

Міністерство освіти і науки України

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Механічний факультет

Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ДИПЛОМНА РОБОТА

магістра

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ КОЛЬОРОВОСТІ НАЗЕМНОГО ОРІЄНТИРУ АВТОНОМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ

Завідувач кафедри к-т техн. наук, проф.



О. І. Богатов

Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент



М. В. Москаленко

Керівник, д-р техн. наук, проф.



О. В. Полярус

Студент гр. ММ-61-21



М. Ю. Зенцов

Харків - 2022

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет Механічний
Кафедра: Метрології та безпеки життєдіяльності
Освітньо-кваліфікаційний рівень: магістр
Галузь знань: 15 «Автоматизація та приладобудування»
Спеціальність: 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»

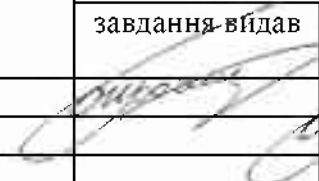
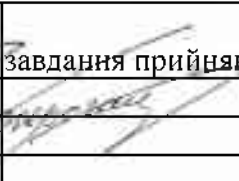
ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри Метрології
та БЖД
**О. І. Богатов**
«19» вересня 2022 р.

З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

Зенцову Максиму Юрійовичу

1. Тема роботи: «Дослідження точності вимірювання кольоровості наземного орієнтиру автономними мобільними роботами»
Керівник роботи Полярус Олександр Васильович, д.т.н. професор,
затверджені наказом вищого навчального закладу від «4» жовтня 2022 року № 102
2. Строк подання студентом роботи 15 грудня 2022 р.
3. Вихідні дані до роботи: звіт з переддипломної практики
4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1. Вступ. 2. Оцінка можливостей активних методів виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами. 3. Аналіз методів вимірювання кольоровості об'єктів. 4. Оптимальна система вимірювання кольоровості наземних орієнтирів. 5. Вимірювання стрибків інтенсивності кольорів в інтересах виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами. 6. Висновок. 7. Перелік посилань .
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
 1. Результати досліджень у вигляді схем та графіків.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
	Богатов О.І.		

7. Дата видачі завдання « 19 » вересня 2022 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вивчення літератури.	20.09.2022	Виконано
2	Оцінка можливостей активних методів виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами	19.10.2022	Виконано
3	Аналіз методів вимірювання кольоровості об'єктів	1.11.2022	Виконано
4	Оптимальна система вимірювання кольоровості наземних орієнтирів	11.11.2022	Виконано
5	Вимірювання стрибків інтенсивності кольорів в інтересах виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами	15.11.2022	Виконано
6	Формулювання висновків.	24.11.2022	Виконано
7	Оформлення пояснювальної записки.	7.12.2022	Виконано
8	Створення презентації в PowerPoint.	14.12.2022	Виконано
9	Подання роботи керівнику.	15.12.2022	Виконано
10	Подання роботи на рецензію.	16.12.2022	Виконано
11	Допуск до захисту.	17.12.2022	Виконано

Студент

Керівник проекту (роботи)


 (прізвище)

 (прізвище)

Зенцов М. Ю.

(прізвище та ініціали)

Полярус О. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Дипломна робота: 86 стор., 33 рисунок, 20 джерел, 1 додаток.

ТОЧНІСТЬ ВИМІРЮВАННЯ, КОЛЬОРОВІСТЬ НАЗЕМНОГО ОРІЄНТИРУ, АВТОНОМНІ МОБІЛЬНІ РОБОТИ, ВІДБИТТЄВА ЗДАТНІСТЬ, ІНТЕНСИВНІСТЬ КОЛЬОРОВОСТІ.

Об'єкт дослідження – кольоровість наземних орієнтирів, що можуть використовуватись для навігації мобільних автономних роботів на незнайомій місцевості.

Предмет дослідження – вимірювання кольоровості наземних орієнтирів в реальних умовах навігації мобільних роботів.

Метою дипломної роботи є розробка методу вимірювання кольоровості наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів і оцінка точності вимірювання цим методом.

Методи дослідження ґрунтуються на використанні теорії кольору, вимірювання кольоровості, оптимальної теорії лінійної фільтрації параметрів випадкових процесів.

Було отримано оптимальну за критерієм максимуму апостеріорної щільності ймовірностей система диференціальних рівнянь, що описує поведінку параметрів кольоровості дослідженого об'єкта і результати оцінки цих параметрів.

ЗМІСТ

Вступ.....	6
Перелік умовних позначень	8
1 Оцінка можливостей активних методів виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами	9
1.1 Постановка завдання	9
1.2 Постановка задачі радіонавігації автономних мобільних роботів	10
1.3 Відбиттєва здатність навколишньої місцевості в різних діапазонах електромагнітних хвиль	15
1.4 Математичні моделі випадкових процесів, які описують амплітуди луна-сигналів від навколишньої місцевості, що виникають при її скануванні	19
1.5 Математичні моделі випадкових процесів, що описують амплітуди луна-сигналів від зосереджених об'єктів на фоні навколишньої місцевості	29
1.6 Комплексування вимірювачів параметрів сигналів, що відбиваються від наземних реперів на фоні навколишньої місцевості.....	34
1.7 Висновки до першого розділу	45
2 Аналіз методів вимірювання кольоровості об'єктів.....	47
2.1 Фізичні основи кольоровості.....	47
2.2 Аналіз датчиків кольоровості.....	47
2.3 Висновки до другого розділу:	50
3 Оптимальна система вимірювання кольоровості об'єктів	51
3.1 Наземний орієнтир для робота як кольоровий об'єкт	51
3.2 Оптимальна схема вимірювання параметрів кольоровості наземного орієнтиру на довільному фоні.....	56
3.3 Висновки до третього розділу:	69
4. Вимірювання стрибків інтенсивності кольорів в інтересах виявлення наземних орієнтирів автономними мобільними роботами	70
4.1 Сучасні методи виявлення різких змінювань інтенсивності кольору	70
4.2 Сутність методу виявлення і вимірювання стрибків інтенсивності кольору ...	71

4.3 Аналіз результатів моделювання оптимальної системи вимірювання стрибка інтенсивності кольору.....	77
4.4 Висновки по четвертому розділу:.....	80
5 Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	81
5.1 Техніка безпеки та промислова санітарія під час роботи на ПК	81
Висновки.....	83
Перелік посилань	84
Додаток А Ілюстративний матеріал дипломної роботи	86

ВСТУП

Виявлення наземних орієнтирів (НО) та визначення їх координат є важливим завданням при навігації автономних мобільних роботів (АМР). Основними вимірювальними інструментами є дистанційні датчики, що працюють в різних діапазонах електромагнітних та ультразвукових хвиль (ЕМХ та УЗХ) і використовують властивості луна-сигналів від НО. Робот під час руху сканує навколишній простір і вимірює параметри луна-сигналів від НО та сусідніх об'єктів як природного, так і штучного походження. Прикладом об'єкту природного походження є ліс, а штучного – металевий стовп. Амплітуда луна-сигналів від навколишньої місцевості в процесі сканування простору може за короткий час істотно збільшуватись, якщо стовп попадає в кутовий сектор, в якому концентруються ЕМХ та УЗХ. Таке різке збільшення амплітуди луна-сигналу може трактуватись як стрибок амплітуди або імпульс, форма якого залежить від форми головної пелюстки діаграми спрямованості передавальної та приймальної антен, які розміщені на роботі, та відбивальних властивостей наземного орієнтиру і навколишніх об'єктів (рельєф місцевості, окремі дерева або ліс, кущі, будівлі тощо). Тривалість зазначеного імпульсу (стрибка) залежить від швидкості сканування та ширини діаграми спрямованості антени. Стрибок амплітуди луна-сигналу виникає не завжди. Для цього потрібно, щоб наземний орієнтир був самотнім, тобто біля нього не повинно бути інших об'єктів, що відбивають хвилі.

Подібні явища проявляються і в оптичному діапазоні хвиль, хоча умови поширення ЕМХ в навколишньому середовищі (стан погоди, час доби тощо) істотно впливають на характеристики луна-сигналів. На відміну від радіо діапазону тут можливе виникнення не тільки стрибків амплітуди луна-сигналів, але і стрибків координат кольоровості об'єктів. При наявності великої кількості відбиваючих елементів біля НО наземний орієнтир не може бути виявленим в радіодіапазоні, але виявляється в оптичному, якщо його колір істотно відрізняється від кольору об'єктів навколишнього середовища. Отже, застосування декількох каналів для

виявлення стрибків параметрів луна-сигналів від НО може підвищити надійність виявлення наземних орієнтирів. Перешкодою для якісного виявлення роботів є те, що сигнал активного засобу випромінювання відбивається не тільки від орієнтиру, але і від навколишньої поверхні різних об'єктів, що приводить до маскуванню корисного сигналу завадами. Звідси випливає необхідність пошуку інших ознак для виявлення НО. Серед таких ознак дуже важливим є кольоровість наземного орієнтиру та навколишньої місцевості. Метою дипломної роботи є розробка методу вимірювання кольоровості наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів і оцінка точності вимірювання цим методом. Для цього в роботі синтезована система оптимальної фільтрації параметрів кольоровості і оцінені похибки їх вимірювань для різних умов спостереження.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

GPS – глобальна супутникова система навігації;

RGB – red, green, blue, червоний, зелений, синій;

EMX – електромагнітна хвиля;

AMP – автономний мобільний робот;

НО – наземний орієнтир;

СІ – система інтернаціональна;

УЗХ – ультразвукова хвиля;

СДР – система диференціальних рівнянь;

ДС – діаграма спрямованості;

ПК – персональний комп'ютер.

1 ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ АКТИВНИХ МЕТОДІВ ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ ОРІЄНТИРІВ АВТОНОМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ

1.1 Постановка завдання

Розвиток теорії та практики сучасних мобільних роботів одночасно передбачає підвищення точності їх навігації в незнайомій місцевості. Позиція робота на поверхні Землі якісно визначається системою GPS, але в деяких випадках ефективність цієї системи може бути зменшена, наприклад, через обмежену видимість супутників. У таких ситуаціях зручно використовувати бортові датчики різних типів для визначення координат об'єктів на землі, зокрема об'єктів навколишнього середовища [1] або важливих для навігації орієнтирів. На основі цих орієнтирів вимірюються кутові координати робота і вирішується проблема його локалізації [2]. Найпоширенішим є розміщення датчиків в різних діапазонах електромагнітних хвиль (ЕМХ) (мікрохвильовий, оптичний діапазон тощо). Датчики сканують середовище та знаходять перешкоди і об'єкти на шляху руху робота. Деякі з цих об'єктів мають відомі координати і можуть стати орієнтирами для робота, якщо вони надійно виявляються та визначаються їх координати з високою точністю. Проблема складається в тому, що ці орієнтири є пасивними, які лише відбивають електромагнітні хвилі, що створюються передавачем, який розташований на роботі. Поруч із ними є багато вторинних випромінювачів (дерева, чагарники, рослинність, нерівності земної поверхні тощо), які створюють фон відбитих сигналів, амплітуда яких може перевищувати амплітуду сигналу, відбитого від орієнтиру. Зондування навколишнього простору за допомогою робота часто виконується в діапазоні світлових довжин хвиль [3, 4] або в інших смугах радіочастот [5]. Звідси випливає завдання оцінювання можливостей активних методів локації з виявлення пасивних наземних орієнтирів і визначення похибок вимірювання положення цих орієнтирів на місцевості.

1.2 Постановка задачі радіонавігації автономних мобільних роботів

Автономний мобільний робот (АМР) здійснює навігацію на незнайомій місцевості у відсутності на ній сигналів GPS або їх ослабленню чи придушення завадами. На борту робота встановлений радар або декілька малогабаритних радарів, що працюють на різних частотах, які істотно відрізняються між собою. Система може функціонувати спільно з лазерними, ультразвуковими та іншими вимірювальними системами і здатна дублювати можливості системи технічного зору. Інформація з усіх вимірювачів обробляється системою інтелектуального аналізу даних, яка розробляє рішення про положення радара на місцевості, а також про тип місцевості, форму рельєфу, що також необхідне для навігації.

Вважаємо, що нерухомий АМР сканує навколишній простір з метою визначення положення робота на місцевості, визначення типу місцевості та форми рельєфу. Всі навколишні об'єкти розділимо на зосереджені та розподілені. Прикладами зосереджених об'єктів є предмети людської діяльності (машини, стовпи, окремі будівлі), а також природного характеру (окреме дерево, пагорб на рівнинній місцевості). Розподіленими об'єктами можна вважати майже неперервні будівлі в місті, ліс, пересічену місцевість тощо). Радіонавігація мобільних роботів, як правило, може здійснюватися з використанням зосереджених об'єктів з відомими координатами. Якщо координати окремого об'єкту визначаються в процесі вимірювань, то можна цей об'єкт вважати опорним і присвоювати йому початкові координати на місцевості, по якій рухається робот. Розподілені об'єкти специфічної форми, які явно виділяються на фоні навколишнього середовища, також можуть бути використані для навігації роботів, однак у радіолокаційному діапазоні відображення від них частіше всього є завадовими.

Розглянемо вид зверху на край рівної поверхні без рослинності, яка опромінюється радаром робота (рис унок 1.1).

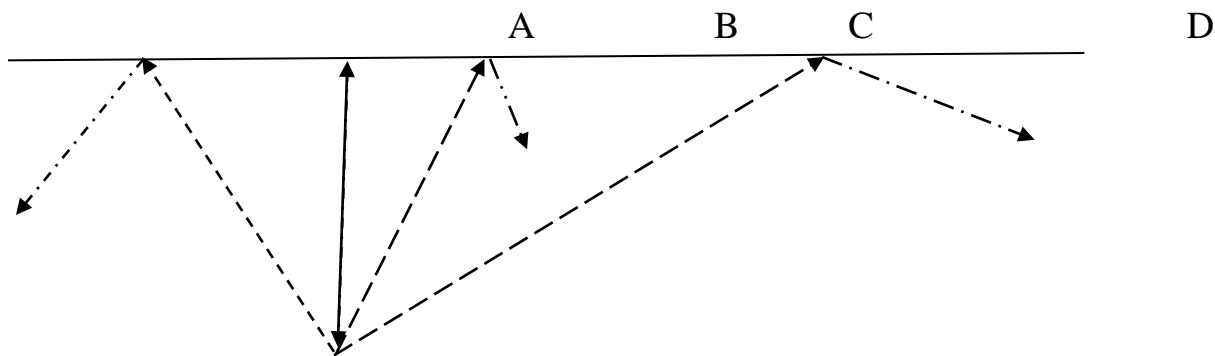


Рисунок 1.1 – Схема створення відбитих сигналів при скануванні рівної поверхні

Відбиті електромагнітні хвилі формуються на рівних майданчиках, центрами яких є точки A, B, C, D, проте в напрямку на антену радара відбитий сигнал (луна-сигнал) приходить тільки з точки B. Він несе інформацію про дальність від радара до точки B, а для умов рисунку 1.1 і про дальність до поверхні.

Якщо рівна (в глобальному сенсі) поверхня має дрібномасштабні нерівності висотою h , рослинність (траву, кущі) тощо, то відбиті сигнали потраплять на антену радара від усіх точок цієї поверхні (рисунок 1.2).

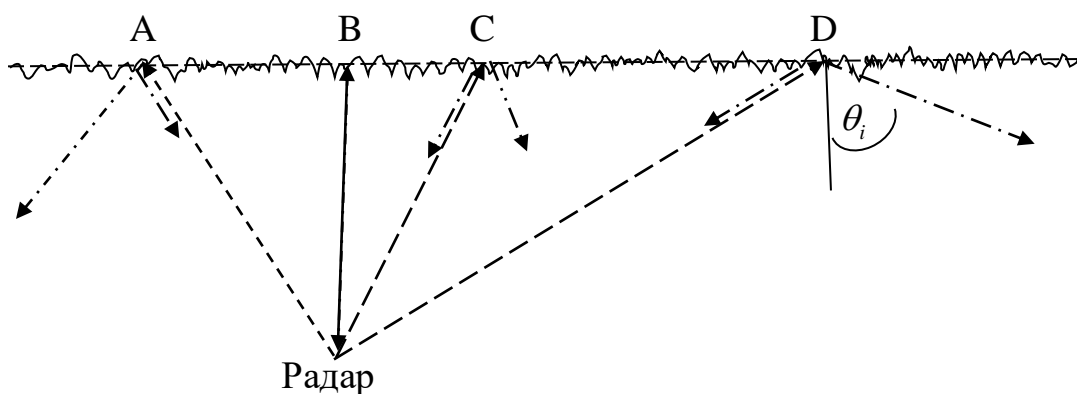


Рисунок 1.2 – Схема створення луна-сигналів від поверхні з дрібномасштабними нерівностями

Найбільшу амплітуду має сигнал, що відбитий в точці В. На вході приймача радара буде спостерігатися в процесі сканування випадковий процес амплітуд відбитих сигналів з різким збільшенням амплітуди в момент проходження напрямку головного максимуму діаграми спрямованості антени радара через цю точку. Таке різке збільшення випадкової амплітуди в певний момент часу τ_{jump} називається "стрибком" амплітуди.

Схема, що показана на рисунку 1.2, трансформується в схему (рисунок 1.1) в тих випадках, коли виконується критерій Релея [6]

$$h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_i}, \quad (1.1)$$

де h - найбільша висота дрібномасштабних нерівностей поверхні,

λ - довжина ЕМХ,

θ_i - кут падіння хвилі на поверхню в деякій i -тій точці (рисунок 1.2).

У точці В кут падіння хвилі $\theta_i = 0$ і тоді $h < \frac{\lambda}{8}$. Таким чином, відбиття в точці

В є дзеркальним, якщо максимальна висота нерівностей поверхні не перевищує восьму частину довжини хвилі. При $\lambda = 1$ м ця висота становить 12,5 сантиметрів і від такої нерівної поверхні відбувається дзеркальне відбиття. Майданчики навколо інших точок А, С, D формують дифузне відбиття ЕМХ в напрямку на приймальну антену радара робота. Для зручності і простоти термінології будемо називати майданчик навколо точки В, яка дзеркально формує відбиту хвилю в бік антени радара, дзеркальною точкою. Якщо критерій Релея не виконується, відбиття в точці В вважається дифузним і амплітуда луна-сигналу, а також ймовірність стрибка амплітуди може істотно зменшитися. Відбиття хвиль з малими довжинами від рівної поверхні, як правило, є дифузним, оскільки на реальній поверхні дрібномасштабні нерівності і рослинність існують практично завжди. Таким чином, відповідно до критерію Релея, для отримання дзеркального відбиття ЕМХ

від шорсткої поверхні необхідно використовувати випромінювання з відносно великою довжиною хвилі $\lambda > 8h \cos \theta_i$.

Для умов, показаних на рисунках 1.1, 1.2, дзеркальних точок з точок А, С, D отримати неможливо, однак, якщо земна або інша поверхня є кривою, то поява луна-сигналів з подібних точок стає можливим, якщо $\theta_i = 0$, тобто частина кривої поверхні є плоскою і перпендикулярною хвильовому вектору падаючої хвилі. Більш того, можлива наявність декількох точок B_1, B_2, B_3 , в яких виникає дзеркальне відбиття ЕМХ в напрямку на антену радара, що встановлений на мобільному роботі (рисунок 1.3).

Тут можливі дві основні ситуації. У першій робот сканує навколишній простір антеною з вузькою діаграмою спрямованості (ДС) антени. Це можна забезпечити, використовуючи малу довжину хвилі (сантиметровий або міліметровий діапазон хвиль). Опромінення точок B_1, B_2, B_3 здійснюється послідовно і приймач радара приймає луна-сигнал від кожної дзеркальної точки в різні моменти часу, причому ці точки розрізняються по кутовій координаті.

