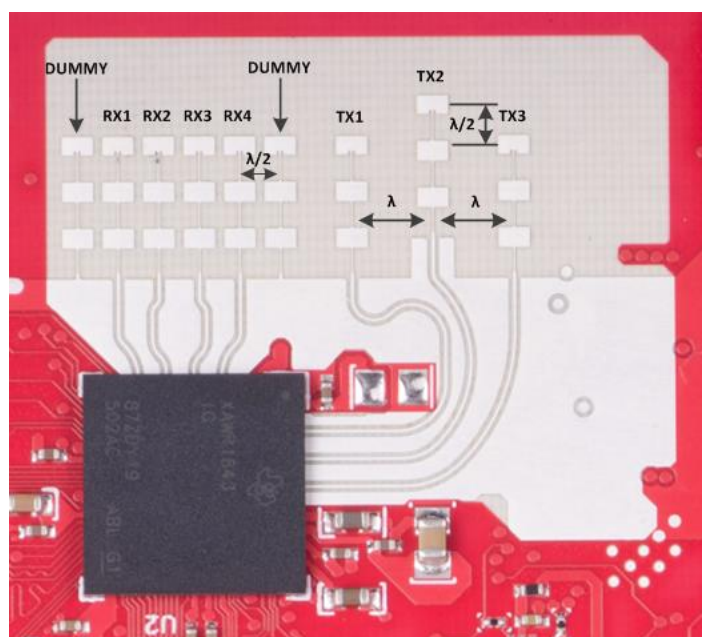


Рисунок 3.12 – Антени RX та TX

Використання багатоканальної антенної структури дозволяє одночасно відстежувати декілька об'єктів із визначенням їх дальності, швидкості та кутового положення. Конструкція антенної системи забезпечує можливість оцінювання координат цілей у тривимірному просторі, зокрема визначення азимутального кута та кута місця.

Антенна система працює у частотному діапазоні 76–81 ГГц, який

використовується сучасними автомобільними радарми ADAS. Піковий коефіцієнт підсилення антени перевищує 10,5 dBi у всьому робочому діапазоні частот, що забезпечує достатній рівень спрямованості та ефективності випромінювання електромагнітної енергії.

Діаграми спрямованості антенної системи формуються окремо для горизонтальної площини (H-plane) та вертикальної площини або площини кута місця (E-plane). Аналіз діаграм спрямованості дозволяє визначити ширину променя антени та оцінити поле зору радарної системи.

На частоті 78 ГГц горизонтальна ширина променя за рівнем -3 dB становить приблизно $\pm 28^\circ$ (рис. 3.13), тоді як у вертикальній площині ширина променя за рівнем -3 dB складає близько $\pm 14^\circ$ (рис. 3.14). Це означає, що в межах зазначених кутів коефіцієнт підсилення антени зменшується не більше ніж на 3 dB відносно максимального значення у напрямку головного променя.

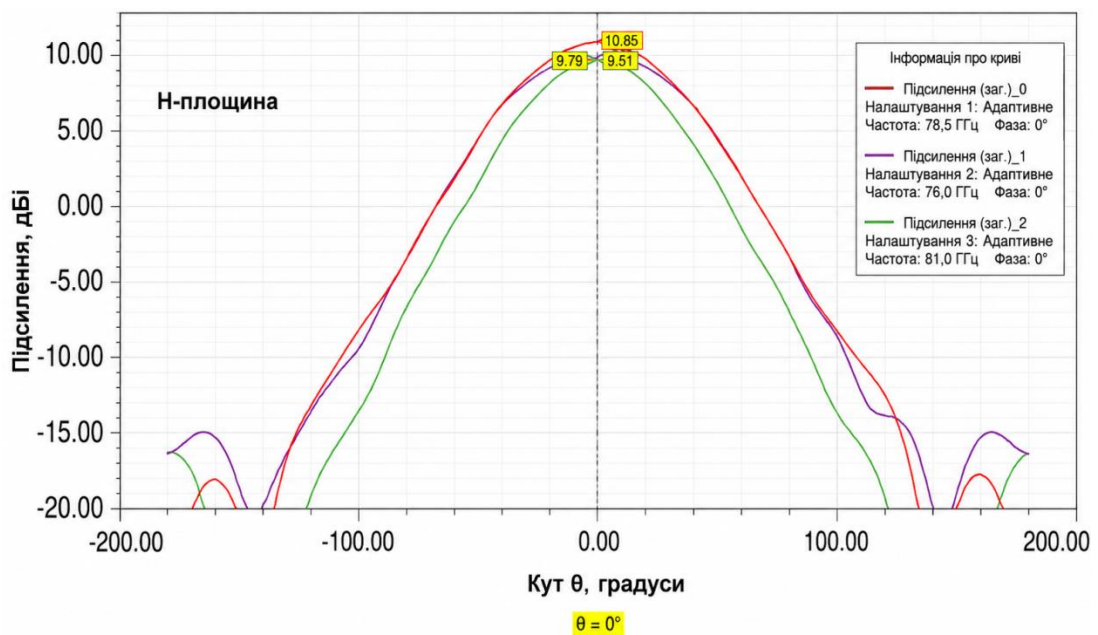


Рисунок 3.13 – Діаграма спрямованості антени (H-площина)

Для рівня -6 dB горизонтальна ширина променя становить приблизно $\pm 50^\circ$, а у вертикальній площині – близько $\pm 20^\circ$. Такі параметри забезпечують достатньо широкий сектор огляду радару при збереженні необхідної кутової роздільної здатності для задач автоматизованого паркування, виявлення перешкод та функціонування систем допомоги водієві ADAS.