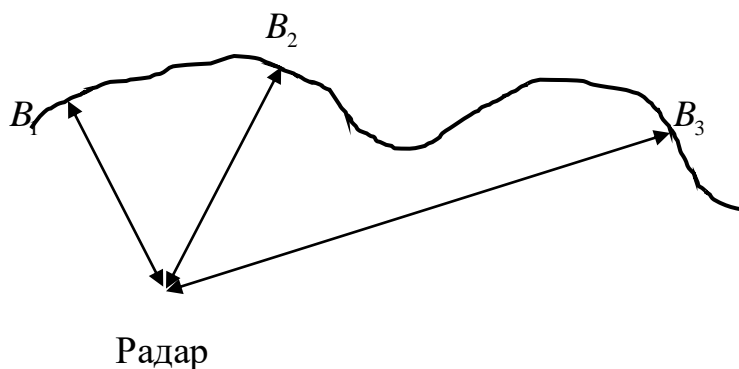


Рисунок 1.3 - Схема створення луна-сигналів від нерівної гладкої поверхні

У другій ситуації використовуються ЕМХ з великою довжиною хвилі і антена має широку ДС. Відбиття від точок B_1, B_2, B_3 стає дзеркальним, але луна-сигнали не розрізняються по кутових координатах. У апертурі антени виникає інтерференційне поле, з якого складно виділити інформацію про відбитий сигнал

від кожної дзеркальної точки, кількість яких може бути невідомим. Визначити кутове положення в багатьох випадках можна з використанням радара з вузькою ДС антени. І хоча при цьому переважає дифузне розсіювання ЕМХ, дзеркальна складова амплітуди сигналів може бути достатньою для того, щоб виділити дзеркальну точку в процесі сканування на фоні дифузного відбиття електромагнітних хвиль.

Вище було проведено евристичний аналіз процесу розсіювання хвиль від земної поверхні. Існують різні методи розрахунку характеристик розсіяних хвиль, але при практичному застосуванні роботів їх використовувати неможливо, оскільки важко описати розрахункову ситуацію через постійні зміни умов локації в процесі сканування та руху робота. Проте, при навігації роботів необхідно отримувати максимум інформації про навколишню місцевість, особливо, коли апріорні відомості про місцевість обмежені, наприклад, при русі робота на іншій планеті. Таку інформацію містять луна-сигнали від місцевості, зокрема, про форму рельєфу, наявності рослинності, лісу, зосереджених об'єктів штучного і природного походження. Характеристики сигналів можна заздалегідь розрахувати для типових умов навігації роботів, використовуючи сучасні методи аналізу. Далі інтелектуальні системи, що встановлені на роботі, зможуть з високою ймовірністю визначити характер місцевості, по якій він рухається.

Згідно [7], наземний орієнтир є фізичним об'єктом, що створений людиною або природою, який легко розпізнається технічними засобами. Розпізнавання наземного орієнтиру мобільними роботами передбачає використання послідовного порівняння відео зображень орієнтирів з опорними раніше розпізнаними зображеннями [8]. Строгі геометричні методи визначення форми орієнтира застосовувати не раціонально, оскільки реальна його форма може бути розмита, наприклад, стовп, прикритий деревами, а кількість різних орієнтирів може бути великим. В [9] повідомляється, що створена база даних з 900 орієнтирів. Тут важливо визначити характерні риси орієнтира і віднести його до якої-небудь групи, якщо, звичайно, він не унікальний. Отже, виникає завдання побудови моделей орієнтирів, а також моделей невідомої місцевості, які можуть використовуватися

для побудови мап. Моделі наземних орієнтирів і невідомого навколишнього середовища можуть бути побудовані не тільки на основі відео спостережень, але і спостережень за допомогою радарів, оскільки в багатьох випадках важко отримати якісні відео зображення орієнтирів і навколишньої місцевості, наприклад, в умовах ночі, туману тощо.

В даний час вже створені самокеровані роботи, що можуть виявляти перешкоди і автоматично усувати можливість зіткнення з ними. Для цього на роботі використовуються ультразвукові та інші датчики разом з відповідним програмним забезпеченням. [10]. Дальність дії цих сенсорів є невеликою, а значить, вони є компактними і споживають незначну енергію. Підвищення дальності сенсорів не потребується, що обумовлено невеликою швидкістю руху роботів. Для швидкісних роботів, наприклад, автоматичних автомобілів вимоги до дальності виявлення перешкод збільшуються. Надійним засобом реалізації цих вимог є використання радарів на роботах.

Більш потужним засобом отримання надійної і якісної інформації про навколишній простір є об'єднання вимірювальної інформації, отриманої різними типами сенсорів, наприклад, ультразвукових, радіолокаційних, механічних. Це проблема комплексування вимірювачів або змішування інформації від датчиків, що побудовані на різних фізичних принципах [11]. Для локалізації мобільних роботів на місцевості найбільш часто використовуються триангуляційні методи [12], які також використовують випромінювання в різному діапазоні хвиль. Природно, що для аналізу радіолокаційної інформації необхідно знати відбивні властивості навколишньої місцевості.

1.3 Відбиттєва здатність навколишньої місцевості в різних діапазонах електромагнітних хвиль

Існує багато наукових праць, в якій розглядаються методи розрахунку розсіяних від об'єктів хвиль. Розглянемо їх коротко і зробимо основні висновки з

результатів теоретичних і експериментальних досліджень, які можуть бути корисними для навігації роботів.

Метод розрахунку розсіяних хвиль повинен вибиратися, виходячи з частотного діапазону ЕМХ, що використовуються, поляризації хвиль, стану відбиттєвої поверхні і деяких інших чинників, які тут не розглядаються. Для розрахунку характеристик розсіяних хвиль на поверхні з дрібномасштабними нерівностями використовується метод малих збурень, а якщо радіус кривизни поверхні значно перевищує довжину хвилі, пріоритетним є наближення Кірхгофа [6]. Для визначення шуканих характеристик необхідно мати інформацію про коефіцієнти відбиття ЕМХ від поверхні, які, в свою чергу, залежать від комплексної діелектричної проникності поверхні $\dot{\epsilon} = \epsilon - j60\lambda\sigma$, де ϵ - дійсне значення діелектричної проникності ґрунту, λ - довжина ЕМХ, σ - питома провідність ґрунту.

При наявності на ґрунті неоднорідних розподілених об'єктів електричні характеристики складної за складом системи замінюються на еквівалентні або ефективні значення. Якщо на чорноземному ґрунті є рослинний покрив, то ефективне значення діелектричної проникності для довжини хвилі $\lambda = 3,2$ см складає ϵ_{ef} дорівнює від 4 до 9,5 см влітку і $\epsilon_{ef} = 12$ см взимку. Аналогічні характеристики на тій же довжині хвилі для луки з чагарниками складають відповідно ϵ_{ef} дорівнює від 10 до 12 см влітку і ϵ_{ef} дорівнює від 2,3 до 2,7 см взимку, а для лісових районів ϵ_{ef} дорівнює від 2,5 до 5 см на довжинах хвиль від 1,25 см до 70 см. Питому провідність ґрунту з рясною рослинністю дуже складно промоделювати, оскільки на неї впливають багато чинників.

Як випливає з наведених даних, електричні характеристики ґрунту є різноманітними і тому важко створити єдину модель. Внаслідок цього, після застосування рівнянь Максвелла зазвичай переходять до оцінки полів розсіяних хвиль, використовуючи рівняння переносу, функції Гріна, а також наближені рішення інтегральних рівнянь для поверхневого струму [13]. Електромагнітне поле хвиль, відбитих від довільної поверхні, визначається як сума поля, відбитого від деякої середньої гладкої поверхні (не обов'язково рівної), і поля збурень,

викликаного розсіюванням хвиль на дрібномасштабних нерівностях. Граничні умови переносяться з загальної поверхні на усереднюючу гладку поверхню, що є непростотою процедурою. Таким чином, при визначенні загального розсіяного поля одночасно використовується метод малих збурень і метод Кірхгофа.

Поняття дрібномасштабних і великомасштабних нерівностей тісно пов'язані з довжиною хвилі, що видно з критерію Релея. Форму поверхні, яка визначається певною складною функцією $h(x, y)$, можна уявити поруч у вигляді суми добутків ортогональних функцій на випадкові коефіцієнти, зокрема, ряду Фур'є. Для кожного типу поверхні випадкові коефіцієнти розподілені по деякому закону. Для практичних цілей часто представляють функцію, яка описує форму поверхні, сумою трьох функцій [14]. Перша функція описує великомасштабні нерівності, друга - дрібномасштабні, а третя - ефективну висоту структури, яка утворена елементами рослинності. Для навігації роботів становить інтерес відбиття хвиль від поверхні в бік антени радара робота, що вимагає інформації про коефіцієнт відбиття ЕМХ в цьому напрямку. Поверхня в цьому випадку моделюється у вигляді сукупності фацетів, кожен з яких покритий дрібномасштабними неоднорідностями [14]. Результуюче поле є сумою когерентної і некогерентного становить від усіх фацетів. Головним фактором, який визначає поле хвилі з зазначеного напрямку, є фазові відносини між парціальними відбитими хвилями, особливо, коли кількість цих хвиль мало, що може іноді приводити до інтерференційним завмирань.

Питома ефективна площа відбиття ЕМХ (поверхня розсіювання) статистично шорстких ізотропних поверхонь при кутах падіння близьких до нуля (хвильовий вектор перпендикулярний площині дотичній до поверхні в даній точці) визначається виразом [14]:

$$\sigma_0 = K_{f_0}^2 \frac{l_h^2}{4\sigma_h^2} e^{-\frac{l_h^2}{4\sigma_h^2} \text{tg}^2 \theta}, \quad (1.2)$$

де K_{f_0} - комплексний коефіцієнт дзеркального відбиття ЕМХ,

σ_h^2 - дисперсія висот дрібномасштабних нерівностей,

l_h - радіус кореляції цих нерівностей,

θ - кут падіння хвилі на поверхню, причому $\theta = 0$, якщо здійснюється відбиття хвиль в напрямку антени радара робота.

Аналіз розсіяних хвиль різними структурами поверхні показав [14], що σ_0 складним чином залежить від частоти ЕМХ. При великомасштабних неоднорідностях поверхні питома площа відбиття практично не залежить від частоти. Оскільки масштаб неоднорідностей висот нерівностей істотно перевищує довжину хвилі, домінує дзеркальне відбиття хвиль. Воно є причиною того, що зі збільшенням кута падіння хвилі на поверхню різко зменшується частка дзеркального відбиття в сторону радара і σ_0 швидко зменшується. Наявність дрібномасштабних нерівностей викликає зміну питомої ефективної поверхні розсіювання в залежності від частоти за законами від λ^0 до λ^{-4} . Таким чином, радар робота може відрізнити наявність типу нерівностей на поверхні, якщо він обладнаний передавачами і приймачами, що працюють на різних частотах. Після проведеного калібрування апаратури радара відбиті сигнали на різних частотах будуть близькими по амплітуді, якщо відбиття хвиль відбувається від дзеркальних точок, а на поверхні є великомасштабні неоднорідності рельєфу. В процесі руху робота характер місцевості і амплітуда луна-сигналів можуть змінюватися, що обумовлено істотною залежністю σ_0 від наявності на поверхні розподілених об'єктів. Таким чином, на основі частотної залежності амплітуд луна-сигналів від поверхні може визначатися характер нерівностей на ній (великомасштабні і дрібномасштабні). Більш детальну інформацію про нерівності на основі цього підходу отримати важко. Якщо ж при скануванні ділянки місцевості є різнорідними, то аналіз луна-сигналів може привести до помилкових висновків про зміну характеру нерівностей, тоді як насправді змінився вигляд місцевості. Наприклад, питома площа розсіювання на довжині хвилі 0,86 см на порядок менше для лісної місцевості в порівнянні з неоднорідною місцевістю без

лісу [14]. Є деякі важливі для практики особливості відображення міліметрових хвиль від поверхні, які розглянуті, наприклад, в [15].

В оптичному діапазоні хвилі розсіюються дифузно від об'єктів, які становлять інтерес для навігації роботів. Енергія відбитих хвиль прямо пропорційна коефіцієнту дифузного розсіяння ρ_d , тобто відношенню відбитого і падаючого світлових потоків. У більшості випадків нижні значення ρ_d відповідають меншим довжинам хвиль оптичного діапазону, а верхні значення - найбільшим довжинам цього діапазону. Відбиття від хвойних порід дерев такою залежністю не володіють. Так, в діапазоні $\lambda = 0.6...0.7 \mu\text{m}$ зі збільшенням довжини хвилі коефіцієнт ρ_d спочатку зменшується, а потім знову збільшується. Наведені узагальнені відомості цього підрозділу можуть використовуватися для побудови моделей випадкових процесів амплітуд луна-сигналів, що виникають при скануванні поверхні антеною радара.

1.4 Математичні моделі випадкових процесів, які описують амплітуди луна-сигналів від навколишньої місцевості, що виникають при її скануванні

Випадкові процеси амплітуд луна-сигналів на вході приймача радара утворюються при скануванні антени радара навколишнього простору в процесі руху робота. Навіть при нерухомому роботі утворюється випадковий процес за рахунок того, що антена радара опромінює певну частину поверхні розподілених і зосереджених об'єктів і при скануванні вид поверхні змінюється випадковим для спостерігача чином внаслідок зміни рельєфу, рослинності тощо. Відповідно змінюються характеристики випадкових луна-сигналів на вході і виході приймача радара.

Величина опромінюваної частини поверхні залежить від ширини ДС антени радара. При вузькій ДС (як правило, для малих довжин ЕМХ) на малих дальностях опромінюється невелика частина поверхні навколишньої місцевості (рисунок 1.4). Відбиті сигнали приходять на антену з усіх ділянок опромінюваної поверхні. Їх амплітуда визначається шириною ДС антени, видом

поверхні з дрібномасштабними нерівностями і рослинністю. При однорідно розподілених характеристиках нерівностей і рослинності на вході приймача спостерігається деякий стаціонарний випадковий процес (рисунок 1.5) амплітуд луна-сигналів. Чим ширше ДС антени радара, тим більше відбиваючих елементів опромінюваної поверхні беруть участь у створенні луна-сигналу з певного напрямку, що призводить до усереднення амплітуд і зменшення дисперсії флуктуацій луна-сигналів. Якщо кардинально змінюється вид місцевості, наприклад, спостерігається перехід від степової до лісної місцевості, дисперсія луна-сигналів може істотно змінитися. Це є важливою ознакою для прив'язки до орієнтирів при навігації роботів.

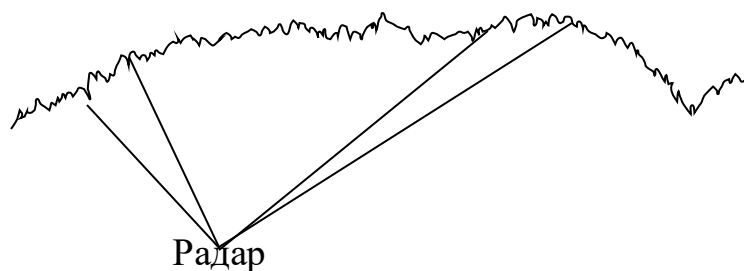


Рисунок 1.4 - Схема опромінювання ділянок шорсткої поверхні вузькоспрямованою антеною радара

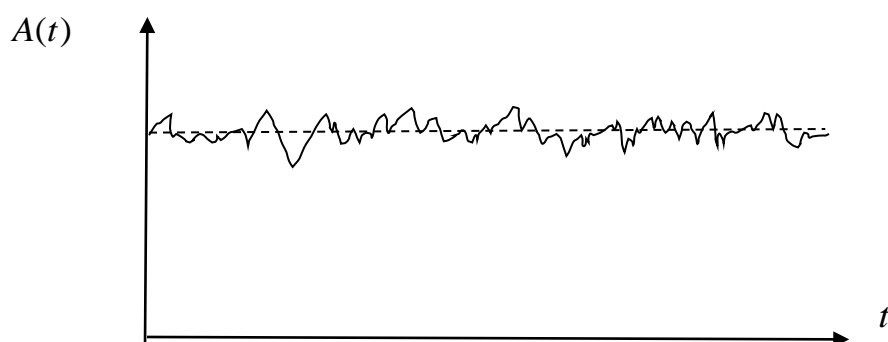


Рисунок 1.5 - Приклад реалізації стаціонарного випадкового процесу амплітуд луна-сигналов, що відбиті від шорсткої поверхні в процесі її сканування

Описаний вище процес відноситься до дифузного відбиття сигналів від поверхні. При наявності на поверхні дзеркальних точок в окремі моменти часу за рахунок дзеркальної складової може різко збільшитися амплітуда луна-сигналу від поверхні в якомусь напрямку, тобто виникне стрибок амплітуди (рисунок 1.6).

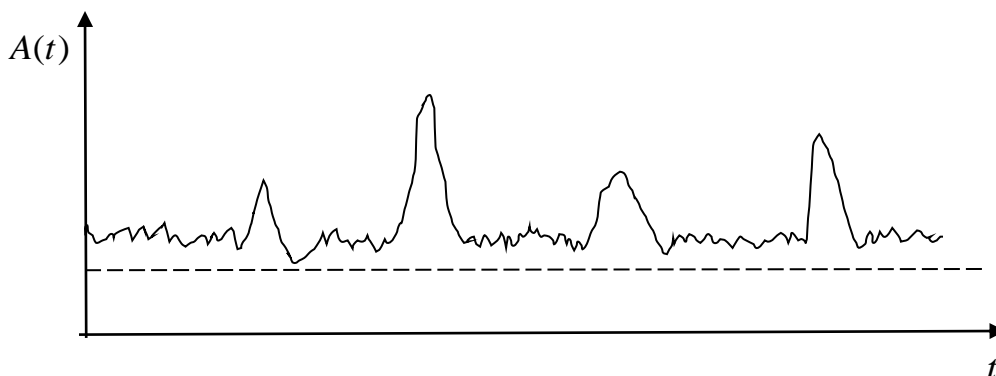


Рисунок 1.6 - Приклад реалізації стаціонарного випадкового процесу амплітуд луна-сигналів, що відбиті від шорсткої поверхні в процесі її сканування, при наявності на поверхні дзеркальних точок

Це явище також може використовуватися для навігації роботів. Амплітуда стрибка повністю визначається дзеркальною складовою відбитого сигналу, а остання залежить від виду навколишньої місцевості. Тривалість стрибка визначається швидкістю сканування простору антеною. Форму стрибка амплітуди при моделюванні можна описати гауссоїдою. Для надійного виявлення стрибка він повинен мати хороші енергетичні характеристики, тобто амплітуду і тривалість. Тривалість стрибка визначається характером переходу від повністю дифузного відбиття ЕМХ від поверхні до змішаного дифузно-дзеркального відбиття і, природно, швидкістю сканування простору. При швидкому скануванні стрибок амплітуди виявити важко на фоні дифузно відбитих сигналів і перешкод. Повільне сканування дозволяє створити умови для виявлення стрибка амплітуди.

Таким чином, в секторі сканування антени з вузькою ДС випадковий процес є сумою стаціонарного випадкового процесу і випадкових функцій, які в випадкові моменти часу описують стрибки амплітуд (рисунок 1.7).