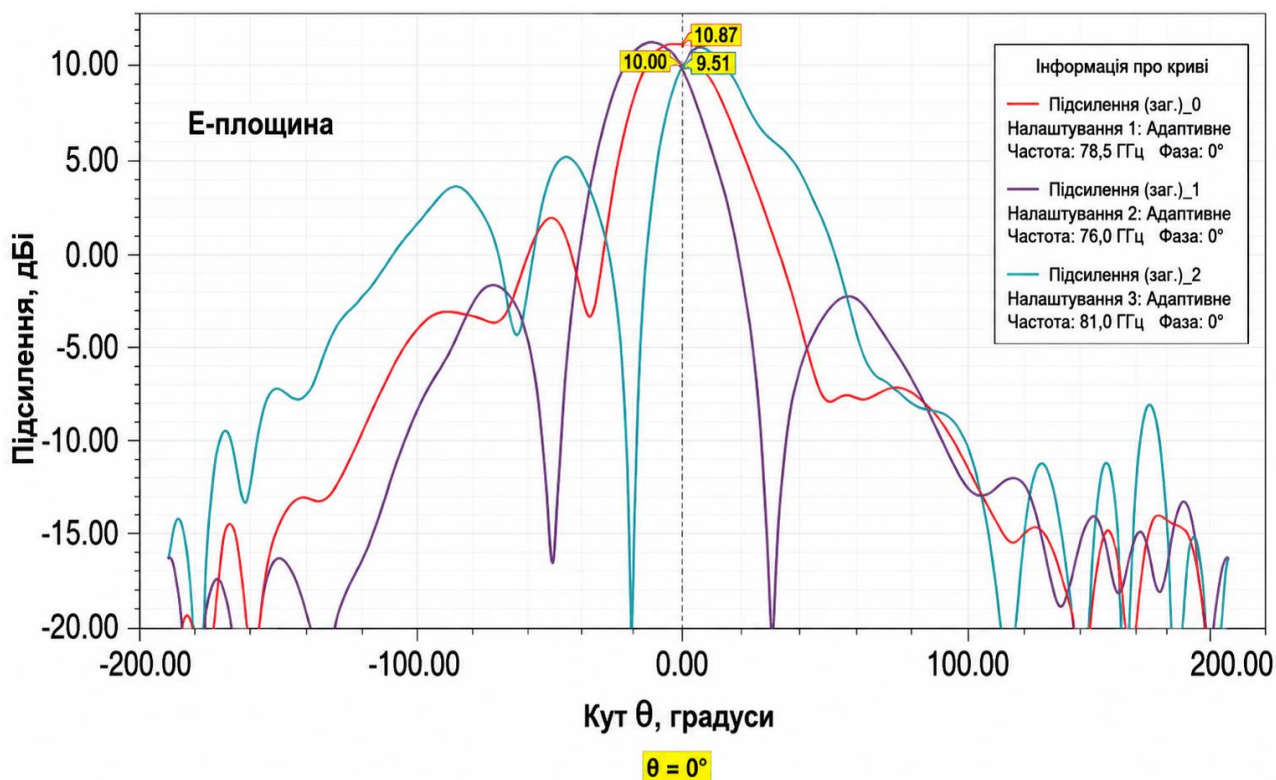


Рисунок 3.14 – Діаграма спрямованості антени (Е-площина)

Завдяки інтеграції антенної системи безпосередньо на друкованій платі досягається компактність конструкції, зниження втрат у високочастотному тракті та підвищення стабільності характеристик радіолокаційної системи.

Радарний модуль xWR1843 підтримує декілька режимів завантаження та функціонування, вибір яких здійснюється за допомогою ліній SOP (Sense On Power). Стан даних ліній зчитується пристроєм лише під час подачі живлення або перезавантаження, після чого визначається режим роботи системи. Налаштування режиму SOP виконується за допомогою перемикача S1. Положення перемикача «ON» відповідає логічній одиниці, тоді як положення «OFF» відповідає логічному нулю.

Залежно від конфігурації ліній SOP пристрій AWR1843 може працювати у таких режимах:

- SOP Mode 5 (101) – режим програмування Flash-пам'яті. Даний режим використовується для запису або оновлення прошивки у зовнішній Flash-пам'яті пристрою.

- SOP Mode 4 (001) – функціональний режим роботи. У цьому режимі

радарний модуль виконує стандартне завантаження прикладного програмного забезпечення та забезпечує штатне функціонування системи.

– SOP Mode 2 (011) – режим налагодження. Використовується під час тестування, діагностики та налагодження програмного забезпечення радарного модуля.

Правильне налаштування SOP-перемикачів є важливим етапом конфігурування системи, оскільки від обраного режиму залежить можливість програмування, запуску або налагодження пристрою. Розташування SOP-перемикачів на оціночному модулі AWR1843BOOST наведено на рисунку 3.15.

Для контролю енергоспоживання оціночного модуля xWR1843BOOST на платі передбачено вимірювальний резистор R156, який використовується для визначення струму, що споживається радарним пристроєм AWR1843, модулем керування живленням PMIC та стабілізатором LDO у колі живлення 3,3 В.

Вимірювання струму виконується шляхом розриву кола живлення через демонтаж резистора R156 та підключення амперметра послідовно до контактних площадок резистора (рис. 3.16). Такий підхід дозволяє отримати точні значення споживаного струму під час роботи радара у різних режимах функціонування.

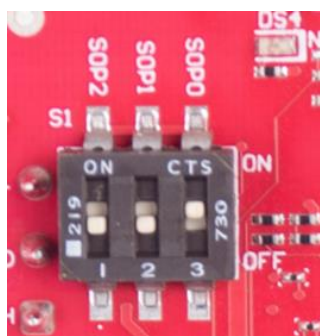


Рисунок 3.15 – Перемички SOP

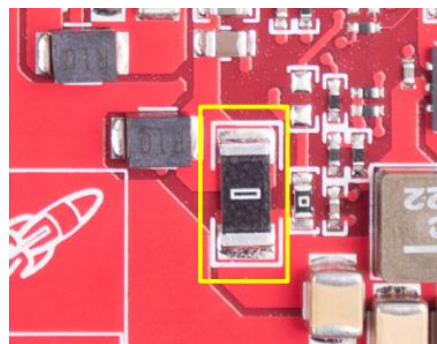


Рисунок 3.16 – Резистор для вимірювання струму

Контроль енергоспоживання є важливим етапом дослідження та оптимізації радарних систем, оскільки дозволяє: оцінити енергоефективність алгоритмів обробки сигналів; визначити вплив режимів роботи на споживану

потужність; аналізувати роботу системи в режимах активного сканування та очікування; оптимізувати конфігурацію живлення для автомобільних застосувань.

У додатку Б наведено інформацію про перемикачі та світлодіоди. На рисунках 3.17 – 3.22 показано розташування перемикачів та світлодіодів.



Рисунок 3.17 – SW1



Рисунок 3.186 – SW2



Рисунок 3.19 – DS2



Рисунок 3.20 – DS4



Рисунок 3.21 – DS1



Рисунок 3.22 – DS3

3.6 Калібрування радарних систем ADAS

Ефективність функціонування систем ADAS безпосередньо залежить від точності налаштування та коректної роботи всіх сенсорних елементів. Некалібровані, пошкоджені або неправильно встановлені радары не лише втрачають ефективність, але й можуть формувати помилкові сигнали, що створює потенційно небезпечні ситуації під час руху транспортного засобу.

Системи ADAS працюють із високою точністю вимірювання просторових координат, швидкості та траєкторії об'єктів. Радари та камери налаштовуються відповідно до визначених заводом-виробником кутів встановлення, висоти монтажу та геометричних параметрів кузова автомобіля. Навіть незначне відхилення положення сенсора в межах 1–2° може суттєво вплинути на

точність роботи системи. Наприклад, зміщення кута нахилу автомобільного радара лише на 1° здатне зменшити ефективну дальність його роботи майже у десять разів. У результаті система може некоректно визначати відстань до об'єктів, помилково оцінювати дорожню ситуацію або несвоєчасно реагувати на потенційні загрози.

За відсутності правильного калібрування можуть виникати такі несправності: помилкові спрацьовування систем безпеки; відсутність реакції у критичних ситуаціях; нестабільна робота адаптивного круїз-контролю; неправильне визначення відстані до транспортних засобів або перешкод; некоректна робота систем утримання у смузі руху.

Проблеми у роботі систем ADAS не завжди є очевидними для водія, однак транспортний засіб зазвичай сигналізує про несправності відповідними ознаками. До основних симптомів некоректної роботи ADAS належать: поява попереджень або помилок на панелі приладів; помилкове або запізнile спрацьовування систем автоматичного екстреного гальмування; нестабільна робота адаптивного круїз-контролю; хаотичні сигнали паркувальних датчиків; спотворення зображення з камер або некоректне розпізнавання дорожньої розмітки; неправильна робота систем автоматичного підрулювання.