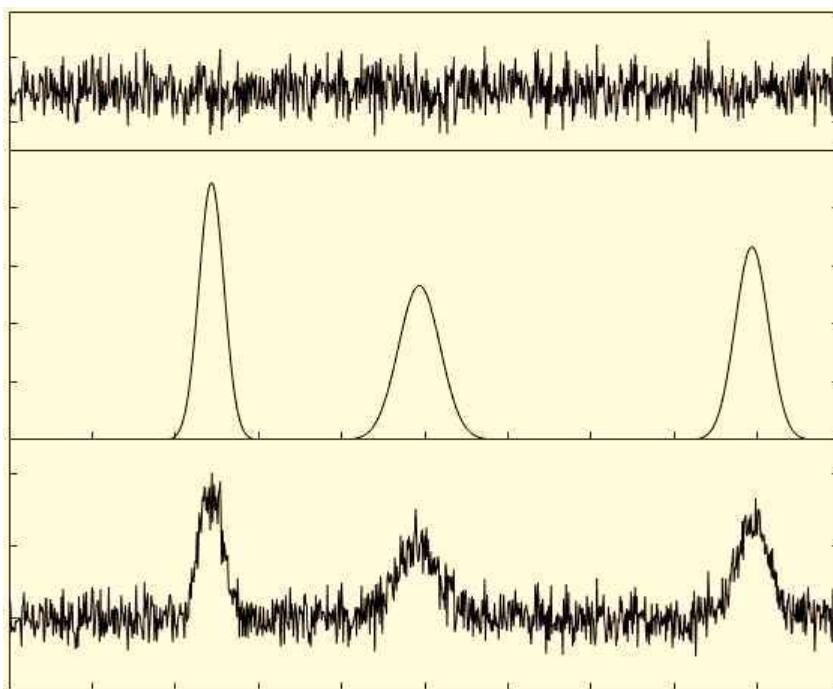


Рисунок 1.7 – Схема формування сумарного випадкового процесу амплітуд луна-сигналів, відбитих від шорсткої поверхні в процесі її сканування, при наявності на поверхні трьох дзеркальних точок

Якщо довжина ЕМХ є великою (дециметрові, метрові хвилі), тобто виконується умова дзеркального відбиття (1.1), дифузно відображені луна-сигнали будуть мати малу амплітуду в порівнянні з дзеркальними сигналами і їх в ряді випадків можна не враховувати. Діаграма спрямованості антени радара на роботі невеликих розмірів не може бути вузькою, оскільки її ширина пропорційна довжині хвилі і обернено пропорційна лінійного розміру антени, який неможливо зробити великим на малорозмірному мобільному роботі. Отже, антена опромінює велику площу поверхні на місцевості. Луна-сигнали від поверхні формуються в напрямку на радар тільки від дзеркальних точок. Кількість цих точок визначається шириною ДН антени і видом великомасштабних нерівностей на поверхні, які, в основному, визначають її форму. Для рівної поверхні слід очікувати однієї дзеркальної точки. Для поверхні складної форми кількість дзеркальних точок може досягати декількох одиниць. Якщо дзеркальна точка одна, то на вході приймача спостерігаються дифузні сигнали, амплітуда яких залежить від нерівностей, а також великий

стрибок амплітуди, який легко можна знайти. При наявності двох дзеркальних точок утворюється інтерференційна картина складання двох коливань з різними фазами, тобто сумарне коливання може мати амплітуду від нуля до подвійної амплітуди від двох дзеркальних точок. При цьому в процесі сканування в межі ширини ДН може потрапити спочатку одна перша дзеркальна точка, потім дві, потім знову одна друга точка. Можливі інші варіанти формування сумарного луна-сигналу. Аналогічна картина спостерігається для випадків потрапляння в межі ширини ДН декількох дзеркальних точок. Випадковий процес, що описує луна-сигнал від нерівної поверхні в цьому випадку, може бути нестационарним. У нього може істотно змінюватися середнє значення, проте дисперсія може вести себе складним чином: з одного боку, внаслідок малих дифузних відображень її слід очікувати невеликою, а з іншого боку, внаслідок випадкових інтерференційних ефектів з глибокими завмираннями вона може досягати великих значень.

Існує ще один варіант відбиття від поверхні, коли кількість дзеркальних точок дорівнює нулю. Це відповідає ситуації (рисунок 1.8) сканування похилої по відношенню до радару поверхні, коли на вході приймача будуть присутні тільки дифузно відбиті сигнали. Це ще одна ознака розпізнавання поверхні радаром робота, але він можливий тільки при використанні великих довжин хвиль по відношенню до нерівностей поверхні.

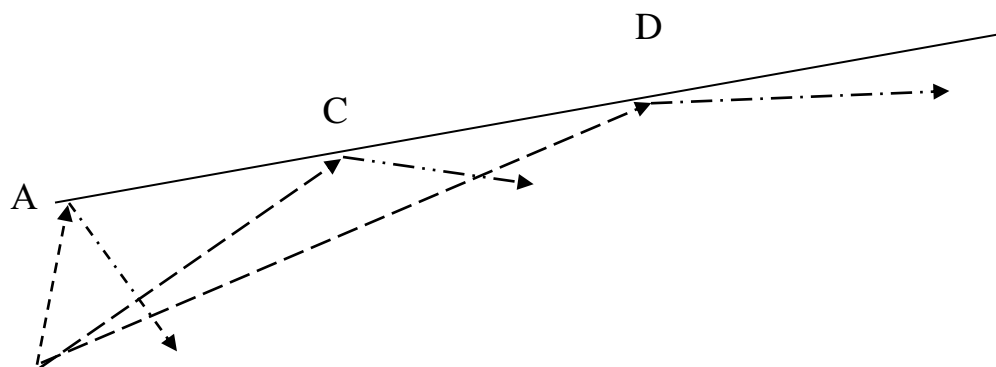


Рисунок 1.8. – Ілюстрація випадку відсутності дзеркальних точок на опромінюваній рівній поверхні

Зауважимо, що характеристики таких хвиль не спотворюються в тропосфері Землі, тобто впливом середовища на поширення радіохвиль можна знехтувати. Інакше відбувається з оптичними, міліметровими і навіть з сантиметровими ЕМХ, які спотворюються в тропосфері внаслідок впливу опадів, туману, газів тощо. Будемо вважати, що дальності локації є відносно невеликими, так що на таких відстанях спотворення характеристик луна-сигналів не досягають великих значень, тобто їх можна не враховувати.

Розглянемо тепер ефективну площу поверхні розподілених і зосереджених об'єктів.

Постановка задачі. Радар робота опромінює навколишню місцевість. Потужність передавача P , коефіцієнт підсилення антени $G = G_m F^2(\theta, \varphi)$, де G_m - максимальний коефіцієнт підсилення антени, $F^2(\theta, \varphi)$ - нормована діаграма спрямованості (ДС) антени по потужності, θ, φ - кути в двох ортогональних площинах. Щільність потоку потужності первинного випромінювання на відстані r від радара

$$\Pi_1 = \frac{PG_m F^2(\theta, \varphi)}{4\pi r^2}. \quad (1.3)$$

Електромагнітні хвилі (ЕМХ) на ділянці відбиваючої поверхні наводять струми і ця поверхня стає вторинним випромінювачем і створює щільність потужності вторинного випромінювання в місці розміщення приймача радара

$$\Pi_2 = \Pi_1 \frac{\sigma_e}{4\pi r^2}, \quad (1.4)$$

де σ_e - ефективна площа поверхні розсіювання відбиваючої поверхні.

Потужність вторинного розсіювання ЕМХ після обробки приймальною антеною радара, тобто на вході приймача

$$P_r = A_{ef} \Pi_2, \quad (1.5)$$

де A_{ef} - ефективна площа приймальної антени, яка визначається за формулою

$$A_{ef} = \frac{\lambda^2}{4\pi} F^2(\theta, \varphi) = A_{efm} F^2(\theta, \varphi), \quad (1.6)$$

де λ - довжина ЕМХ,

A_{efm} - максимальне значення ефективної площі приймальної антени.

З урахуванням формул 1.3-1.6 отримуємо

$$P_r = \frac{\sigma_e P G_m A_{efm} F^4(\theta, \varphi)}{(4\pi r^2)^2}. \quad (1.7)$$

Формула (1.7) може використовуватись для визначення потужності відбитого від поверхні сигналу. Згідно з співвідношенням (1.4)

$$\sigma_e = 4\pi r^2 \cdot \frac{\Pi_2}{\Pi_1}. \quad (1.8)$$

Визначимо відношення $\Pi_2 \cdot \Pi_1^{-1}$. Оскільки Π_1 розраховується за формулою (1.3), оцінимо щільність потоку потужності Π_2 . Сама потужність P_2 вторинного випромінювання розраховується як повний потік потужності відбитої ЕМХ через напівсферу з радіусом r . Елемент dS цієї напівсфери

$$dP_2 = \Pi_{2m} \cos \theta \cdot dS, \quad (1.9)$$

де Π_{2m} - максимальна щільність вторинного потоку потужності, яка проявляється в напрямку на радар робота. Елемент цієї площі

$$dS = r \cdot d\theta \cdot r \cdot \sin \theta \cdot d\varphi = r^2 \sin \theta d\theta d\varphi. \quad (1.10)$$

Повна потужність вторинного випромінювання

$$P_2 = \int_S \Pi_{2m} \cos \theta dS = \Pi_{2m} r^2 \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cos \theta d\theta = \pi r^2 \Pi_{2m}. \quad (1.11)$$

З іншого боку, з фізичних міркувань

$$P_2 = \Pi_1 S_e R_{h,v}, \quad (1.12)$$

де S_e - площа ділянки поверхні, від якої відбувається відбиття ЕМХ,

$R_{h,v}$ - коефіцієнти відбиття від поверхні для горизонтальної та вертикальної поляризації хвиль.

Прирівнюємо співвідношення (1.11), (1.12)

$$\pi r^2 \Pi_{2m} = \Pi_1 S_e R_{h,v}. \quad (1.13)$$

Звідси:

$$S_e R_{h,v} = \pi r^2 \frac{\Pi_{2m}}{\Pi_1}. \quad (1.14)$$

Тепер порівняємо (1.8) та (1.14). З них випливає, що в правій частині співвідношення (1.14) представлена ЕПР поділена на 4. Тоді повне значення ЕПР

$$\sigma_{e_m} = 4S_e R_{h,v}. \quad (1.15)$$

Отже, формула (1.15) описує ЕПР ділянки дифуздорозсіюючої поверхні при її опроміненні по нормалі. Під кутом θ від нормалі маємо

$$\sigma_e(\theta) = \sigma_{e_m} \cos^2 \theta. \quad (1.16)$$

Якщо ширина ДС антени в двох ортогональних площинах становить $2\theta_{0.5P}$ і $2\varphi_{0.5P}$, то тоді

$$S_e \approx r^2 \cdot 2\theta_{0.5P} \cdot 2\varphi_{0.5P}. \quad (1.17)$$

Коефіцієнти відбиття ЕМХ від поверхні $R_{h,v}$ є ефективними коефіцієнтами, тобто вони враховують наявність на поверхні рослинності тощо. Для рівної однорідної поверхні коефіцієнт відбиття хвилі горизонтальної поляризації становить [30]

$$R_h = \frac{\cos \theta - \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{\dot{\varepsilon} - \sin^2 \theta}}, \quad (1.18)$$

де θ - кут падіння ЕМХ з довжиною λ на рівну поверхню (він дорівнює нулю при перпендикулярному падінні хвилі на поверхню);

$\dot{\varepsilon}, \sigma$ - комплексна діелектрична проникність матеріалу поверхні та його питома провідність відповідно, як показано, наприклад, в таблиці 1, причому $\dot{\varepsilon} = \varepsilon - j60\lambda\sigma$.

Після підстановки (1.15), (1.16) в вираз (1.7) отримуємо потужність сигналу на виході приймача

$$P_r = \frac{PG_m A_{ef_m} F^4(\theta, \varphi) R_{h,v} 2\theta_{0.5P} 2\varphi_{0.5P} \cos \theta}{(4\pi r)^2}. \quad (1.19)$$

Співвідношення (1.19) використовується для оцінки корисного сигналу від орієнтиру, а також для відбитого і одночасно завадового сигналу для приймача радара АМР. Вважаємо, що ділянка поверхні навколишньої місцевості розміром одночасно опромінюється двома антенами на різних частотах з однаковою шириною ДС антени. Це легко підібрати шляхом вибору розмірів антен та амплітудно-фазового розподілу поля в їх розкритті. Перед застосуванням вимірювальні канали на обох частотах калібрують шляхом змінювання параметрів P, G_m, A_{ef_m} під час опромінювання рівної провідної поверхні з однакової дальності. Результатом калібрування є однаковість амплітуд відбитих сигналів в обох частотних каналах з напрямку головних максимумів ДС антен.

Внаслідок дифузного розсіювання ЕМХ сантиметрового діапазону зникають нульові значення амплітуди в першому частотному каналу (лінія червоного кольору) і падає амплітуда в напрямку головного максимуму ДС антени. Наявність на місцевості зосереджених об'єктів, які можуть стати орієнтирами для автономних мобільних роботів, робить виклик щодо виявлення таких об'єктів та визначення їх координат відносно інших орієнтирів. Значною проблемою є нерухомість більшості орієнтирів, що не дає можливості використовувати доплерівські методи для відділення луна-сигналів від орієнтирів, від сигналів, що відбилися від нерухомої місцевості. Єдиним підходом залишається розробка методів виявлення різких змін енергетичних характеристик луна-сигналів від місцевості, що виникають при скануванні навколишньої місцевості або при русі робота вздовж цієї місцевості. Якщо наземний орієнтир знаходиться на фоні складної за формою (рельєфом) місцевості, то при скануванні місцевості дійсно будуть відбуватись різкі зміни амплітуди луна-сигналів ("стрибків") як під впливом інтерференційних

ефектів при складанні сигналів, відбитих від дзеркальних точок, так і в результаті появи в межах опромінюваної області зосереджених об'єктів, які можна використовувати в якості орієнтирів. Надійне виявлення стрибків амплітуди сигналів в цьому випадку є неможливим. Отже, найбільш зручною ситуацією, при якій з'являється можливість виявлення наземних орієнтирів, є локація в напрямку похилої місцевості, на якій мало лісу та чагарників.

1.5 Математичні моделі випадкових процесів, що описують амплітуди луна-сигналів від зосереджених об'єктів на фоні навколишньої місцевості

В якості наземного орієнтира можуть використовуватись різні зосереджені об'єкти природного та штучного походження з різними розсіючими властивостями.

Ефективна поверхня розсіювання (ЕПР) зосереджених об'єктів приведена, наприклад, в [21]. Так, ЕПР кулі з ідеально провідною поверхнею та радіусом складає

$$\sigma_s = \pi r^2. \quad (1.20)$$

ЕПР круглого циліндричного металевго стовпа з радіусом r та довжиною L дорівнює [19]

$$\sigma_{\max} = \frac{2\pi r L^2}{\lambda}, \quad (1.21)$$

ЕПР металеві прямокутної пластини з розмірами a і b набагато більшими довжини хвилі

$$\sigma_p = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2}, \quad (1.22)$$

де S - площа пластини, найбільший розмір якої є істотно меншим відстані r між роботом та пластиною.

Формула (1.22) приведена для напрямку радар – ділянка поверхні. В інших напрямках під кутом α

$$\sigma_p(\alpha) = \frac{4\pi S^2}{\lambda^2} \left(\frac{\sin x}{x} \right)^2 \cos^2 \alpha, \quad (1.23)$$

де

$$x = \frac{2\pi a \sin \alpha}{\lambda}. \quad (1.24)$$

Кутовий відбивач зі стороною одного з металевих листів, що дорівнює a , має ЕПР

$$\sigma_{ar} = \frac{4\pi a^4}{3\lambda^2}. \quad (1.25)$$

Аналіз формул (1.21)-(1.25) показує, що ЕПР приведених зосереджених об'єктів по-різному залежать від довжини хвилі ЕМХ, навіть частотна залежність ЕПР металевої кулі проявляється при радіусах кулі, що є сумірною з довжиною хвилі. Це може бути основою для попереднього розпізнавання роботом виду орієнтиру. Однак, головним завданням є розпізнавання ситуації, що характерна для першої та другої групи відбитих сигналів. Як було раніше зазначено, це можна зробити на основі використання істотних відмінностей випадкових процесів, що описують луна-сигнали на різних частотах, що значно відрізняються між собою. Прийняття рішення роботом про існування другої групи в даний діапазон часу приводить до необхідності аналізу луна-сигналів від корисних об'єктів, тобто наземних орієнтирів. При цьому виявляється, що ЕПР цих об'єктів в сантиметровому діапазоні перевищує аналогічний показник в метровому діапазоні, що видно з формул (1.21)-(1.25). Для сигналів першої групи все було навпаки. Отже, ця особливість ЕПР може бути використана для виявлення ситуації, що характерна для першої групи.

Залежність ЕПР зосереджених об'єктів від кутових координат найчастіше має форму типу $\frac{\sin \alpha}{\alpha}$, тобто має головну пелюстку та декілька бічних пелюсток.

Для виявлення стрибків амплітуди луна-сигналів актуальне значення становить тільки головна пелюстка. Врахуємо, що ДС антени радара також має подібну форму. Тоді кут α можна представити як добуток Ωt , де Ω є кутова швидкість сканування простору антеною. Ось чому амплітуду луна-сигналу від орієнтиру доцільно апроксимувати гауссівською залежністю виду

$$A(t) = \frac{A_0}{\sigma_\alpha \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\Omega t)^2}{2\sigma_\alpha^2}}, \quad (1.26)$$

де A_0 - деяка амплітуда відбитого сигналу, що вибирається при моделюванні або визначається в процесі експериментального дослідження,

σ_α - параметр, що характеризує ширину гауссівської залежності.

Слід також врахувати, що $\alpha \leq \alpha_{\max}$,

де α_{\max} - максимальне значення кута, в межах якого відбувається випромінювання і прийом луна-сигналів.

Отже, максимальний стрибок амплітуди луна-сигналу є пропорційним максимальному значенню ЕПР σ_{\max} і є частотно залежним. В першому і другому частотних каналах приймача статистичні характеристики луна-сигналів від середовища повинні описуватись білим шумом, рівень якого в сантиметровому діапазоні найчастіше буде вищим, ніж в метровому. Стрибки амплітуди луна-сигналів від циліндричного металевго стовпа, які оцінюються вимірною системою приймача, у першому та другому частотних каналах визначається за формулою

$$\frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} \approx \frac{f_1}{f_2}, \quad (1.27)$$

де f_1 та f_2 - частоти сигналів в першому та другому частотних каналах відповідно.

Якщо наземний орієнтир є плоскою прямокутною пластиною, то відношення амплітуд луна-сигналів в обох частотних каналах становить

$$\frac{\Delta A_1}{\Delta A_2} \approx \left(\frac{f_1}{f_2} \right)^2, \quad (1.28)$$

що випливає з формули, яка аналогічна (1.27) [19].

Описаний спосіб дає можливість не тільки в окремих випадках розпізнати орієнтири, але й встановити зв'язок координат мобільного автономного робота з цими орієнтирами. Якщо траєкторія робота пролягає недалеко від орієнтирів L_1 і L_2 , то в точках S_1 і S_2 в різний час робот може виявити ці орієнтири (рисунок 1.9). Оскільки відстань d між цими точками та кути β_{ij} є відомими заздалегідь, то відстань до орієнтирів у кожній точці траєкторії робота визначається методами триангуляції. Тут індексом i позначено номер поточної позиції на траєкторії робота, а індекс j - номер наземного орієнтира.

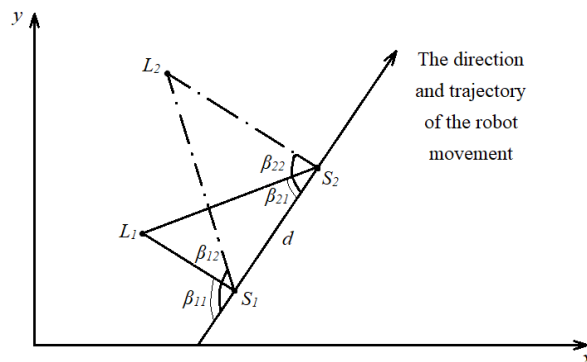


Рисунок 1.9. Траєкторія руху робота відносно двох наземних орієнтирів

Припустимо, що похибка визначення відстані d між поточними точками траєкторії робота невелика. Тоді точність оцінки позиції робота відносно орієнтира визначається похибками вимірювання координат кутів β_{ij} . У результаті просторові похибки визначення робочого положення робота будуть розподілені в межах еліпсу

з осями $k\sigma_\xi$ та $k\sigma_\eta$ [20], де $k = \sqrt{-2\ln(1-p_0)}$ і p_0 є ймовірність попадання похибок положення робота в еліпс з зазначеними осями.

Коефіцієнт $k = 2.15$ для $p_0 = 0.90$ і $k = 3$ при $p_0 = 0.99$.