Важливо зазначити, що калібрування систем ADAS необхідне не лише після дорожньо-транспортних пригод. Процедура обов'язково виконується після: заміни або ремонту лобового скла; демонтажу чи заміни бампера; кузовного ремонту; виконання регулювання розвалу-сходження; ремонту підвіски; заміни радарів, камер або електронних блоків керування; значних ударних навантажень або тривалої експлуатації автомобіля на дорогах із незадовільним покриттям.

На рисунку 3.23 наведено фізичну конфігурацію випробувального стенда, що використовувався для тестування демонстраційної системи автоматизованого паркування. Під час проведення експерименту один автомобіль був розташований поруч із бордюром. На другому транспортному засобі в задній частині кузова було встановлено радарний сенсор AWR1843.



Рисунок 3.23 – Тестова фізична конфігурація

Оціночний модуль (EVM) монтувався на висоті приблизно 1 м над поверхнею дороги у задній частині автомобіля. Додатково перед другим автомобілем були розміщені два дорожні конуси висотою близько 30 дюймів, які використовувалися як тестові об'єкти для перевірки можливостей системи щодо виявлення та локалізації перешкод під час маневрування транспортного засобу.

У стандартному режимі роботи демонстраційної системи на екрані візуалізації відображаються виявлені об'єкти та результати їх кластеризації. Виявлені цілі подаються у вигляді окремих точок у тривимірному просторі, тоді як сформовані кластери відображаються у вигляді просторових рамок (bounding box). Розміри кластерів визначаються алгоритмом кластеризації, реалізованим на DSP-процесорі.

Відповідний результат роботи графічного інтерфейсу візуалізації наведено на рисунку 3.24. Аналіз отриманих даних показує, що радарний модуль AWR1843 здатний коректно виявляти два дорожні конуси як окремі об'єкти. Крім цього, система формує множину точок відбиття від припаркованого автомобіля та об'єднує їх у спільний кластер, що дозволяє ідентифікувати транспортний засіб як єдиний просторовий об'єкт.

Колірне відображення виявлених точок залежить від координати Z, тобто висоти об'єкта відносно антенної системи радара. Для кластерів використовується окремий принцип кольорової індикації: кластери, центр яких

знаходиться на відстані менше 1 м від антени, позначаються червоним кольором, тоді як об'єкти, розташовані на більшій відстані, відображаються зеленим кольором.

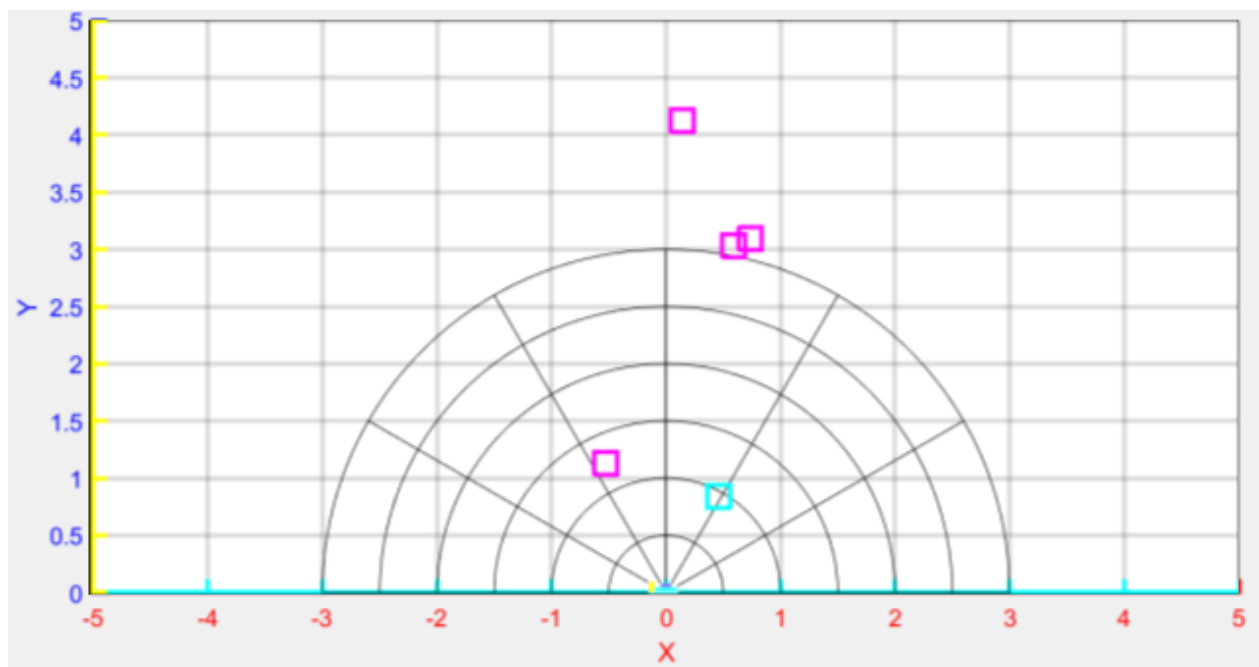


Рисунок 3.24 – Вивід графічного інтерфейсу візуалізатора

Отримані результати підтверджують можливість використання радарної системи AWR1843 для задач автоматизованого паркування, просторового аналізу навколишнього середовища та виявлення перешкод у режимі реального часу.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА У НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

4.1 Аналіз небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Під час виконання досліджень, налаштування та тестування автомобільних радарних систем ADAS виконавець працює з комп'ютерною технікою, електронними пристроями, лабораторним обладнанням, вимірювальними приладами та джерелами живлення. У процесі виконання робіт на працівника можуть впливати небезпечні та шкідливі виробничі фактори, які здатні негативно позначатися на стані здоров'я, працездатності та безпеці праці.

Основними небезпечними факторами під час роботи з радарними системами та електронним обладнанням є безпека ураження електричним струмом, пожежна безпека, електромагнітне випромінювання, надмірне навантаження на органи зору, статичне фізичне навантаження та психоемоційне перенапруження.

Під час роботи з оціночними модулями, лабораторними стендами, блоками живлення та вимірювальною апаратурою існує ризик ураження електричним струмом унаслідок пошкодження ізоляції, неправильного підключення обладнання або порушення правил експлуатації електроустановок. Особливу небезпеку становлять відкриті струмопровідні елементи джерел живлення, перетворювачів напруги та високочастотних модулів.

У процесі функціонування радарних систем міліметрового діапазону виникає електромагнітне випромінювання, яке при недотриманні безпечних умов експлуатації може впливати на організм людини. Незважаючи на відносно невелику потужність сучасних автомобільних FMCW-радарів, тривале перебування в безпосередній близькості до передавальних антен потребує дотримання вимог електромагнітної безпеки.

Під час виконання досліджень і налаштування систем ADAS оператор тривалий час працює за персональним комп'ютером та використовує дисплеї для аналізу сигналів, візуалізації даних і програмування обладнання. Це може

спричиняти надмірне навантаження на органи зору, втому очей, зниження концентрації уваги та загальне перевтомлення (рис. 4.1).

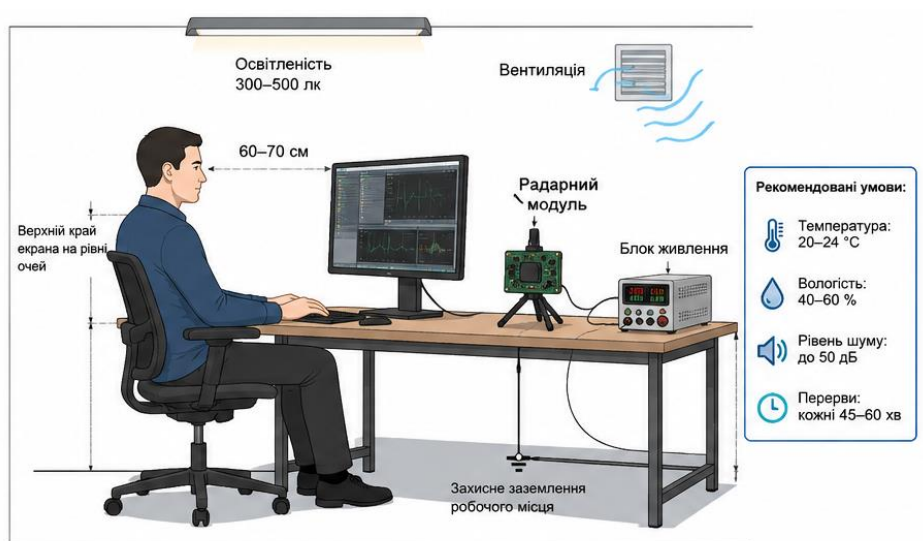


Рисунок 4.1 – Організація робочого місця оператора під час роботи з радарними системами ADAS

Тривале перебування у статичному сидячому положенні під час програмування, обробки даних та аналізу результатів вимірювань може викликати порушення опорно-рухового апарату, погіршення кровообігу та підвищення рівня втоми. Крім того, виконання робіт, пов'язаних із дослідженням та налагодженням електронних систем безпеки автомобіля, супроводжується значним психоемоційним навантаженням, що пов'язане з високою відповідальністю та необхідністю контролю великого обсягу інформації.

4.2 Заходи з охорони праці під час роботи з радарними системами ADAS

Для забезпечення безпечних умов праці під час роботи з автомобільними радарними системами необхідно застосовувати комплекс організаційних та технічних заходів. Організаційні заходи передбачають проведення інструктажів з охорони праці, допуск до роботи лише підготовленого персоналу, дотримання

правил експлуатації електронного обладнання, регламентування режимів праці та відпочинку, а також контроль технічного стану обладнання.