Розміри еліпсу похибок для одного орієнтира оцінюються за формулами [20]

$$\sigma_\xi = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\cos^2 \beta_i}{\rho_i^2 \sigma_i^2} \right)^{-0.5}, \quad (1.29)$$

$$\sigma_\eta = \left(\sum_{i=1}^2 \frac{\sin^2 \beta_i}{\rho_i^2 \sigma_i^2} \right)^{-0.5}, \quad (1.30)$$

де ρ_i - відстань від антени робота (точка S_1 або S_2) до орієнтиру,

σ_i^2 - дисперсія визначення похибок кутових координат наземного орієнтира приймачем робота.

Просторові похибки σ_ξ , σ_η положення робота суттєво залежать від відстані ρ_i між роботом і орієнтиром і зменшуються на невеликих відстанях. Якщо на відстані $\rho_i \approx 300$ м положення орієнтира визначається з похибками, що не перевищують 10 м, тоді похибка вимірювання кутової координати становить близько одного градуса, що не є проблемою для радіотехнічної системи робота.

Використання двох частотних каналів передбачає спільну обробку вимірювальної інформації, що прихована в луна-сигналах. Особливо важливим є розробка оптимальних систем вимірювання параметрів луна-сигналів та координат корисних для робота об'єктів.

1.6 Комплексування вимірювачів параметрів сигналів, що відбиваються від наземних реперів на фоні навколишньої місцевості

Комплексування вимірювачів означає сумісну обробку сигналів, що відбилися від одного і того ж об'єкту і внаслідок цього мають схожі властивості. Особливістю цього процесу є істотна відмінність пристроїв обробки цих сигналів, які можуть взагалі бути побудованими на різних фізичних принципах. Наприклад, такими сигналами можуть бути радіосигнал та ультразвуковий сигнал, сигнал відеокамери та ультразвуковий сигнал. Оскільки фізична картина відбиття від об'єктів сигналів, що використовують електромагнітні хвилі різних діапазонів, істотно відрізняється, то можна здійснювати комплексування пристроїв обробки цих сигналів при обробці. Як описано раніше, сигнали метрового та міліметрового або оптичного діапазонів мають свою специфіку при відбитті від одного і того ж об'єкту. В той же час можна очікувати і спільних особливостей відбитих сигналів. Важлива для практики особливість може зникнути в одному діапазоні хвиль, але зберегтися в іншому, а для інших умов проявитися навпаки.

Нехай АМР в процесі свого руху одночасно вимірює параметри сигналів, що відбиті від наземного орієнтира на фоні навколишньої місцевості, в різних діапазонах ЕМХ. Приймальна система АМР відстежує випадковий векторний процес $\vec{\xi}(t)$, який ми назвемо спостереженням і опишемо співвідношенням

$$\vec{\xi}(t) = \vec{s}(t, \vec{\chi}(t)) + \vec{n}(t), \quad (1.31)$$

де $\vec{n}(t)$ - вектор-стовпець білих гауссівських шумів з матрицею інтенсивності \mathbf{N} , що визначається з кореляційної функції, тобто з використанням математичного очікування $M\{\}$ від добутку векторів-стовпців в різні моменти часу

$$M\{\vec{n}(t_1)\vec{n}^T(t_2)\} = \mathbf{N} \cdot \delta(t_2 - t_1), \quad (1.32)$$

де $\delta(t_2 - t_1)$ - дельта-функція.

В співвідношенні (1.31) $\vec{s}(t, \vec{\chi}(t))$ є вектор сигналу, що містить корисне повідомлення $\vec{\chi}(t)$, апріорні відомості про яке описуються диференціальним рівнянням

$$\frac{d\vec{\chi}(t)}{dt} = g(t, \vec{\chi}(t)) + \vec{n}_0(t), \quad (1.33)$$

де $g(t, \vec{\chi}(t))$ неперервна векторна функція-стовпець, $\vec{n}_0(t)$ - вектор-стовпець білих шумів повідомлення з нульовим математичним очікуванням та матричною кореляційною функцією

Вважаємо, що реалізації випадкових сигналів двох частот, відбитих від місцевості, описуються співвідношеннями

$$\xi_i(t) = A_i(t) \cos(\omega_{0_i} t - \varphi_i(t)) + n_i(t), \quad (1.34)$$

де $A_i(t)$, $\varphi_i(t)$ та ω_{0_i} - відповідно амплітуда, фаза та кругова частота сигналу в i -тому частотному каналі ($i = 1, 2$),

$n_i(t)$ - білий гауссівський шум в i -тому каналі.

Перший доданок в виразі (1.31), тобто очікуваний сигнал у відповідному каналі для випадку, що розглядається, має вигляд

$$s_1(t) = \chi_{11}(t) \cos(\omega_{0_1} t) + \chi_{12}(t) \sin(\omega_{0_1} t), \quad (1.35)$$

$$s_2(t) = \chi_{21}(t) \cos(\omega_{0_1} t) + \chi_{22}(t) \sin(\omega_{0_1} t),$$

де $\chi_{11}(t)$, $\chi_{12}(t)$ - квадратурні складові сигналу в першому каналі, а $\chi_{21}(t)$, $\chi_{22}(t)$ - ті ж складові в другому каналі.

З урахуванням (1.35) визначаються амплітуди і фази сигналів в цих каналах:

$$A_1(t) = \sqrt{\chi_{11}^2(t) + \chi_{12}^2(t)}, \quad A_2(t) = \sqrt{\chi_{21}^2(t) + \chi_{22}^2(t)}, \quad (1.36)$$

$$\varphi_1(t) = \arctg \frac{\chi_{12}(t)}{\chi_{11}(t)}, \quad \varphi_2(t) = \arctg \frac{\chi_{22}(t)}{\chi_{21}(t)}. \quad (1.37)$$

Вважаємо, що квадратурні компоненти $\chi_{ij}(t)$, ($i, j = 1, 2$) є незалежними гауссівськими марковськими процесами, що описуються рівняннями:

$$\frac{d\chi_{11}(t)}{dt} = -\alpha_1\chi_{11}(t) + n_{0_{11}}(t), \quad (1.38)$$

$$\frac{d\chi_{12}(t)}{dt} = -\alpha_1\chi_{12}(t) + n_{0_{12}}(t),$$

$$\frac{d\chi_{21}(t)}{dt} = -\alpha_2\chi_{21}(t) + n_{0_{21}}(t),$$

(1.39)

$$\frac{d\chi_{22}(t)}{dt} = -\alpha_2\chi_{22}(t) + n_{0_{22}}(t).$$

В рівняннях (1.38), (1.39) $n_{0_{ij}}(t)$ - білі гауссівські шуми, що мають спектральну щільність $\frac{1}{2}N_0$, α_i - коефіцієнти, які визначають ширину спектру випадкових процесів $\chi_{ij}(t)$. З цих рівнянь можна отримати диференціальні рівняння для амплітуд та фаз сигналів, зокрема [22]

$$\frac{dA_i(t)}{dt} = -\alpha_i A_i(t) + \frac{N_0}{4A_i(t)} + n_{0_i}(t). \quad (1.40)$$

Для синтезу оптимальних вимірювачів амплітуди сигналів в i -тому каналі можна скористатись рівнянням (1.40), але це приведе до громіздких викладок, оскільки закон розподілу випадкової амплітуди найчастіше є релеєвським. Рівняння оптимальної фільтрації параметрів сигналу, як правило, ґрунтуються на припущенні про нормальність розподілу цих параметрів. Такі властивості мають квадратурні компоненти сигналу $\chi_{ij}(t)$ і, крім того, рівняння оптимальної фільтрації для квадратурних компонент сигналу є лінійними, що спрощує їх реалізацію та моделювання.

Оптимальна за критерієм мінімуму узагальненої дисперсії система лінійної фільтрації описується наступними векторними диференціальними рівняннями [22]:

$$\frac{d\hat{\chi}}{dt} = \Lambda\hat{\chi} + \mathbf{R}\mathbf{H}^T\mathbf{N}^{-1}(\bar{\xi} - \mathbf{H}\hat{\chi}), \quad (1.41)$$

$$\frac{d\mathbf{R}}{dt} = \Lambda\mathbf{R} + \mathbf{R}\Lambda^T - \mathbf{R}\mathbf{H}^T\mathbf{N}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{R} + \mathbf{N}_0, \quad (1.42)$$

де $\hat{\chi} = \hat{\chi}(t) = (\hat{\chi}_{11}(t), \hat{\chi}_{12}(t), \hat{\chi}_{21}(t), \hat{\chi}_{22}(t))^T$ - вектор-стовпець оцінок квадратурних компонент сигналу для двох каналів спостережень,

\mathbf{R} - кореляційна матриця похибок фільтрації з елементами R_{ij} , яка дорівнює:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} \\ R_{21} & R_{22} & R_{23} & R_{24} \\ R_{31} & R_{32} & R_{33} & R_{34} \\ R_{41} & R_{42} & R_{43} & R_{44} \end{pmatrix}. \quad (1.43)$$

Матриця Λ визначається як:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -\alpha_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_2 \end{pmatrix}. \quad (1.44)$$

В рівняння (1.41), (1.42) входить також матриця спостереження, яка для випадку, що розглядається, має вигляд:

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} \cos(\omega_{0_1} t) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sin(\omega_{0_1} t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\omega_{0_2} t) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(\omega_{0_2} t) \end{pmatrix}. \quad (1.45)$$

Матриця спектральної інтенсивності шумів:

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2}N_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{2}N_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{2}N_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}N_2 \end{pmatrix}. \quad (1.46)$$

Для даного випадку випадковий векторний процес

$$\vec{\xi}(t) = \begin{pmatrix} \chi_{11} \cos(\omega_{0_1} t) + \frac{n_1}{2} \\ \chi_{12} \sin(\omega_{0_1} t) + \frac{n_1}{2} \\ \chi_{21} \cos(\omega_{0_2} t) + \frac{n_2}{2} \\ \chi_{22} \sin(\omega_{0_2} t) + \frac{n_2}{2} \end{pmatrix}. \quad (1.47)$$

Тепер можна записати в розгорнутому вигляді рівняння оптимальної фільтрації вектора $\vec{\chi}(t)$ (1.41):

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\chi}_{11}}{dt} &= -\alpha_1 \hat{\chi}_{11} + R_{11} \cos(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{12} \sin(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{13} \cos(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2 + \\ &R_{14} \sin(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2, \end{aligned} \quad (1.48)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\chi}_{12}}{dt} &= -\alpha_1 \hat{\chi}_{12} + R_{21} \cos(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{22} \sin(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{23} \cos(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2 + \\ &R_{24} \sin(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2, \end{aligned} \quad (1.49)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\chi}_{21}}{dt} &= -\alpha_2 \hat{\chi}_{21} + R_{31} \cos(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{32} \sin(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{33} \cos(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2 + \\ &R_{34} \sin(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2, \end{aligned} \quad (1.50)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\chi}_{22}}{dt} &= -\alpha_2 \hat{\chi}_{22} + R_{41} \cos(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{42} \sin(\omega_{0_1} t) N_1^{-1} n_1 + R_{43} \cos(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2 + \\ &R_{44} \sin(\omega_{0_2} t) N_2^{-1} n_2. \end{aligned} \quad (1.51)$$

Система рівнянь дисперсії:

$$\begin{aligned} \frac{dR_{11}}{dt} = & -2\alpha_1 R_{11} - \frac{2}{N_1} (R_{11}^2 \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{12} R_{21} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{13} R_{31} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{14} R_{41} \sin^2(\omega_{0_2} t)) + n_{0_1}, \end{aligned} \quad (1.52)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{12}}{dt} = & -2\alpha_1 R_{12} - \frac{2}{N_1} (R_{11} R_{12} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{12} R_{22} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{13} R_{32} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{14} R_{42} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.53)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{13}}{dt} = & -\alpha_1 R_{13} - \alpha_2 R_{13} - \frac{2}{N_1} (R_{11} R_{13} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{12} R_{23} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{13} R_{33} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{14} R_{43} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.54)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{14}}{dt} = & -\alpha_1 R_{14} - \alpha_2 R_{14} - \frac{2}{N_1} (R_{11} R_{14} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{12} R_{24} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{13} R_{34} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{14} R_{44} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.55)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{21}}{dt} = & -2\alpha_1 R_{21} - \frac{2}{N_1} (R_{21} R_{11} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{22} R_{21} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{23} R_{31} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{24} R_{41} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.56)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{22}}{dt} = & -2\alpha_1 R_{22} - \frac{2}{N_1} (R_{21} R_{12} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{22}^2 \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{23} R_{32} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{24} R_{42} \sin^2(\omega_{0_2} t)) + n_{0_1}, \end{aligned} \quad (1.57)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{23}}{dt} = & -\alpha_1 R_{23} - \alpha_2 R_{23} - \frac{2}{N_1} (R_{21} R_{13} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{22} R_{23} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{23} R_{33} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{24} R_{43} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.58)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{24}}{dt} = & -\alpha_1 R_{24} - \alpha_2 R_{24} - \frac{2}{N_1} (R_{21} R_{14} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{22} R_{24} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{23} R_{34} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{24} R_{44} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.59)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{31}}{dt} = & -\alpha_1 R_{31} - \alpha_2 R_{31} - \frac{2}{N_1} (R_{31} R_{11} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{32} R_{21} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{33} R_{31} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{34} R_{41} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.60)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{32}}{dt} = & -\alpha_1 R_{32} - \alpha_2 R_{32} - \frac{2}{N_1} (R_{31} R_{12} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{32} R_{22} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{33} R_{32} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{34} R_{42} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.61)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{33}}{dt} = & -2\alpha_2 R_{33} - \frac{2}{N_1} (R_{31} R_{13} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{32} R_{23} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{33}^2 \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{34} R_{43} \sin^2(\omega_{0_2} t)) + n_{0_2}, \end{aligned} \quad (1.62)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{34}}{dt} = & -2\alpha_2 R_{34} - \frac{2}{N_1} (R_{31} R_{14} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{32} R_{24} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{33} R_{34} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{34} R_{44} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.63)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{41}}{dt} = & -\alpha_1 R_{41} - \alpha_2 R_{41} - \frac{2}{N_1} (R_{41} R_{11} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{42} R_{21} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{43} R_{31} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{44} R_{41} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.64)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{42}}{dt} = & -\alpha_1 R_{42} - \alpha_2 R_{42} - \frac{2}{N_1} (R_{41} R_{12} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{42} R_{22} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{43} R_{32} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{44} R_{42} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.65)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{43}}{dt} = & -2\alpha_2 R_{43} - \frac{2}{N_1} (R_{41} R_{13} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{42} R_{23} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{43} R_{33} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{44} R_{43} \sin^2(\omega_{0_2} t)), \end{aligned} \quad (1.66)$$

$$\begin{aligned} \frac{dR_{44}}{dt} = & -2\alpha_2 R_{44} - \frac{2}{N_1} (R_{41} R_{14} \cos^2(\omega_{0_1} t) + R_{42} R_{24} \sin^2(\omega_{0_1} t)) - \\ & - \frac{2}{N_2} (R_{43} R_{34} \cos^2(\omega_{0_2} t) + R_{44}^2 \sin^2(\omega_{0_2} t)) + n_{0_2}. \end{aligned} \quad (1.67)$$

Рівняння дисперсії спрощуються, якщо врахувати симетрію елементів кореляційної матриці \mathbf{R} :

$$R_{12} = R_{21}, R_{13} = R_{31}, R_{14} = R_{41}, R_{23} = R_{32}, R_{24} = R_{42}, R_{34} = R_{43}. \quad (1.68)$$

Приведемо приклад моделювання для вихідних даних, що відповідають результатам аналізу, який проведено в попередніх підрозділах. Перший канал

використовується для обробки сигналів метрового діапазону (наприклад, $f = 3 \cdot 10^8$ Hz), а другий – сантиметрового, $f = 3 \cdot 10^{10}$ Hz). Параметри α_1 і α_2 вибираються так, що $\alpha_1 \geq \alpha_2$. Інтенсивність білого шуму $\bar{n}(t)$ вважаємо однаковим в обох каналах в одному випадку і різним для іншого випадку.

На основі диференціальних рівнянь (1.36) і (1.37) будемо залежності $\chi_{11}(t)$, $\chi_{12}(t)$, $\chi_{21}(t)$, $\chi_{22}(t)$, вибираючи шуми спостереження $n_0(t)$ майже однаковими (або різними) в обох каналах. Головне, щоб зовнішній вигляд квадратурних компонент відповідав реальній ситуації. Потім будемо графіки $S_1(t)$ і $S_2(t)$ з рівняння (1.35). Далі будемо графіки $A_1(t)$, $A_2(t)$, $\varphi_1(t)$, $\varphi_2(t)$ з рівнянь (1.36), (1.37). Потім розв'язуємо систему диференціальних рівнянь, з яких знаходимо оцінки $\hat{\chi}_{11}(t)$, $\hat{\chi}_{12}(t)$, $\hat{\chi}_{21}(t)$, $\hat{\chi}_{22}(t)$, $\hat{A}_1(t)$, $\hat{A}_2(t)$, $\hat{\varphi}_1(t)$, $\hat{\varphi}_2(t)$, які порівнюємо з реальними такими ж сигналами. Крім того, з рівнянь дисперсії визначаємо точність оцінок і будемо графіки дисперсії.

Приклади часових залежностей амплітуд сигналів в першому і другому каналах приведені на рисунках 1.10, 1.11 коричневим кольором, а їх оцінки – синім кольором.

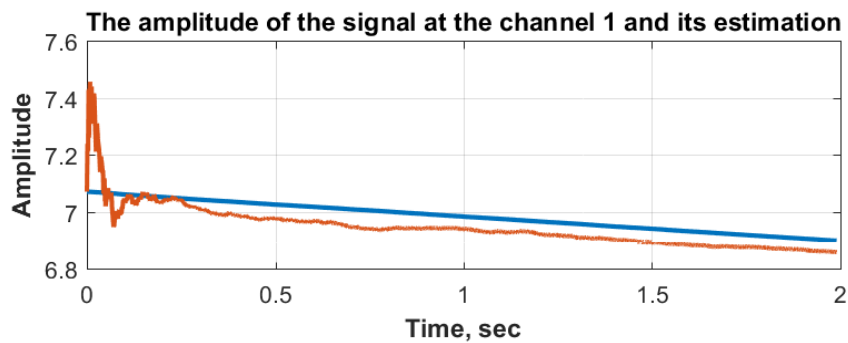


Рисунок 1.10. – Часові залежності луна-сигналу амплітуд в першому каналі (коричневий колір) і його оцінки (синій колір)

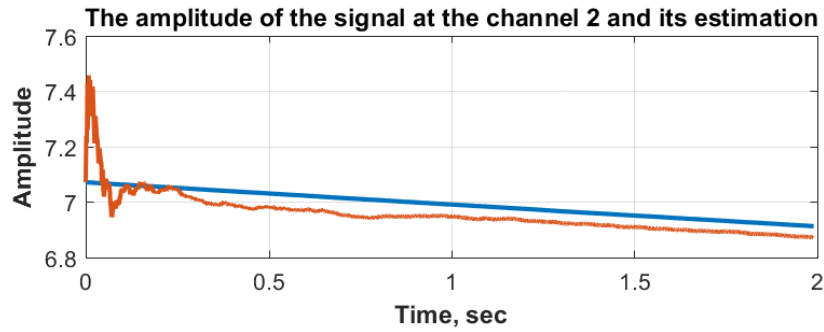


Рисунок 1.11. – Часові залежності луна-сигналу амплітуд в другому каналі (коричневий колір) і його оцінки (синій колір)

Зауважимо, що система оцінки амплітуд сигналів не реагує на їх різкі зміни, а просто згладжує. Відповідно, система не може оцінити стрибки амплітуд луна-сигналів від орієнтирів.

Коливання амплітуд і фаз сигналів зумовлені шумовими ефектами. Відношення сигнал/шум для цього прикладу дорівнює одиниці. З рисунків 1.10-1.11 випливає, що розроблена система згладжує коливання як амплітуд, так і фаз. Приклади оцінок дисперсій квадратурних складових наведені на рисунках 1.12-1.13, а взаємні дисперсії між двома квадратурними компонентами в одному каналі на рисунках 1.12-1.14. За час, що не перевищує 0,2 секунди, вони зменшуються майже до нуля.