Працівник повинен проходити вступний та первинний інструктажі з охорони праці, а також ознайомлюватися з правилами експлуатації лабораторного обладнання, джерел живлення та вимірювальної техніки. Для зменшення ризику ураження електричним струмом необхідно використовувати лише справне та сертифіковане обладнання, виконувати підключення при вимкненому живленні, застосовувати захисне заземлення та не допускати пошкодження ізоляції провідників. Усі електронні пристрої повинні мати надійне заземлення, а робоче місце необхідно обладнати автоматичними вимикачами захисту та пристроями захисного відключення.

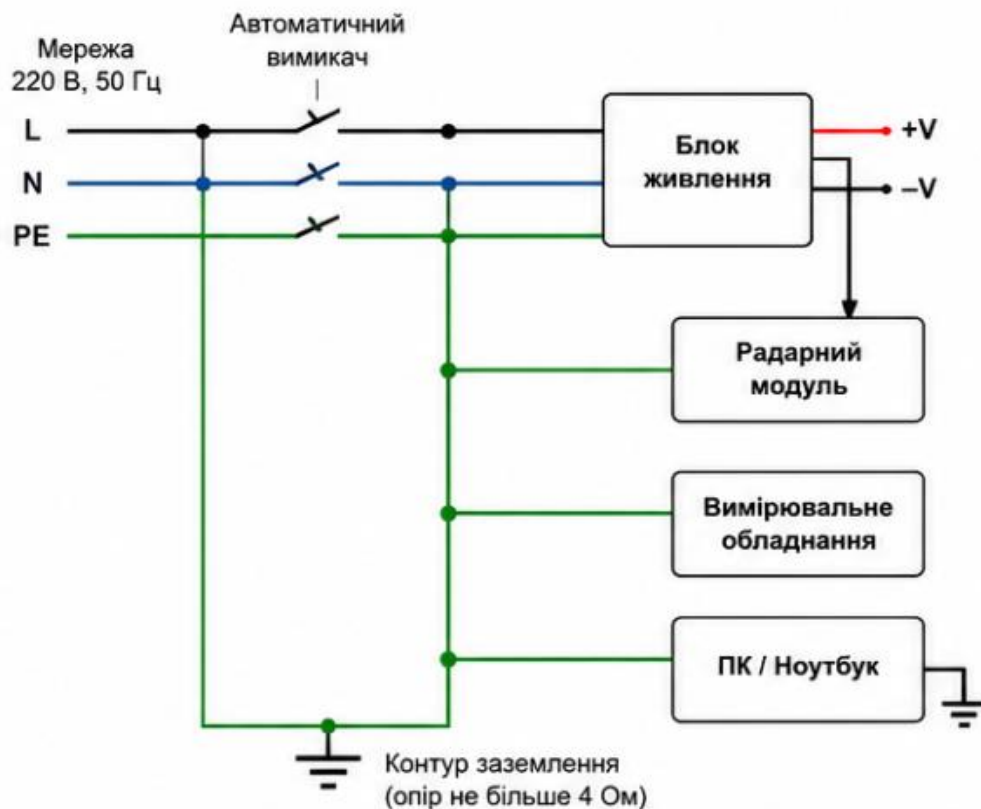


Рисунок 4.2 – Схема захисного заземлення лабораторного обладнання

Для зниження негативного впливу електромагнітного випромінювання рекомендується обмежувати тривалість перебування поблизу активних радарних антен, не розташовуватися безпосередньо в зоні основного променя антени та дотримуватися рекомендованих виробником дистанцій безпеки

(рис. 4.3). Також доцільним є використання екранованих кабелів і корпусів обладнання.

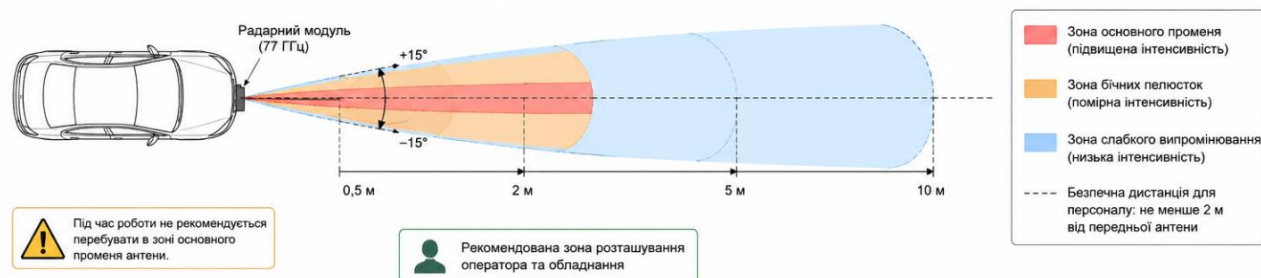


Рисунок 4.3 – Зони поширення електромагнітного випромінювання автомобільного радара

Важливим фактором є забезпечення ергономічних умов праці. Робоче місце оператора повинно відповідати санітарно-гігієнічним вимогам. Освітленість робочої поверхні має становити 300–500 лк, монітор необхідно розташовувати на відстані 60–70 см від очей, а верхній край екрана повинен знаходитися на рівні очей користувача. Приміщення повинно мати ефективну вентиляцію та допустимі параметри мікроклімату.