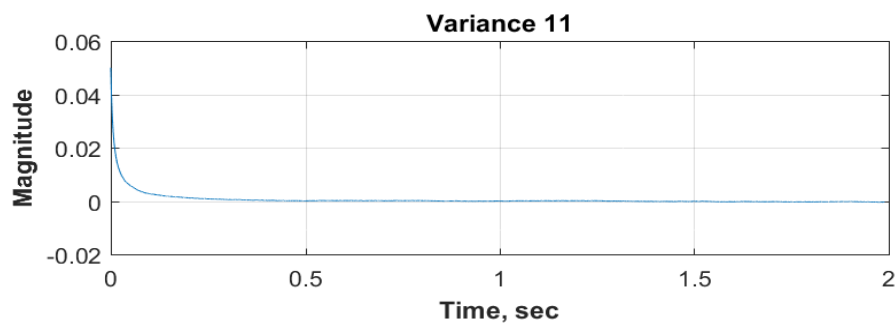


Рисунок 1.12. – Часова залежність дисперсії квадратурної компоненти $\chi_{11}(t)$ луна-сигналу в першому каналі

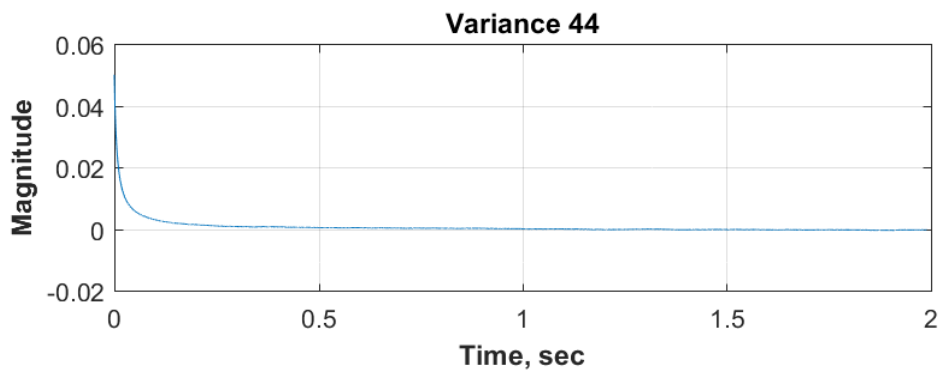


Рисунок 1.13. - Часова залежність дисперсії квадратурної компоненти $\chi_{44}(t)$ луна-сигналу в другому каналі

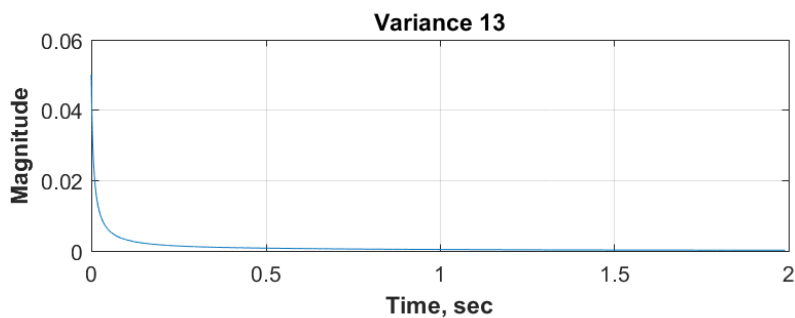


Рисунок 1.14. - Часова залежність взаємної дисперсії квадратурних компонент $\chi_{13}(t)$ луна-сигналу в першому та другому каналах

1.7 Висновки до першого розділу

В розділі розроблено оптимальну систему оцінки амплітуд і фаз луна-сигналів від орієнтирів. Система якісно контролює квадратурні компоненти сигналу, а отже, амплітуди та фази, але не в змозі відстежувати швидкі раптові зміни параметрів сигналу. Тому для оцінки раптових змін амплітуд сигналу необхідна спеціалізована оптимальна схема, приклад якої наведено в четвертому розділі. В даному розділі проведений аналіз спільної обробки сигналу для двох частотних каналів. Аналогічна обробка може бути виконана для сигналів, що відрізняються за фізичними принципами формування. При наявності потужних

луна-сигналів від місцевості, що знаходиться біля наземного орієнтиру, виявлення останнього стає неможливим. Для подолання цієї проблеми треба використовувати відмінність орієнтиру та місцевості за кольором.

2 АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИМІРЮВАННЯ КОЛЬОРОВОСТІ ОБ'ЄКТІВ

2.1 Фізичні основи кольоровості

Колір - це результат взаємодії між джерелом світла, об'єктом і спостерігачем. Так, світло, що падає на об'єкт, буде відбите або поглинене в залежності від характеристик поверхні, коефіцієнтів відбиття і пропускання. Людське око може виявляти спектр електромагнітного випромінювання приблизно в діапазоні від 400 (фіолетовий колір) до 700 нм (червоний колір) і може адаптуватися до умов, що змінюються в широких межах освітленості і насиченості кольору (відношення «чистий» колір / білий колір). Клітини людського ока, що здатні обробляти світло в широкому діапазоні рівня освітленості і забезпечувати швидку реакцію на зміну освітленості, називаються «паличками» і не мають здатності визначати колір. Клітини, які названі «колбочками», забезпечують визначення кольору з високою роздільною здатністю. Є три набори колб з максимумом чутливості в довжинах хвиль, які людське око може виділяти: червоний колір (580 нм), зелений (540 нм) і синій (450 нм). Світло з будь-якою іншою довжиною хвилі у видимій частини спектра буде стимулювати різну кількість кожного з цих трьох типів, потім інформація буде передана зоровим нервом і оброблена мозком.

2.2 Аналіз датчиків кольоровості

Сьогодні випускаються три різних типи датчиків кольору: датчики, що перетворюють світло в фотострум, датчики, що перетворюють світло в аналоговий сигнал, і датчики, які перетворюють світло в цифровий сигнал. Датчик кольору, що перетворює світло в аналогову напругу, складається з матриці фотодіодів з кольоровими світлофільтрами, інтегрованої до схеми перетворення струму в напругу. Такий RGB-датчик кольору використовує колориметричний принцип вимірювання і складається з фотодіодної матриці, червоного, зеленого і синього фільтрів і трьох підсилювачів з струмовим входом, об'єднаних в одній монолітній

КМОП-мікросхемі. Без кольорового фільтру звичайний кремнієвий фотодіод реагує на довжину падаючого світла на червону, зелену і синю складові. Фотодіод відповідного каналу кольору перетворює їх в фотострум. Потім три підсилювача з струмовим входом (по одному для кожної складової R, G і B) перетворюють фотострум в напругу. Разом три аналогових виходи несуть інформацію про колір і силу світла. Вихідна напруга на кожному з каналів (R, G, B) лінійно збільшується з ростом інтенсивності світла хвиль від ближнього ультрафіолету до ближнього інфрачервоного діапазону з областю максимальної чутливості від 800нм до 950 нм. Червоний, зелений і синій кольорові фільтри на пропускання формують і оптимізують спектральну чутливість фотодіода. Належним чином розроблені фільтри дозволяють отримувати спектральну чутливість для відфільтрованої фотодіодної матриці, подібну чутливості людського ока. RGB-фільтри розкладають падаюче світло на червону, зелену і синю складові. фотодіод відповідного каналу кольору перетворює їх в фотострум. потім три підсилювача з струмовим входом (по одному для кожної складової R, G і B) перетворюють фотострум в напругу. Разом три аналогових виходу несуть інформацію про колір і силу світла. Вихідна напруга на кожному з каналів (R, G, B) лінійно збільшується з ростом інтенсивності світла.

Найчастіше використовують один з двох методів вимірювання і визначення кольору: на відбиття і на пропускання.

При вимірюванні на відбиття датчик кольору визначає і вимірює колір випромінювання, відбитого від поверхні або об'єкта. При цьому як джерело, так і датчик кольору розташовані близько від відбиваючої поверхні. Світло, що випромінюється джерелом світла (лампа розжарювання, флуоресцентна лампа, білий світлодіод або калібрований світлодіодний модуль RGB) відбивається від поверхні, потім вимірюється датчиком кольору. Колір випромінювання, відбитого від поверхні, залежить від кольору цієї поверхні. Наприклад, біле світло, що падає на червону поверхню, відбивається як світло червоного кольору. Відбите червоне світло потрапляє на датчик кольору, що видає різні вихідні напруги по трьох каналах R, G і B. Інтерпретуючи ці три напруги, можна визначити колір світла.

Ці три вихідних напруги зростають лінійно зі збільшенням інтенсивності відбитого світла, тому такий датчик кольору може також вимірювати відбиваючу здатність об'єкта або поверхні (рисунок 2.1).

При вимірюванні на пропускання датчик кольору визначає і вимірює світло безпосередньо від джерела. Фотодіодна лінійка зі світлофільтрами перетворює падаюче світло в фотострум від відповідного каналу, який потім посилюється і перетворюється в аналогову напругу. Інтерпретуючи ці три напруги, можна визначити колір об'єкта так само, при цьому



Рисунок 2.1 – Принцип вимірювання кольору об'єкту на відбиття

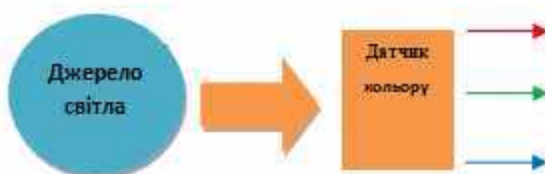


Рисунок 2.2 – Принцип вимірювання кольору об'єкту на пропускання

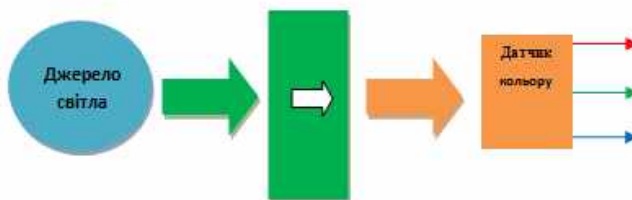


Рисунок 2.3 – Принцип вимірювання кольору прозорих середовищ на пропускання

можна виміряти і повну інтенсивність світлового потоку від джерела світла (рисунок 2.2). Вимірювання кольору на пропускання використовується, наприклад, для визначення кольору прозорих середовищ типу скла, прозорого пластика, рідини або газу. У цьому випадку світло проходить крізь прозору кольорову середу і потрапляє на датчик кольору (рисунка 2.3). Три аналогових напруги на виході датчика кольору можуть використовуватися для контролю в апаратурі управління. Ці напруги можуть також бути перетворені в цифровий сигнал, який може аналізувати DSP.

Отже, для більш ефективної обробки інформації про об'єкт або місцевий орієнтир з датчиком кольору. Щоб він мав змогу мати систему управління рівнем освітлення та кольором, який складається з трьох компонентів: датчика кольору, RGB- контролера, світлодіодами. Це потрібно для більш детальнішого дослідження наземних орієнтирів на місцевості.

2.3 Висновки до другого розділу

Для вимірювання параметрів кольоровості використовуються RGB-датчики, чутливими елементами яких є матриці фотодіодів. Основним методом вимірювання кольору в робототехнічних системах є використання спектральних ефектів при відбитті світла.

3 ОПТИМАЛЬНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ КОЛЬОРОВОСТІ НАЗЕМНИХ ОРІЄНТИРІВ

3.1 Наземний орієнтир для робота як кольоровий об'єкт

Наземним орієнтиром для АМР при його автономній навігації на незнайомій місцевості може бути об'єкт, який виділяється на фоні навколишньої місцевості за якимсь показником. Згідно з метою дипломної роботи таким показником може бути кольоровість орієнтира. В загальному випадку останній може виділятися або не виділятися за кольором на фоні навколишніх предметів. Більш того, він може виділятися у виділений період часу, а потім його важко розрізнити з сусідніми ділянками місцевості через зниження рівня освітленості. На рисунках 3.1 – 3.3 показані приклади такого орієнтиру для різного часу доби.



Рисунок 3.1 – Приклад можливого орієнтиру для АМР (фотографія зроблена о 10-й годині)



Рисунок 3.2 – Приклад можливого орієнтиру для АМР (фотографія зроблена о 13-й годині)



Рисунок 3.3 – Приклад можливого орієнтиру для АМР (фотографія зроблена о 16-й годині)

Як видно з цих рисунків, освітленість змінилася, пізніше оцінимо результати її впливу.

Вибраний для дослідження наземний орієнтир був сфотографований в три різні доби і в різні години. Після цього було прийнято рішення візуально оцінити можливість виділення цього орієнтиру на фоні навколишньої місцевості. Щоб детальніше дослідити стрибки кольоровості орієнтиру, в дипломній роботі кожна фотографія розділялась на 4, 8 чи 16 рівних частин і в сумі кількість ділянок фотографій, на яких вимірювалась кольоровість, становила 87.

Кожний колір на практиці описується комбінацією трьох кольорів (червоного R, зеленого G та блакитного B) різної інтенсивності, яка змінюється від 0 до 1. Колір не є фізичною властивістю об'єкта, а визначається відчуттям, яке залежить від освітленості та спектральних коефіцієнтів відбиття орієнтиру. Звідси випливає, що при навігації робота, яка займає деякий час, освітленість наземного орієнтиру та коефіцієнти відбиття світлових хвиль від нього можуть змінюватись, причому значення компонент R, G, B часто також залежать від характеристик відеокамер, що встановлені на роботі. Модель нормалізованих червоного і синього компонент запропонована для того, щоб розв'язати проблему залежності від зовнішніх умов та впливу тіні на результат вимірювання кольоровості. Методи визначення кольоровості (хроматичності) приведені в багатьох джерелах. Кольоровість визначає також відтінок, насиченість, але не визначає освітленості. На протязі дня координати кольоровості і відтінки змінюються, причому в ранкові та вечірні години вони схожі. Для підвищення точності вимірювання координат кольоровості може використовуватись декілька камер. Інформація про колір є важливою для сегментації окремих частин об'єкта. Значна увага в публікаціях приділяється обробці інформації про координати кольоровості в динамічних вимірюваннях. Проведено аналіз результатів лінійної фільтрації різниці зображень з використанням ортогональності компонент простору кольоровості. Для побудови алгоритмів фільтрації розроблені моделі кольорів типу RGB або CMYK, які потрібно зв'язувати з функціями відображення у просторі кольорів. Обробка зображень передбачає максимальне врахування особливостей людського зору.

Для вимірювання значень RGB компонентів використовувалась узгоджена з Національним науковим центром "Інститут метрології" програма "Колориметр 2", в якій реалізована методика виконання розрахунків координат кольору та координат кольоровості за даними спектрального коефіцієнта відбиття, спектрального коефіцієнту пропускання або спектральної енергетичної яскравості для зразків кольору об'єктів. Документ не поширюється на процедуру вимірювань, яка має бути визначена в технічній документації спектрального приладу, який було

застосовано для вимірювання спектральних коефіцієнтів відбиття, пропускання або енергетичної яскравості або в методики виконання вимірювань.

Отже, кожна розділена фотокартка була занесена у програму, яка застосовувалась для розрахунків основних кольорів RGB. На рисунках 3.4, 3.5, 3.6 зображені залежності параметрів кольоровості R, G, B від горизонтальної координати фотографії.

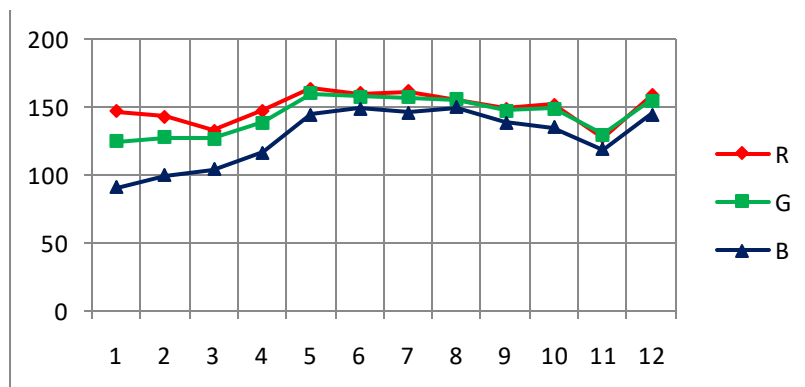


Рисунок 3.4 – Залежність параметрів кольоровості від горизонтальної координати при розділі фотографії на 4 вертикальні смуги

Можна чітко виділити перший день по чотирьом розподілам, де видно залежність компонентів RGB. Освітленість на місцевості відіграє не останню роль. Компонент R значно перевищує інші компоненти в перший день. На жаль, при проведенні експерименту був відсутній прилад для визначення освітленості і весь аналіз фотографій проведений в лабораторних умовах. На другий день значення R, G були близькими, оскільки орієнтир має жовтий колір, тому перехрещення двох кольорів (зеленого и червоного) в результаті давали жовтий. На третій день спостерігається великий стрибок кольоровості вниз, оскільки освітленість орієнтира була дуже низька.

Результати дослідження кольоровості фотографій з розподілом їх на 8 частин приведені на рисунку 3.8.

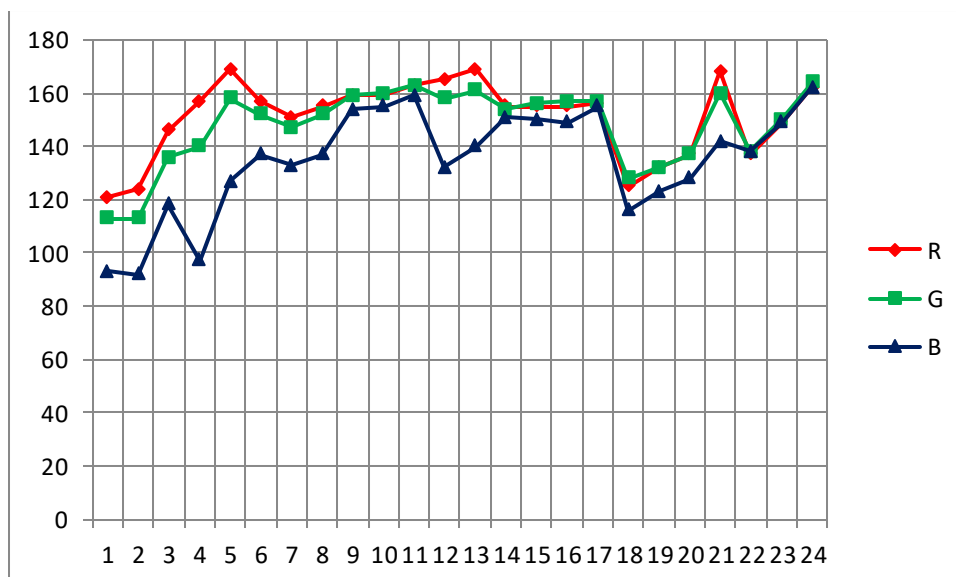


Рисунок 3.5 – Залежність параметрів кольоровості від горизонтальної координати при розділі фотографій на 8 вертикальних смуг

Порівняно з рисунком 3.4 при збільшенні кількості ділянок на фотографії до 8 вже спостерігаються характерні швидкі змінювання параметрів R, G, B, що дає сподівання на покращення умов виявлення орієнтирів.

Тепер виникає завдання оцінки необхідної кількості вертикальних смуг на фотографіях для проведення аналізу. Оскільки ця кількість залежить від зображення, що представлено на фотографії, то оптимальної кількості для всіх випадків отримати неможливо. В дипломній роботі розглядалися окремі випадки. Перші два випадки (при поділі фотографій на 4 та 8 однакових по ширині вертикальних смуг) вже розглянуті. На рисунку 3.6 показані результати залежностей параметрів кольоровості від горизонтальної координати фотографії при розділі останньої на 16 однакових вертикальних смуг.

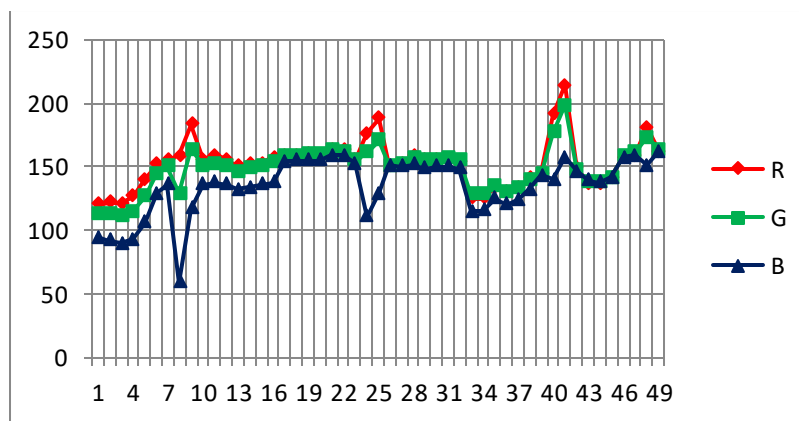


Рисунок 3.6 – Залежність параметрів кольоровості від горизонтальної координати при розділі фотографій на 16 вертикальних смуг

З рисунку 3.6 випливає, що чим більше смуг розподілу фотокартки, тим краще виявлення наземних орієнтирів по кольору. На графіку характерно видно виділення самого об'єкту.

Отже, можна зробити висновок, що після збільшення кількості смуг розподілу фотокартки на 4, 8 та 16 частин, можна дослідити характерні зміни параметрів кольору, а саме R G B. При такому розподілі, є можливість краще віднайти орієнтир на місцевості. При опрацюванні таких графіків можна точно зазначити, що відтворення об'єкта на місцевості можливе за допомогою параметрів кольоровості.

3.2 Оптимальна схема вимірювання параметрів кольоровості наземного орієнтиру на довільному фоні

Постановка задачі. Є пристрій, що дозволяє вимірювати координати кольоровості x , y та інтенсивність червоного R , зеленого G та синього B кольорів на окремих ділянках зображення (фотографії). Попередньо це зображення поділяється на смуги (вертикальні або горизонтальні) чи квадрати з розмірами, що залежать від кількості поділок. Таким чином, всі значення x , y , R , G , B є середніми у вибраній частині зображення. Автономний мобільний робот в процесі руху

сканує навколишній простір і отримує зображення. Необхідно на цьому зображенні знайти деякі особливості, що характеризують наземний орієнтир (рисунок 3.1).

В загальному випадку параметри кольоровості зображення в процесі сканування є випадковим процесом [5], який апріорно можна описати системою стохастичних диференціальних рівнянь, як і в розділі 1.

$$\frac{dR(t)}{dt} = -\alpha_R R(t) + n_{0R}, \quad (3.1)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} = -\alpha_G G(t) + n_{0G}, \quad (3.2)$$

$$\frac{dB(t)}{dt} = -\alpha_B B(t) + n_{0B}, \quad (3.3)$$

де $\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ - коефіцієнти, що являють собою ширину спектру повідомлення про інтенсивність відповідно червоного, зеленого і синього кольорів,

n_{0R}, n_{0G}, n_{0B} - незалежні гауссівські білі шуми для червоного, зеленого та синього кольорів, що мають двохсторонню спектральну щільність $\frac{1}{2}N_{0R}, \frac{1}{2}N_{0G}, \frac{1}{2}N_{0B}$ відповідно і створюють матрицю спектральних інтенсивностей [11].

Цифровий шум на фотографії є дефектом зображення, який полягає у виникненні хаотично розкиданих пікселів випадкового кольору і яскравості по всьому зображенню. На кольорових фотографіях шум має різну інтенсивність і може бути посилений в процесі обробки, шляхом зміни колірного балансу. Наприклад, шум на фотографії, знятої при світлі лампи розжарювання, має переважно жовто-сині відтінки, але при корекції синього каналу зображення, для компенсації жовтизни фотографії, синій шум збільшиться. Шум проявляється на

однотонних ділянках, в градаціях, і особливо помітний на темних ділянках зображення [10].

Для кращого розуміння природи шумів, скористаємося кольорним простором Lab (рисунок 3.7), де L - канал, в якому міститься інформація про світлові градації на фотографії, а в каналах a і b - колірна (хроматична) інформація.

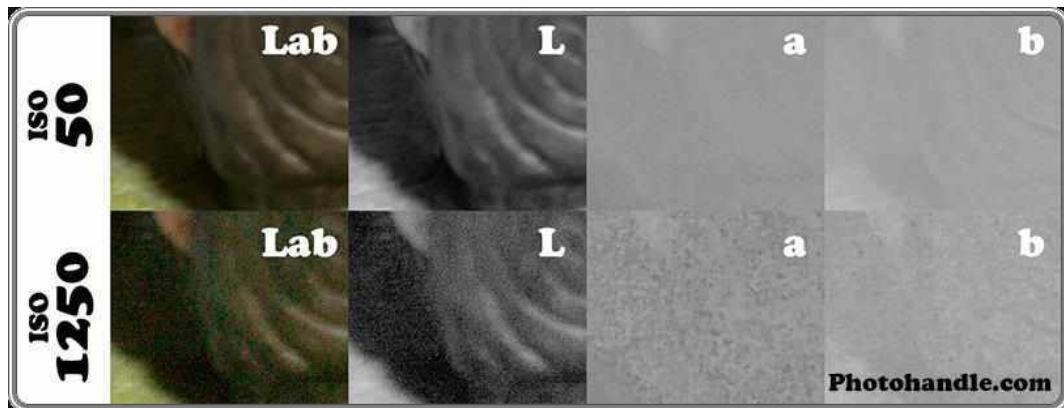


Рисунок 3.7 - Цифрові шуми в кольоровому просторі Lab

Як видно з рисунку 3.7, шуми каналу L відповідають за яскравість цифрового шуму, а шуми в каналах a і b, - за хроматичність.

Залежно від структури виникнення цифрового шуму розрізняють:

- постійний;
- випадковий шум.

Постійний шум виникає на одному і тому ж місці від фотографії до фотографії в зв'язку з перегріванням сенсору під час тривалих експозицій («гарячі» пікселі), а також з «битими» пікселями. Він залежить від сенсора фотоапарату. Для визначення розміщення «гарячих» пікселів постійного цифрового шуму на фотографії, можна провести такий дослід: при максимальному значенні ISO, 30-секундної витримці і з закритою кришкою об'єктива натиснути на спуск. На рисунку 3.8 показано шум матриці при ISO 1250, 30 с витримки при високій контрастності зображення. Насправді цей шум не настільки явний, має свої градації і колір, оскільки кожний фотоелемент нагрівається по-різному.

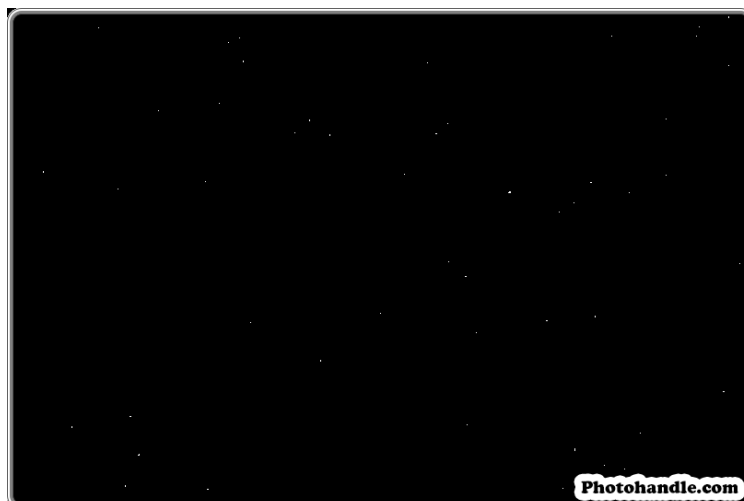


Рисунок 3.8 – Постійний цифровий шум на зображенні

Випадковий цифровий шум на фотографіях проявляється у вигляді яскравості і хроматичного цифрових шумів.

«Візуальний шум» - це цифровий еквівалент зерна плівки. На цифрових зображеннях цей шум виглядає як випадкові вкраплення на початково рівній поверхні, і він може значно знизити якість зображення. Деякий шум може підвищити уявну чіткість зображення. Шум наростає разом з підвищенням світлочутливості камери, довжиною експозиції, температурою, а також варіюється між різними моделями камер [10].

Співвідношення сигнал-шум є корисним і універсальним способом порівняння відносної кількості сигналу і шуму для будь-якої електронної системи; високі співвідношення покажуть надзвичайно малий видимий шум, тоді як для низьких співвідношень буде справедливо протилежне.

Цифрові камери схильні до трьох типів шуму: випадкового, структурного і лінійчатого. Випадковий шум характеризується коливаннями яскравості і кольоровості вище і нижче справжніх. Певна частка випадкового шуму буде завжди присутня при будь-якому часу експозиції і більше залежить від числа ISO. Рисунок випадкового шуму змінюється від кадру до кадру, навіть якщо параметри експозиції ідентичні.

Структурний шум включає те, що називається «гарячими пікселями», які визначені як ті, де інтенсивність в пікселі значно перевершує коливання, викликані випадковим шумом. Структурний шум зазвичай з'являється на витягах великої довжини і посилюється при високих температурах. Структурний шум унікальний тим, що покаже практично ідентичне поширення гарячих пікселів при зйомці в ідентичних умовах (температура, довжина експозиції, число ISO).

Лінійчатий шум залежить переважно від камери і є шумом, який вносить сама камера в процесі зчитування даних з цифрового сенсора. Лінійчатий шум найбільш помітний на високих ISO і в тінях, або коли зображення було надмірно освітлити. Лінійчатий шум може також наростати при певних балансах білого, в залежності від моделі камери.

Хоча найбільш дратівливим здається структурний шум, його зазвичай найпростіше видалити, оскільки він відтворюється. Внутрішній електроніці камери всього лише потрібно запам'ятати шаблон, і вона може згодом відняти цей шум, щоб відновити вихідне зображення. В останніх поколіннях цифрових камер структурний шум створює набагато менше проблем, ніж випадковий, хоча навіть найдрібніше його кількість може кидатися в очі більше, ніж випадковий шум.

Менш помітний випадковий шум зазвичай складніше видалити, не знизивши якість зображення. Комп'ютеру складно відрізнити випадковий шум від дрібно детальної текстури, наприклад, пилу або туману, так що в спробі видалити випадковий шум можна прийти до того, що ці текстури теж пропадуть. Такі програми, як Neat Image і Noise Ninja, можуть бути досить гарні в зниженні шуму зі збереженням в зображенні актуальної інформації. Методом Монте Карло можна підрахувати спектральну щільність кольорових шумів і записати їх до матриці:

$$\mathbf{N}_0 = \begin{pmatrix} \frac{N_{0R}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_{0G}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_{0B}}{2} \end{pmatrix}. \quad (3.4)$$

Вирази (3.1-3.3) можна записати у вигляді одного матричного рівняння

$$\frac{d\vec{C}(t)}{dt} = \mathbf{A}\vec{C}(t) + \vec{n}_0, \quad (3.5)$$

де $\vec{C}(t) = (R(t), G(t), B(t))^T$ - вектор інтенсивності кольорів, що створюють будь-який колір, знак “Т” означає транспонування,

$\vec{n}_0 = (n_{0R}, n_{0G}, n_{0B})^T$ - вектор формуючих білих шумів.

Матриця \mathbf{A} , що входить до співвідношення (3.5), називається матрицею спостереження. Вона визначається виразом:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\alpha_R & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_G & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_B \end{pmatrix}. \quad (3.6)$$

Тут $-\alpha_R, \alpha_G, \alpha_B$ є значення, що визначають ширину спектра апіорного повідомлення про випадковий процес кольоровості, що створюється при скануванні відеокамерою робота навколишнього простору з можливим розміщенням наземного орієнтиру. Вираз (3.5) описує апіорну поведінку параметрів кольоровості. При реальному формуванні параметрів кольоровості від реальної наперед невідомої місцевості виникає випадковий процес $\vec{\xi}(t) = (\xi_R(t), \xi_G(t), \xi_B(t))^T$, компоненти якого записують наступним чином:

$$\xi_R(t) = R(t) + n_R(t), \quad (3.7)$$

$$\xi_G(t) = G(t) + n_G(t), \quad (3.8)$$

$$\xi_B(t) = B(t) + n_B(t), \quad (3.9)$$

де $n_R(t), n_G(t), n_B(t)$ - адитивні незалежні білі шуми по каналам червоного, зеленого і синього кольорів, що створюють вектор $\vec{n}(t) = (n_R(t), n_G(t), n_B(t))^T$ і симетричну матрицю поділених навпіл спектральних інтенсивностей.

$$\mathbf{N} = \begin{pmatrix} \frac{N_R}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_G}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_B}{2} \end{pmatrix}. \quad (3.10)$$

Вирази (3.7-3.9) можна описати одним векторним співвідношенням

$$\vec{\xi}(t) = \mathbf{H}(t)\vec{C}(t) + \vec{n}(t), \quad (3.11)$$

де $\mathbf{H}(t)$ - матриця спостереження, яка для простого випадку стаціонарного випадкового процесу не залежить від часу і має вигляд

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.12)$$

Аналогічно з джерелом [6] система оптимальної лінійної фільтрації параметрів кольоровості може бути записана наступним чином:

$$\frac{d\vec{C}}{dt} = \mathbf{A}\vec{C} + \mathbf{K}\mathbf{H}^T\mathbf{N}^{-1}(\vec{\xi} - \mathbf{H}\vec{C}), \quad (3.13)$$

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{K} + \mathbf{K}\mathbf{A}^T - \mathbf{K}\mathbf{H}^T\mathbf{N}^{-1}\mathbf{H}\mathbf{K} + \mathbf{N}_0, \quad (3.14)$$

$$\mathbf{K} = \begin{pmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} \end{pmatrix} \quad (3.15)$$

є кореляційною матрицею похибок фільтрації параметрів кольоровості [7]. Елементи матриці з однаковими індексами характеризують дисперсію інтенсивностей червоного, зеленого і синього кольорів відповідно, а елементи з різними індексами характеризують кореляційні функції, тобто статистичний зв'язок між інтенсивностями різних кольорів, причому $K_{ij} = K_{ji}$, що дає можливість зменшити кількість диференціальних рівнянь в системі (3.13-3.14). Знак “ $\hat{}$ ” над вектором $\vec{C}(t)$ означає оцінку цього вектору. Підставляємо в систему (3.13-3.14) вирази для відповідних векторів і матриць і отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{dR(t)}{dt} = & -\alpha_R R(t) + \frac{2K_{11}(t)}{N_R} (\xi_R(t) - R(t)) + \\ & + \frac{2K_{12}(t)}{N_G} (\xi_G(t) - G(t)) + \frac{2K_{13}(t)}{N_B} (\xi_B(t) - B(t)), \end{aligned} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \frac{dG(t)}{dt} = & -\alpha_G G(t) + \frac{2K_{12}(t)}{N_R} (\xi_R(t) - R(t)) + \\ & + \frac{2K_{22}(t)}{N_G} (\xi_G(t) - G(t)) + \frac{2K_{23}(t)}{N_B} (\xi_B(t) - B(t)), \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB(t)}{dt} = & -\alpha_B B(t) + \frac{2K_{13}(t)}{N_R} (\xi_R(t) - R(t)) + \\ & + \frac{2K_{23}(t)}{N_G} (\xi_G(t) - G(t)) + \frac{2K_{33}(t)}{N_B} (\xi_B(t) - B(t)), \end{aligned} \quad (3.18)$$

$$\frac{dK_{11}(t)}{dt} = -2\alpha_R K_{11}(t) - \frac{2K_{11}^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{13}^2(t)}{N_B} + \frac{N_{0R}}{2}, \quad (3.19)$$

$$\frac{dK_{12}(t)}{dt} = -(\alpha_R + \alpha_G) K_{12}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}(t)K_{22}(t)}{N_G} - \frac{2K_{13}(t)K_{23}(t)}{N_B}, \quad (3.20)$$

$$\frac{dK_{13}(t)}{dt} = -(\alpha_R + \alpha_B) K_{13}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{13}(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}(t)K_{23}(t)}{N_G} - \frac{2K_{13}(t)K_{33}(t)}{N_B}, \quad (3.21)$$

$$\frac{dK_{22}(t)}{dt} = -2\alpha_G K_{22}(t) - \frac{2K_{12}^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{22}^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{23}^2(t)}{N_B} + \frac{N_{0G}}{2}, \quad (3.22)$$

$$\frac{dK_{23}(t)}{dt} = -(\alpha_G + \alpha_B) K_{23}(t) - \frac{2K_{12}(t)K_{13}(t)}{N_R} - \frac{2K_{22}(t)K_{23}(t)}{N_G} - \frac{2K_{23}(t)K_{33}(t)}{N_B}, \quad (3.23)$$

$$\frac{dK_{33}(t)}{dt} = -2\alpha_B K_{33}(t) - \frac{2K_{13}^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{23}^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{33}^2(t)}{N_B} + \frac{N_{0B}}{2}. \quad (3.24)$$

Якщо вхідний випадковий процес параметрів кольоровості є нестационарним, його середнє значення можна описати деякими функціями часу, які для

інтенсивностей R, G, B мають загальний вигляд $h_R(t), h_G(t), h_B(t)$. Тоді матриця спостереження (3.12) трансформується в вираз (3.25).

$$\mathbf{H}(t) = \begin{pmatrix} h_R(t) & 0 & 0 \\ 0 & h_G(t) & 0 \\ 0 & 0 & h_B(t) \end{pmatrix}. \quad (3.25)$$

Тоді рівняння оцінок (3.26-3.28) набувають вигляду:

$$\begin{aligned} \frac{dR(t)}{dt} = & -\alpha_R R(t) + \frac{2K_{11}(t)h_R(t)}{N_R} (\xi_R(t) - h_R(t)R(t)) + \frac{2K_{12}(t)h_G(t)}{N_G} (\xi_G(t) - \\ & -h_G(t)G(t)) + \frac{2K_{13}(t)h_B(t)}{N_B} (\xi_B(t) - h_B(t)B(t)), \end{aligned} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} \frac{dG(t)}{dt} = & -\alpha_G G(t) + \frac{2K_{12}(t)h_R(t)}{N_R} (\xi_R(t) - h_R(t)R(t)) + \frac{2K_{22}(t)h_G(t)}{N_G} (\xi_G(t) - \\ & -h_G(t)G(t)) + \frac{2K_{23}(t)h_B(t)}{N_B} (\xi_B(t) - h_B(t)B(t)), \end{aligned} \quad (3.27)$$

$$\begin{aligned} \frac{dB(t)}{dt} = & -\alpha_B B(t) + \frac{2K_{13}(t)h_R(t)}{N_R} (\xi_R(t) - h_R(t)R(t)) + \frac{2K_{23}(t)h_G(t)}{N_G} (\xi_G(t) - \\ & -h_G(t)G(t)) + \frac{2K_{33}(t)h_B(t)}{N_B} (\xi_B(t) - h_B(t)B(t)), \end{aligned} \quad (3.28)$$

Рівняння для елементів кореляційної функції інтенсивності червоного, зеленого та синього кольорів:

$$\begin{aligned} \frac{dK_{12}(t)}{dt} = & -(\alpha_R + \alpha_G)K_{12}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}(t)K_{22}(t)h_G^2(t)}{N_G} - \\ & - \frac{2K_{13}(t)K_{23}(t)h_B^2(t)}{N_B}, \end{aligned} \quad (3.29)$$

$$\frac{dK_{12}(t)}{dt} = -(\alpha_R + \alpha_G)K_{12}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}(t)K_{22}(t)h_G^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{13}(t)K_{23}(t)h_B^2(t)}{N_B}, \quad (3.30)$$