Для зменшення навантаження на зір та опорно-руховий апарат рекомендується робити технологічні перерви через кожні 45–60 хв роботи, виконувати вправи для очей, періодично змінювати положення тіла та використовувати ергономічне крісло й робочий стіл.

4.3 Забезпечення пожежної безпеки та безпеки у надзвичайних ситуаціях

Під час роботи з електронними пристроями та лабораторним обладнанням існує небезпека виникнення пожежі внаслідок короткого замикання, перевантаження електромережі, перегріву елементів живлення або несправності електрообладнання.

Для забезпечення пожежної безпеки необхідно використовувати справну електропроводку, не перевищувати допустиме навантаження електромережі,

своєчасно вимикати обладнання після завершення роботи та не допускати експлуатації пошкоджених кабелів і розеток. Лабораторне приміщення повинно бути обладнане засобами пожежогасіння, системою пожежної сигналізації, планом евакуації та аварійним освітленням.

У разі виникнення пожежі необхідно негайно відключити електроживлення, повідомити відповідні служби, використати первинні засоби пожежогасіння та організувати евакуацію персоналу.

Під час виконання робіт із радарними системами ADAS можливе виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру, пов'язаних з аварійним відключенням електроживлення, коротким замиканням, займанням електронного обладнання, виходом з ладу джерел живлення або порушенням роботи вентиляційних систем.

У разі виникнення надзвичайної ситуації необхідно припинити роботу обладнання, відключити електроживлення, повідомити керівника робіт та діяти відповідно до інструкцій з охорони праці та плану евакуації.

Для забезпечення безпеки персоналу необхідно проводити регулярні перевірки технічного стану обладнання, навчання персоналу діям у надзвичайних ситуаціях, контроль стану електромережі та перевірку справності засобів пожежогасіння.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз розвитку інтелектуальних систем допомоги водієві ADAS та визначено роль автомобільних радарів у забезпеченні активної безпеки транспортних засобів. Встановлено, що сучасні радарні системи є одним із найефективніших засобів моніторингу дорожньої обстановки завдяки високій точності вимірювання параметрів об'єктів та стійкості до впливу зовнішніх умов.

Досліджено еволюцію автомобільних радарних систем від перших експериментальних розробок до сучасних багатоканальних FMCW-радарів міліметрового діапазону. Проаналізовано принципи роботи імпульсних та FMCW-радарів, методи визначення дальності, швидкості та кутового положення об'єктів на основі ефекту Доплера та лінійно-частотної модуляції.

Розглянуто архітектуру автомобільного радара AWR1843 компанії Texas Instruments та особливості його використання у складі системи автоматизованого паркування TIDEP-01011. Встановлено, що інтеграція радіочастотного тракту, DSP-процесора, ARM-мікроконтролера та апаратного прискорювача HWA забезпечує високу продуктивність обробки радіолокаційної інформації при компактних габаритах та низькому енергоспоживанні.

Досліджено алгоритми цифрової обробки сигналів, що використовуються в системі, включаючи FFT-перетворення, CFAR-виявлення цілей, цифрове формування променя та кластеризацію об'єктів методом DBSCAN. Показано, що застосування технології TDM-MIMO дозволяє формувати віртуальну антенну решітку та суттєво підвищувати кутову роздільну здатність радарної системи.

Отримані результати підтверджують перспективність використання автомобільних FMCW-радарів як базового сенсорного елемента сучасних систем ADAS та автономного транспорту, а також доцільність подальшого розвитку багатоканальних міліметрових радарів з використанням сучасних методів цифрової обробки сигналів і технологій штучного інтелекту.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Learn About Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) The Modern Evolution in Vehicle Safety. URL: <https://smartavr.com.au/about-adas/> (дата звернення: 02.04.2026).
2. Cadillac Cyclone. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Cadillac_Cyclone (дата звернення: 02.04.2026).
3. Mitsubishi Debonair. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Mitsubishi_Debonair (дата звернення: 05.04.2026).
4. Lexus LS. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Lexus_LS (дата звернення: 08.04.2026).
5. Як Mercedes-Benz створюють стандарти активної безпеки. URL: <https://mercedes-benz-kiev.com/yak-mercedes-benz-stvoryuyut-standarty-aktyvnoyi-bezpeky-877> (дата звернення: 09.04.2026).
6. Subaru EyeSight. Зірке око. URL: <https://www.avtomir.ua/articles/subaru-eyesight-zorkiy-glaz/> (дата звернення: 12.04.2026).
7. Mercedes to Use Lane-Change Warning System. URL: <https://www.latimes.com/archives/la-xpm-2000-jun-07-fi-38241-story.html> (дата звернення: 12.04.2026).
8. Lane Keep Assist System (LKAS). URL: <https://www.honda-mideast.com/en-ae/safety/Lane-Keep-Assist-System/> (дата звернення: 20.04.2026).
9. Knowledge Centre: Blind Spot Detectio. URL: <https://www.autoserviceworld.com/features/watching-cant-see/> (дата звернення: 22.04.2026).
10. Mosquet X., Andersen M. & Arora A. A Roadmap to Safer Driving Through Advanced Driver Assistance Systems. Auto Tech Rev 5, 20–25. URL: <https://doi.org/10.1365/s40112-016-1164-1> (дата звернення: 02.05.2026).
11. Patole S., Torlak M., Wang D., Ali M. Automotive radars: A review of signal processing techniques. IEEE Signal Processing Magazine. 2017. Vol. 34, No. 2. P. 22–35.
12. Automotive Radar: From Its Origins to Future Directions. URL:

<https://www.microwavejournal.com/articles/20469-automotive-radar-from-its-origins-to-future-directions> (дата звернення: 05.05.2026).

13. Mercedes-Benz – 120 років розвитку автомобільного керма. URL: <https://mercedes-benz-kiev.com/mercedes-benz-120-rokiv-rozvytku-avtomobilnoho-kerma-1940> (дата звернення: 12.05.2026).

14. Ritter P. Toward a fully integrated automotive radar system-on-chip in 22 nm FD-SOI CMOS. International Journal of Microwave and Wireless Technologies. 2021. Vol. 13, No. 6. P. 523–531.

15. Weber C., Eichel-Streiber J., Rodrigo-Comino J., Altenburg J., Udelhoven T. Automotive radar in a UAV to assess Earth surface processes and land responses. Sensors. 2020. Vol. 20, No. 16. Article 4463.

16. Highest Channel Count, Highest Processing Power. URL: <https://arberobotics.com/chipset/> (дата звернення: 18.05.2026).

17. Liu Z., Quan Y., Wu Y., Xu K. Range and Doppler reconstruction for sparse frequency agile linear frequency modulation-orthogonal frequency division multiplexing radar. IET Radar, Sonar & Navigation. 2022. Vol. 16.

18. Метод опорних векторів. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B4_%D0%BE%D0%BF%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%B8%D1%85_%D0%B2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D1%96%D0%B2 (дата звернення: 22.04.2026).

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 – Коло обробки сигналів

Назва розділу	Розмір (кб) за налаштуванням	Використана пам'ять (кб)	Опис
L1D SRAM	16	16	Статична оперативна пам'ять першого рівня забезпечує найшвидший доступ до даних для цифрового сигнального процесора (DSP) і використовується для більшості критично важливих за часом даних обробки DSP, які можуть поміститися в цьому розділі.
L1D cache	16	Використовується як кеш	Кеш даних першого рівня кешує доступ до даних до будь-якого іншого розділу, налаштованого як кешований. L2, L3 та HSRAM налаштовані як кешовані.
L1P SRAM	16	16	Статична оперативна пам'ять програм першого рівня є найшвидшою оперативною пам'яттю доступу до програм для цифрового сигнального процесора (DSP) і використовується для більшості критичних за часом програм DSP, які можуть поміститися в цьому розділі.
L1P cache	16	Використовується як кеш	Кеш першого рівня кешує доступ програми до будь-якого іншого розділу, налаштованого як кешований. L2, L3 та HSRAM налаштовані як кешовані.
L2	256	185	Локальна пам'ять другого рівня має меншу затримку доступу, ніж пам'ять третього рівня, і видима лише для цифрового сигнального процесора (DSP). Ця пам'ять використовується для більшої частини програми та даних для кола обробки сигналів.
L3	1024	835	Пам'ять з вищою затримкою для доступу до DSP в основному зберігає куб радіолокаційного поля та карту потужності Доплера з дальністю. Це менш чутлива до часу програма. Тут також можна зберігати дані.
HSRAM	32	Наразі не використовується	У цій конструкції спільний буфер пам'яті між DSP та R4F передає дані візуалізації до R4F для виведення через UART.

ДОДАТОК Б

Таблиця Б.2 – Інформація про перемикачі та світлодіоди

Посилання	Використання	Коментарі
SW2	RESET	Використовується для скидання налаштувань пристрою xWR1843. Цей сигнал також виводиться на 20-контактний роз'єм та 60-контактний роз'єм HD, щоб зовнішній процесор міг керувати пристроєм AWR. Вбудований XDS110 також може використовувати це скидання.
SW1	GPIO_1	При натисканні GPIO_1 підключається до VCC.
DS2	Warm reset indication	Цей світлодіодний індикатор вказує на те, що запущено тепле скидання.
DS4	nRESET	Цей світлодіод використовується для індикації стану виводу nRESET. Якщо цей світлодіод світиться, пристрій не перезавантажено. Цей світлодіод світитиметься лише після подачі живлення 5 В.
DS1	Nerr_OUT	Світиться, якщо в пристрої AWR є якась апаратна помилка
DS3	GPIO_1	Світиться, коли GPIO перебуває в логічній одиниці
D5	PWR	Цей світлодіод вказує на наявність живлення 3,3 В