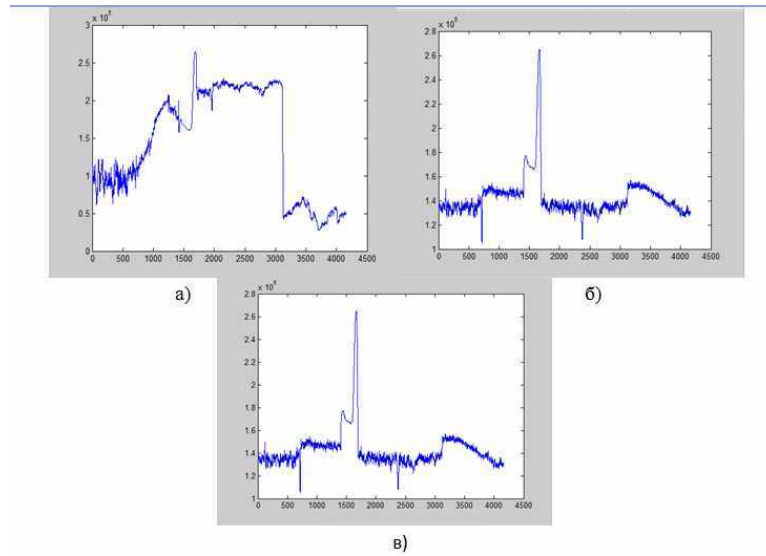
$$\frac{dK_{13}(t)}{dt} = -(\alpha_R + \alpha_B)K_{13}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{13}(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{12}(t)K_{23}(t)h_G^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{13}(t)K_{33}(t)h_B^2(t)}{N_B}, \quad (3.31)$$

$$\frac{dK_{22}(t)}{dt} = -2\alpha_G K_{22}(t) - \frac{2K_{12}^2(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{22}^2(t)h_G^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{23}^2(t)h_B^2(t)}{N_B} + \frac{N_{0R}}{2}, \quad (3.32)$$

$$\frac{dK_{23}(t)}{dt} = -(\alpha_G + \alpha_B)K_{23}(t) - \frac{2K_{12}(t)K_{13}(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{22}(t)K_{23}(t)h_G^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{23}(t)K_{33}(t)h_B^2(t)}{N_B}, \quad (3.33)$$

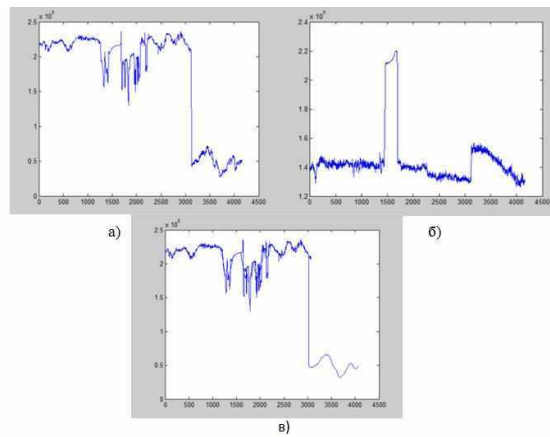
$$\frac{dK_{33}(t)}{dt} = -2\alpha_B K_{33}(t) - \frac{2K_{13}^2(t)h_R^2(t)}{N_R} - \frac{2K_{23}^2(t)h_G^2(t)}{N_G} - \frac{2K_{33}^2(t)h_B^2(t)}{N_B} + \frac{N_{0B}}{2}. \quad (3.34)$$

В системі диференціальних рівнянь (3.26-3.34) є невідомі функції часу $h_R(t), h_G(t), h_B(t)$ для інтенсивностей R, G, B . Далі для конкретного наземного орієнтиру (рисунки 3.1-3.3) оцінки інтенсивностей кольорів приведені на рисунках 3.9-3.11. Зазначена система диференціальних рівнянь розв'язується безпосередньо бортовою системою АМР, в результаті чого визначаються параметри кольоровості наземного орієнтира з довільним фоном місцевості [12].



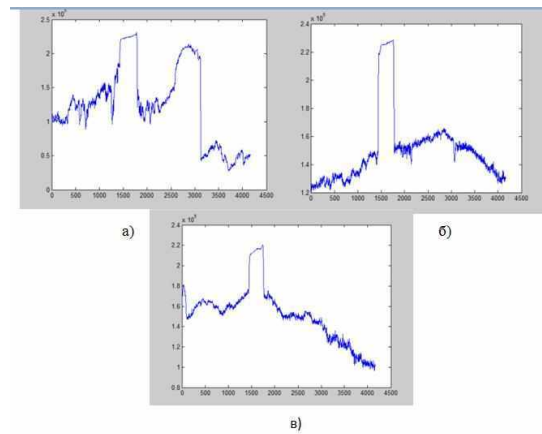
а) червоного, б) зеленого, в) синього.

Рисунок 3.9 – Оцінки інтенсивності кольорів для рисунку 3.1



а) червоного, б) зеленого, в) синього.

Рисунок 3.10 – Оцінки інтенсивності кольорів для рисунку 3.2



а) червоного, б) зеленого, в) синього.

Рисунок 3.11 – Оцінки інтенсивності кольорів для рисунку 3.3

Після опрацювання даних у програмі Matlab можна зробити такі висновки:

Для виявлення наземних орієнтирів потрібно оцінити результати вимірювання кольоровості з точки зору наявності різких перепадів кольоровості в сусідніх смугах;

Вимірювання параметрів кольоровості наземного орієнтиру на фоні шумів кольоровості та різних оптичних ефектів впливу досягається при реалізації синтезованої системи лінійної фільтрації параметрів кольоровості;

В загальному випадку слід оцінювати рівень і спектральний склад структурних шумів, отриманих при довгій витримці та випадкових шумах при короткій витримці;

Для аналізу кольоровості наземного орієнтиру необхідно проводити багаторазові вимірювання на одному і тому ж орієнтиру в різних умовах освітленості і при різному фоні;

Внаслідок істотної відмінності кольорів в різних частинах кадру для виділення наземного орієнтиру необхідно здійснити розділення кадру на вертикальні смуги і в кожній смузі проводити вимірювання середньої кольоровості.

3.3 Висновки до третього розділу

Для вимірювання інтенсивності кольорів орієнтиру на фоні довільної місцевості при наявності шумів кольоровості треба користуватись системою стохастичних диференціальних рівнянь (3.26)-(3.34), які дають можливість визначити також дисперсію цих інтенсивностей, тобто точність вимірювання. Рішення цих рівнянь дозволяє визначити взаємні кореляційні функції, а у випадку високої кореляції між інтенсивностями кольорів, можна взагалі залишити диференціальне рівняння тільки для інтенсивності одного кольору, що істотно спрощує оптимальну вимірювальну систему.

Приведені диференціальні рівняння не можуть оцінювати швидкі змінювання кольорів, наприклад, в процесі сканування простору відеокамерою робота. Стрибки кольоровості є ознакою попадання наземних орієнтирів в зону огляду відеокамери. Ось чому для виявлення та вимірювання стрибків інтенсивності кольорів необхідно розробити іншу оптимальну систему вимірювання.

4. ВИМІРЮВАННЯ СТИБКІВ ІНТЕНСИВНОСТІ КОЛЬОРІВ В ІНТЕРЕСАХ ВИЯВЛЕННЯ НАЗЕМНИХ ОРІЄНТИРІВ АВТОНОМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ

Оскільки відбитий від орієнтиру сигнал часто не має ніяких особливостей порівняно з фоновим сигналом, то його надійне виявлення традиційними методами є практично неможливим. Все ж деякі можливості для виявлення репера існують. При скануванні відеокамерою робота навколишнього простору на виході ВК спостерігається випадковий процес інтенсивності кольору сигналу від області місцевості разом з НО. Реалізації цього процесу містять флуктуаційні складові, характер яких обумовлений умовами відео спостереження від фонових елементів місцевості. Корисний відео сигнал може бути прихованим в цих флуктуаціях. В такому випадку при скануванні місцевості виникає стрибок амплітуди інтенсивності кольору, який перевищує або просто відрізняється від фонового, і зовнішні оптичні шуми, що діють на відеокамеру. Тривалість стрибка залежить від швидкості сканування. Стрибок амплітуди інтенсивності кольору може також виникнути, якщо за короткий час істотно змінюється характер місцевості, на якій рухається робот. В розділі розглядається метод виявлення стрибків інтенсивності кольору, що дозволяє в окремих випадках використовувати цей стрибок для ідентифікації можливого орієнтиру для АМР.

4.1 Сучасні методи виявлення різких змінювань інтенсивності кольору

Найбільш повно підходить до виявлення різких змін в динамічній системі, що відбуваються в наперед невідомі моменти часу, викладені в [23] (різкі змінювання в невідомий момент часу). Для визначення різких змін в [23] запропонований уніфікований підхід в межах загальної статистичної теорії для задач контролю якості та виявлення неполадок, обробки сигналів, автоматичної сегментації сигналів та моніторингу систем навігації. Він ґрунтується на використанні алгоритму відношення правдоподібності і оцінювання статистичних властивостей

системи. Перед і після різкої зміни аналізуються дві основні моделі стохастичного процесу і визначається інформація Кулбека. Для виявлення різких змінювань використовується непараметричний баєсівський підхід. Значення інтенсивності кольору після змінювання розглядається як відоме, а ймовірнісні характеристики цього змінювання не оцінюються.

В загальному випадку отримання оцінки інтенсивності кольору здійснюється при слідкуванні за максимумом умовної апостеріорної щільності ймовірностей параметра, що описується, наприклад, рівнянням Фоккера-Планка-Колмогорова. Це стохастичне рівняння в часткових похідних описує еволюцію умовної апостеріорної щільності ймовірностей для марковського процесу. Воно є дуже складним і не може розв'язуватись аналітично [24]. Аналогічне рівняння для високочастотних сигналів отримано Стратоновичем Р. Л. [25]. В роботах [26, 27] розроблені оптимальні алгоритми оцінювання стану динамічної системи і виявлення випадкових стрибкоподібних змінювань її параметрів та визначення моментів їх виникнення. Отримані системи диференціальних рівнянь для апостеріорної щільності ймовірностей параметрів випадкових процесів, розв'язання яких наближеними методами приводить до отримання поточних оцінок параметрів в реальному масштабі часу і медіанної оцінки моменту стрибка. Аналіз проведений для системи, що описується процесом авторегресії зі стрибком коефіцієнта кореляції у випадковий момент часу. В [28] розроблена оптимальна система виявлення і оцінювання різких змін (стрибків) амплітуди вібрацій машин в реальному масштабі часу. Основні аспекти такого підходу до виявлення наземних орієнтирів для мобільного робота опубліковані в [29].

4.2 Сутність методу виявлення і вимірювання стрибків інтенсивності кольору

Згідно з [23], змінювання параметру сигналу вважається різким (abrupt change), якщо воно відбувається майже миттєво або менше періоду вибірки, який для мобільного робота залежить від швидкості сканування відеокамерою. Відеокамера сканує місцевість в широкому діапазоні кутів, порівняно з яким

кутовий розмір НО є невеликим. Це свідчить про те, що на короткому інтервалі часу, формується сигнал з різким змінюванням інтенсивності кольору, який ми називаємо стрибок. Форма стрибка інтенсивності кольору схожа з формою зони огляду відеокамери і при моделюванні він буде представлений гауссівським імпульсом. При моделюванні в якості репера для прикладу виберемо металевий стовп. Відбиті від нього оптичні сигнали будуть спостерігатись на фоні таких же сигналів від навколишнього середовища. Їх амплітуда інтенсивності кольору в часі описується деяким випадковим процесом. Для моделювання будемо використовувати опорні випадкові процеси, що характеризують відбиттєві властивості деякої місцевості і описуються відомими стохастичними диференціальними рівняннями (СДР), наприклад, такого типу:

$$\frac{dA(t)}{dt} = -\alpha \cdot t + n(t), \quad (4.1)$$

$$\frac{dA(t)}{dt} = a(A, t) + b(A, t) \cdot n(t). \quad (4.2)$$

В них, наприклад, α характеризує кореляційні властивості та ширину спектру випадкового процесу, $n(t)$ є білим шумом, а з допомогою функцій $a(A, t)$, $b(A, t)$ можна сформулювати нестационарний випадковий процес. Всі функції треба підібрати так, щоб випадковий процес був схожим з поведінкою відбитих від місцевості сигналів.

Амплітуда сигналів інтенсивності кольору від місцевості залежить від багатьох факторів, наприклад, чутливості відеокамери, дальності до НО та місцевості тощо. Щоб не мати справу з широким діапазоном амплітуд інтенсивності кольору, будемо нормувати отримані значення амплітуд до одиниці. Відповідно будемо моделювати стрибки різної інтенсивності, тривалості, які відбуваються у випадкові моменти часу при різному рівні завад $n(t)$. Стрибки не повинні значно перевищувати фонові інтенсивності кольору. Масштаб часу

повинен бути узгодженим зі швидкістю сканування навколишньої місцевості. Для проведення дослідження може використовуватись різна кількість стрибків.

Для створення схеми оптимального вимірювання інтенсивності кольору представимо модель сигналу. Для цього опишемо фізичну картину формування сигналів кольоровості. Припустимо, що оптичний монохроматичний сигнал, який характеризує колір об'єктів, має амплітуду інтенсивності кольору A_0 , частоту ω і фазу φ_0 . Реалізації випадкового процесу $A(t)$, є рішеннями СДР (4.1) або (4.2). Після появи стрибка інтенсивності кольору в момент часу τ_{jump} амплітуда сигналу досягає значення $A_0 + \Delta A$, а фаза - φ_1 . Будемо вважати, що характер випадкового процесу $A(t)$ після стрибка не змінюється. Отже, модель сигналу, що підлягає дослідженню, має вигляд

$$y(t) = \begin{cases} A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) + A(t) & t \leq \tau_{jump}, \\ (A_0 + \Delta A) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1) + A(t) & t > \tau_{jump}, \end{cases} \quad (4.3)$$

Відзначимо, що у виразі (4.3) фігурує неявно білий шум в функції $A(t)$, яка є розв'язком СДР (1) або (4.2), які містять такий шум.

Будемо вважати, що випадковий момент стрибка τ_{jump} не залежить ні від білого шуму $n(t)$, ні від самої функції $A(t)$ і апріорно розподілений за нормальним законом з середнім значенням $\bar{\tau}_{jump}$ і дисперсією $\sigma_{\tau_{jump}}$. Для прийняття рішення про наявність можливого орієнтиру нас цікавлять показники якості виявлення стрибка ΔA або декількох подібних стрибків. Стрибок ΔA є в загальному випадку компонентом марковського випадкового процесу $\Delta A(t)$. Він описується апріорною щільністю ймовірностей $W_{\Delta A}(\Delta A, t)$, яка з часом змінюється за відомим співвідношенням [29]

$$\frac{\partial W_{\Delta A}(\Delta A, t)}{\partial t} = L W_{\Delta A}(\Delta A, t), \quad (4.4)$$

де L – оператор Фоккера-Планка, що приймає різні вирази до і після стрибка, тобто як

$$L = \begin{cases} L_0 & \text{при } t \leq \tau_{jump}, \\ L_1 & \text{при } t > \tau_{jump}. \end{cases} \quad (4.5)$$

правило, амплітуда стрибка інтенсивності ΔA в момент часу τ_{jump} апіорі невідома. Задача складається в тому, щоб за реалізацією $y(t)$ (формула (4.3)) випадкового процесу, що описує луна-сигнали від місцевості на інтервалі $(0, t)$ отримати оптимальну в середньоквадратичному змісті оцінку фільтрації $\Delta A(t)$, тобто самого стрибка. Щоб ця задача була повністю визначена, необхідно в початковий момент часу $t=0$ задати сумісну апіорну щільність ймовірності $P_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau)$ випадкової сукупності $\{\Delta A, \tau\}$.

З використанням загальних результатів теорії випадкових марківських процесів для апостеріорної щільності ймовірності марківської сукупності $\{\Delta A, \tau\}$ запишемо рівняння Стратоновича

$$\frac{\partial W_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau; t)}{\partial t} = L W_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau; t) + [F(\Delta A, \tau, t) - \langle F(\Delta A, \tau, t) \rangle_{\Delta A \tau}] \cdot W_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau; t), \quad (4.6)$$

$$t \geq 0$$

з початковою умовою

$$W_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau; t)|_{t=0} = P_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau). \quad (4.7)$$

Перша складова в правій частині (4.6) характеризує апіорні відомості про випадковий процес, а друга складова описує відомості про випадковий процес, які були отримані в процесі вимірювань. Мета розв'язання рівняння (4.6) – слідкування за максимумом $W_{\Delta A \tau}(\Delta A, \tau; t)$, при якому похідна в часі від

цієї функції дорівнює нулю. Максимум досягається при деяких значеннях стрибка ΔA . Спочатку визначається середня функція $\langle F(\Delta A, \tau, t) \rangle_{\Delta A, \tau}$, а потім за рахунок змінювання стрибка ΔA досягають рівності нулю різниці в квадратних дужках (4.6). Це є підставою для отримання максимуму апостеріорної щільності ймовірностей стрибка при конкретних значеннях ΔA і фізичною умовою оптимального рішення рівняння (4.6).

В рівнянні (4.6) L – той же оператор, що і в рівнянні (4.4), а функція $F(\Delta A, \tau, t)$ буде різною для часу до стрибка і після нього. Вона визначається виразом

$$F_i(\Delta A, \tau, t) = S_i^T(\Delta A, t) N^{-1} [y(t) - \frac{1}{2} S_i(\Delta A, t)] = \begin{cases} F_0(\Delta A, t) & \text{при } t \leq \tau, \\ F_1(\Delta A, t) & \text{при } t > \tau, \end{cases} \quad i = 1, 2, \quad (4.8)$$

$$\langle F(\Delta A, \tau, t) \rangle_{\Delta A, \tau} = \iint_{-\infty}^{\infty} F(\Delta A, \tau, t) W_{\Delta A, \tau}(\Delta A, \tau; t) d\Delta A d\tau,$$

де N^{-1} – матриця, яка є оберненої матриці спектральної інтенсивності шумів спостережень в моделі,

$$S_0(\Delta A, t) = A_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0) = S_0(t), \quad (4.9)$$

$$S_1(\Delta A, t) = (A_0 + \Delta A) \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_1), \quad (4.10)$$

$$F_0(\Delta A, t) = \frac{2y(t)S_0(t) - S_0^2(t)}{N_0}, \quad (4.11)$$

$$F_1(\Delta A, t) = \frac{2y(t)S_1(\Delta A, t) - S_1^2(\Delta A, t)}{N_0}, \quad (4.12)$$

N_0 - спектральна щільність потужності шумів.

Введемо функцію апостеріорної ймовірності появи стрибка ΔA

$$p_1(t) = \int_{-\infty}^t W_\tau(\tau; t) d\tau, \quad (4.13)$$

$$W_\tau(\tau, t) \equiv \int_{-\infty}^{\infty} W_{\Delta A}(\Delta A, \tau; t) d\Delta A, \quad (4.14)$$

Систему рівнянь (3.6) тепер можна записати у вигляді:

$$\frac{dp_1}{dt} = P_\tau(t)e^{-z(t)} + p_1(1-p_1)[\langle F_1(\bar{x}, t') \rangle_1 - \langle F_0(\bar{x}, t') \rangle_0], \quad (4.15)$$

$$\frac{dz}{dt} = p_1[\langle F_1(\bar{x}, t') \rangle_1 - \langle F_0(\bar{x}, t') \rangle_0], \quad (4.16)$$

$$\frac{\partial W_0(\bar{x}, t)}{\partial t} = L_0 W_0(\bar{x}, t) + [F_0(\bar{x}, t) - \langle F_0(\bar{x}, t) \rangle_0] W_0(\bar{x}, t), \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial W_1(\bar{x}, t)}{\partial t} = L_1 W_1(\bar{x}, t) + [F_1(\bar{x}, t) - \langle F_1(\bar{x}, t) \rangle_1] W_1(\bar{x}, t) + \left[\frac{P_\tau(t)e^{-z(t)}}{p_1} \right] [W_0(\bar{x}, t) - W_1(\bar{x}, t)], \quad (4.18)$$

з початковими умовами $z(t)|_{t=0} = 0$.

В системі диференціальних рівнянь (4.15-4.18) вже визначені майже всі необхідні функції, за виключенням $P_\tau(t)$, що описує апіорний розподіл часу стрибка, який ми також вважатимемо розподілим за нормальним законом.

За допомогою низки перетворень аналогічних [25-28], отримуємо систему стохастичних диференціальних рівнянь, яка для «стрибка» амплітуди сигналу має вигляд:

$$\begin{cases}
\frac{dp_1}{dt} = P_{\tau_{cmp}}(t) \cdot e^{-z} + \frac{1}{N} \cdot p_1 \cdot (1-p_1) \left\{ \begin{aligned} &A \cdot \Delta A_1 [1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1)] + \frac{1}{2}(A_1^2) - \\ &-\sigma_{\Delta A_1}^2 + 2 \cdot n(t) \cdot \Delta A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \right\}, \\
\frac{dz}{dt} = \frac{p_1}{N} \left\{ A \cdot \Delta A_1 [1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1)] + \frac{1}{2}(\Delta A_1^2 - \sigma_{\Delta A_1}^2) + 2 \cdot n(t) \cdot (A_1) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \right\}, \\
\frac{d\Delta A_1}{dt} = \frac{1}{p_1} \cdot P_{\tau_{cr}}(t) \cdot e^{-z} \cdot (\Delta A_0 - \Delta A_1) + V_1(t) \cdot \frac{1}{N} \cdot [2 \cdot y(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) - A \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi_1) - \Delta A_1], \\
\frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{p_1} \cdot P_{\tau_{cr}}(t) \cdot e^{-z} \cdot \left[\frac{(\Delta A_0 - \Delta A_1)^2}{1} + V_0 - V_1 \right] - \frac{1}{N} \cdot V_1^2,
\end{cases} \quad (4.19)$$

де p_1 – апостеріорна ймовірність виявлення «стрибка» амплітуди сигналу,

z – швидкість спрацювання системи,

ΔA - амплітуда «стрибка»

$V_1(t)$ - дисперсія апостеріорного розподілу,

$V_0(t)$ - дисперсія апріорного розподілу, t - час,

τ_{cr} - момент «стрибка» амплітуди сигналу із значення $A_0(\tau_{cr})$ до $A_1(\tau_{cr})$,

$\varphi_0(t)$, $\varphi_1(t)$ - фази сигналу до появи стрибка та після нього відповідно,

$n(t)$ - білий гаусівський шум з нульовим середнім та спектральною інтенсивністю.

Початкові умови:

$$\Delta A_1(t) \Big|_{t=0} = \Delta A_0, \quad V_1(t) \Big|_{t=0} = V_0, \quad (4.20)$$

$$P_1(t) \Big|_{t=0} = \int_{-\infty}^0 P_{\tau}(t) dt. \quad (4.21)$$

4.3 Аналіз результатів моделювання оптимальної системи вимірювання стрибка інтенсивності кольору

Розв'язання системи диференціальних рівнянь (4.19) при початкових умовах (4.20-4.21) дозволяє отримати важливі характеристики системи виявлення наземних

орієнтирів. Залежність ймовірності виявлення стрибка амплітуди сигналу від часу приведена на рисунку 4.1. Якщо стрибок відсутній, то ймовірність близька до нуля (рисунок 4.1, пунктирна лінія), а якщо він реально існує, ця ймовірність для даного прикладу наближається до одиниці (рисунок 4.1, суцільна лінія).

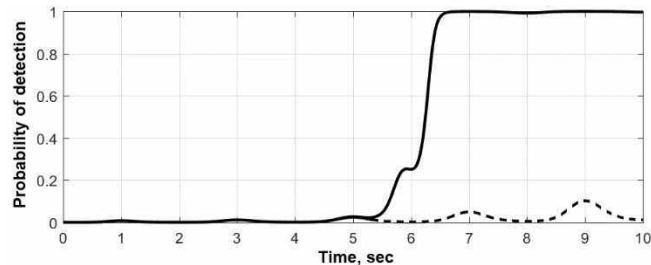


Рисунок 4.1 – Ймовірність виявлення амплітуди стрибка для випадкового процесу, що показаний на рисунку 4.1,а (пунктирна лінія) та рисунку 4.1,б (суцільна лінія)

Ймовірність виявлення амплітуди стрибка істотно залежить від енергетичних характеристик стрибка, тобто, його інтенсивності та тривалості. Рисунок 4.2 ілюструє залежність цієї ймовірності від рівня амплітуди при незмінній тривалості, яка приведена на рисунку 4.1, б. Для умов, що приведені раніше, ймовірність 0,8 досягається навіть тоді, коли стрибок інтенсивності перевищує половину амплітуди сигналу, що відбивається від навколишньої місцевості (рисунок 4.2).

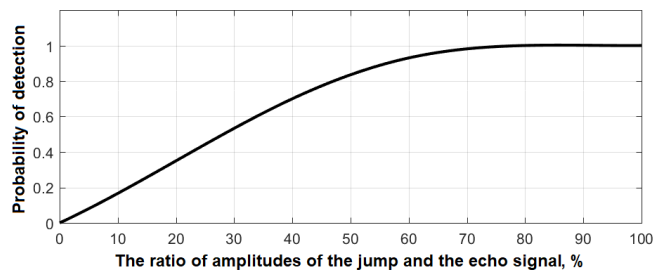


Рисунок 4.2. – Ймовірність виявлення стрибка інтенсивності кольору від відношення інтенсивності стрибка від НО та місцевості

Оцінка стрибка амплітуди, яка отримана в результаті розв'язання системи рівнянь (4.19), представлена на рисунку 4.3. Система не здатна визначити форму стрибка, але амплітуду стрибка визначає добре.

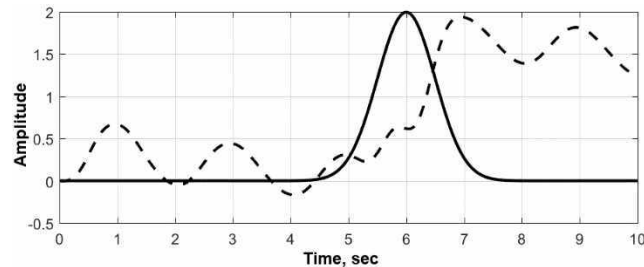


Рисунок 4.3. – Амплітуда стрибка (суцільна лінія) та її оцінка (пунктирна лінія)
Точність оцінки стрибка амплітуди визначається з рівняння дисперсії (четверте рівняння системи (4.19)). Часова залежність дисперсії приведена на рисунку 4.4.

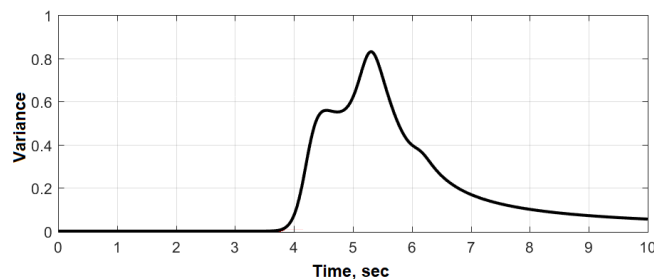


Рисунок 4.4. – Часова залежність дисперсії стрибка амплітуди

Тільки через деякий час дисперсія стрибка амплітуди зменшується до малих значень. Цей час залежить від швидкості спрацювання системи, яка визначається з другого рівняння системи (4.19) і приведена на рисунку 4.5.

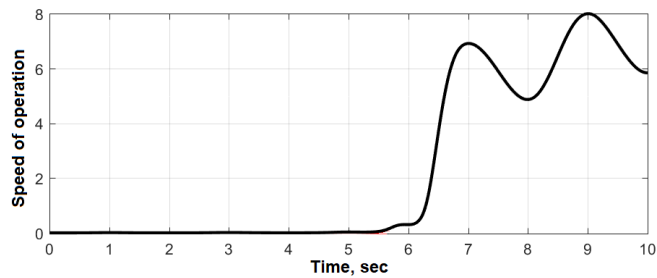


Рисунок 4.5. – Приклад залежності швидкості спрацювання системи від часу

Отже, для визначення стрибка амплітуди потрібний деякий час, що не є критичним для відносно повільних мобільних автономних роботів.

Результати моделювання отримані для випадку відсутності апріорної інформації про час виникнення стрибка інтенсивності кольору, а це означає, що приведені цифрові показники характеризують граничні властивості системи виявлення і оцінювання стрибків інтенсивності кольору від наземних орієнтирів. Наявність будь-якої інформації про стрибки підвищує якість їх виявлення і розширює область застосування методу.

4.4 Висновки по четвертому розділу

Синтезована в дипломній роботі оптимальна система вимірювання інтенсивності кольору наземного орієнтиру не може з належними показниками якості вимірювати швидко змінювання інтенсивності, що обумовлені попаданням орієнтиру в зону огляду відеокамери.

Для виявлення і вимірювання стрибків інтенсивності кольору в розділі синтезована оптимальна система, в основі якої покладено рівняння Фоккера-Планка і рівняння Стратоновича. Точність вимірювання стрибка визначається на основі рівняння дисперсії і може бути високою. Дисперсія інтенсивності кольору залежить від багатьох факторів.

5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ

На робочому місці оператора, який буде працювати за персональним комп'ютером у програмі «Колориметр 2» яка узгоджена з Національним науковим центром “Інститутом метрології”, буде знаходитися комп'ютерна техніка, і як ми знаємо всі електричні пристрої мають високонебезпечні для людини фактори.

Серед фізіологічних факторів при роботі з персональним комп'ютером (ПК) на перше місце більшість дослідників виносять кістково-м'язовий дискомфорт та особливо зоровий дискомфорт. Це вимагає пильної уваги до питань оцінки зорового аналізатора, організації робочого місця, робітничого середовища і трудової діяльності працюючих з ПК.

У результаті проведення досліджень було встановлено, що професія користувача ПК являє собою модель розумової праці. Ця робота виконується в одноманітній позі в умовах обмеження загальної м'язової активності і при рухливості кистей рук. Також відчувається висока напруга зорових функцій і нервово-емоційній напруга в умовах впливів різноманітних фізичних факторів.

Після роботи за комп'ютером знижується працездатність, зменшується концентрація уваги і зростає можливість розвитку різних захворювань. Прямий вплив на працездатність мають ергономічні параметри робочого місця. Відповідно, для поліпшення умов роботи оператора необхідно призначити перерви для відпочинку.

Це означає, що під час роботи оператор повинен дотримуватись основних норм промсанітарії, правил електробезпеки та пожежної безпеки, для передбачення та попередження безпечних ситуацій.

5.1 Техніка безпеки та промислова санітарія під час роботи на ПК

Монітор є джерелом практично усіх видів електромагнітного випромінювання (радіації). У залежності від впливу на об'єкт, ці випромінювання бувають іонізуючими і неіонізуючими. До іонізуючого відноситься рентгенівське

випромінювання, до неіонізуючих – електромагнітне поле (випромінювання) наднизької і низької частоти.

Іонізуюче випромінювання, впливаючи на об'єкт, зокрема на клітини людини, викликає їхнє ушкодження за рахунок утворення іонів. Ці ушкодження можуть бути летальними, коли клітка гине, і сублетальними, коли клітка виживає, але інформація, ("захист") у неї псується. Такі клітки можуть бути джерелом виникнення раку.

Електромагнітні випромінювання наднизької частоти не можуть викликати іонізацію, а відповідно і мутацію. Їхня дія на живу клітину мало вивчена, однак відомо, що вони за відносно короткий термін впливу від 10 до 15 років не приводять до виникнення злоякісних пухлин. Існує величезна кількість досліджень електромагнітного поля наднизької частоти, одні з яких доводять, що цей вид випромінювання шкідливий для здоров'я, а інші – зворотне.

Отже джерела, що іонізують випромінювання, такі як рентгенівське, при визначеній дозі опромінення можуть бути причиною виникнення злоякісних пухлин. Рентгенівське випромінювання, що відходить від монітора мізерно мало порівняно з природним радіаційним тлом. Це означає те, що чи ви сидите поруч з дисплеєм чи гуляєте по вулиці – дозу рентгенівського випромінювання ви одержите приблизно ту саму.

ВИСНОВКИ

Метою дипломної роботи було розробка методу вимірювання кольоровості наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів і оцінка точності вимірювання цим методом.

Був обраний об'єкт дослідження, на основі якого отримані графіки залежності параметрів кольоровості від горизонтальної координати кадру, які були розраховані у програмі «Колориметр 2». Також з рівняння Фоккера – Планка і марковської теорії лінійної фільтрації була отримана оптимальна за критерієм максимуму апостеріорної щільності ймовірностей система диференціальних рівнянь, що описує поведінку параметрів кольоровості дослідженого об'єкта і результати оцінки цих параметрів. Для цього використовувалась схема комплексуювання вимірювачів, що ґрунтуються на різних фізичних принципах. Таким чином, показана можливість високоточних вимірювань в умовах шумів оптичного характеру.

Для випадків швидких змінювань інтенсивності кольору, обумовлених появою наземного орієнтиру в зоні огляду відеокамери, синтезована оптимальна система виявлення і вимірювання амплітуди цих стрибків та дисперсії стрибків, що легко дозволяє оцінити дисперсію вимірювання, тобто його точність для широкого кола умов. Все це свідчить про те, що мета дипломної роботи, на думку автора, досягнута.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Панкрашкин А. Визначення виміру кольору. Компоненти та технології 2007, №1, 172 с.
2. Джадд Д., Вишецкі Г. Колір в науці і техніці: навч.-метод. посіб. 1978. В оригіналі — «Color in business, science, and industry» 251 с.
3. Гуревіч М.М. Кольор і його вимірювання. – Видавництво Академія наук СРСР, 1950. 169 с.
4. Noboru Ohta, Alan Robertson. Colorimetry: Fundamentals and Applications. — Wiley, 2005. 102 с.
5. R. W. G. Hunt, M. R. Pointer. Measuring Colour, 4th Edition. — Wiley, 2011. 133с.
6. Тихонов В. И. Оптимальный приём сигналов. – М.: Радио и связь , 1983. - 320 с.
7. Богачев В.И., Крылов Н.В., Ренер М., Шапошников С.В. Уравнение Фоккера – Планка – Коломогорова. – И.: Институт компьютерных исследований, 2013. 60 с.
8. Вильямс А. Елісон Л. Quantifying Uncertainty in Analytical Measurement. Eurachem. 2012. 141 с.
9. Mohamed Abdellatif. Color-Based Object Tracking and Following for Mobile Service Robots. - International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology, Vol. 2, Issue 11, November 2013. 5921-5928 с.
10. Цифровий шум на фотографії: <https://photohandle.com/tsifrovoy-shum-na-fotografii/>
11. Poliarus O., Poliakov Y. (2019) The Methods of Radar Detection of Landmarks by Mobile Autonomous Robots. In: Sergiyenko O., Flores-Fuentes W., Mercorelli P. (eds) Machine Vision and Navigation. Springer, Cham., 2020. 171-196 с.
12. Poliarus O., Poliakov Y., Lindner. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. - The

44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Washington D. C., USA, October 21-23, 2018, 3165-3170 с.

13. Мальцев А. А., Силаев А. М. Оптимальное оценивание моментов случайных скачкообразных изменений параметров сигналов. – Радиотехника и электроника, 1989, том 34, №5, 1023-1035 с.

14. Полярус О. В., Барчан В. В., Поляков Є. О., Коваль А. О. Оптимальна система виявлення і оцінювання стрибків амплітуди вібрацій динамічних об'єктів. – Харків: Східно-Європейський журнал передових технологій, 2009, 6/6 (42), 21-23 с.

15. Oleksandr Poliarus, Yevhen Poliakov, Lars Lindner. Determination of landmarks by mobile robot's vision system based on detecting abrupt changes of echo signals parameters. - The 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Washington D. C., USA, October 21-23, 2018, 3165-3170 с.

16. O. V. Poliarus, Y. O. Poliakov, I. L. Nazarenko, Y. T. Borovyk, M. V. Kondratiuk. Detection of Jumps Parameters in Economic Processes (on the example of modelling profitability. – International Journal of Engineering & Technology, 2018, vol. 7, no. 4.3, 488-496 с.

17. Etienne Colle, Simon Galerne. A multihypothesis set approach for mobile robot localization using heterogeneous measurements provided by the Internet of Things. – Robotics and Autonomous Systems. – Elsevier, 2017, 96, 102-113 с.

18. Amanda Prorok, Lukas Gonon and Alcherio Martinoli. Online Model Estimation of Ultra-Wideband TDOA Measurements for Mobile Robot Localization. – 2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Saint Paul, USA, 8 с.

19. M. Frischka and S. Conrad. Landmark Recognition: State-of-the-Art Methods in a Large-Scale Scenario. In Proc. of the 16th LWA Workshops: KDML, IR and FGWM, Aachen, Germany, pages 10-17, 2014. 232 с.

20. Etienne Colle, Simon Galerne. A multihypothesis set approach for mobile robot localization using heterogeneous measurements provided by the Internet of Things. – Robotics and Autonomous Systems. – Elsevier, 2017. 102-113 с.

ДОДАТОК А
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний автомобільно-дорожній університет
(ХНАДУ)

Механічний факультет
Кафедра метрології та безпеки життєдіяльності

ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

до дипломної роботи магістра

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОЧНОСТІ ВІМІРЮВАННЯ КОЛЬОРОВОСТІ НАЗЕМНОГО ОРІЄНТИРУ
АВТОПОМІЦНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ

Завідувач кафедри д-р техн. наук, проф.

Богатов О. І.

Нормоконтролер канд. техн. наук, доцент

Москаленко М. В.

Керівник, д-р техн. наук, проф.

Полярус О. В.

Студент гр. ММ-61-21

Зенцов М.Ю.

- **Мета** - розробка методу вимірювання кольоровості наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів і оцінка точності вимірювання цим методом.
- **Об'єкт** - кольоровість наземних орієнтирів, що можуть використовуватись для навігації мобільних автономних роботів на незнайомій місцевості.
- **Предмет дослідження** - вимірювання кольоровості наземних орієнтирів в реальних умовах навігації мобільних роботів.

Схема створення відбитих луна-сигналів

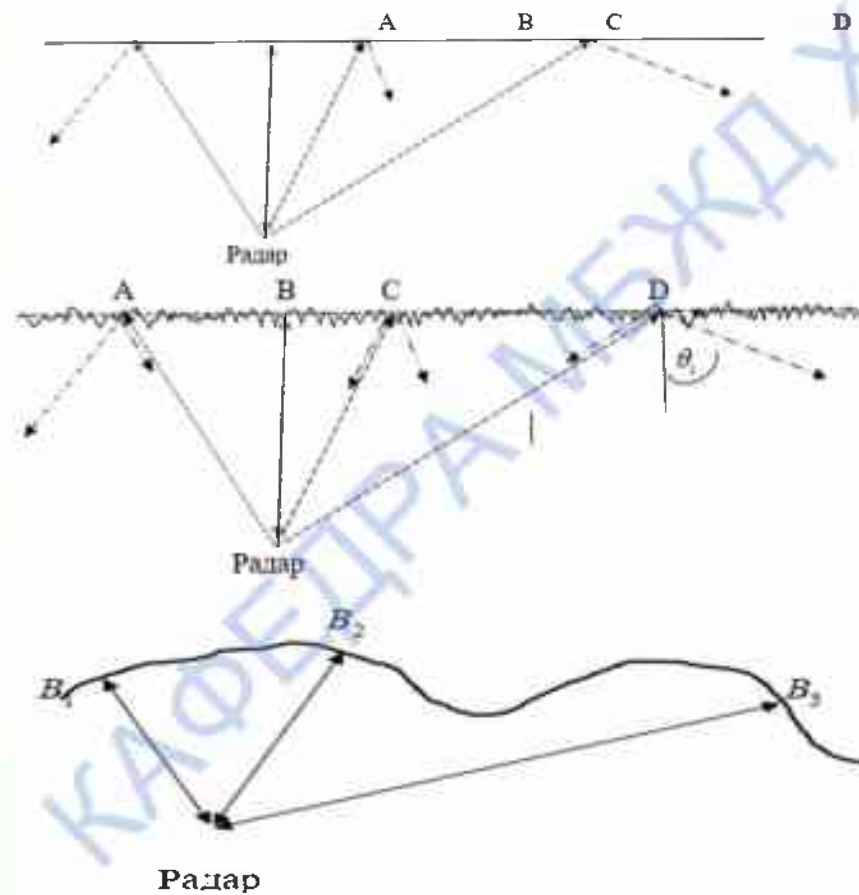


Схема створення відбитих сигналів при скануванні рівної поверхні

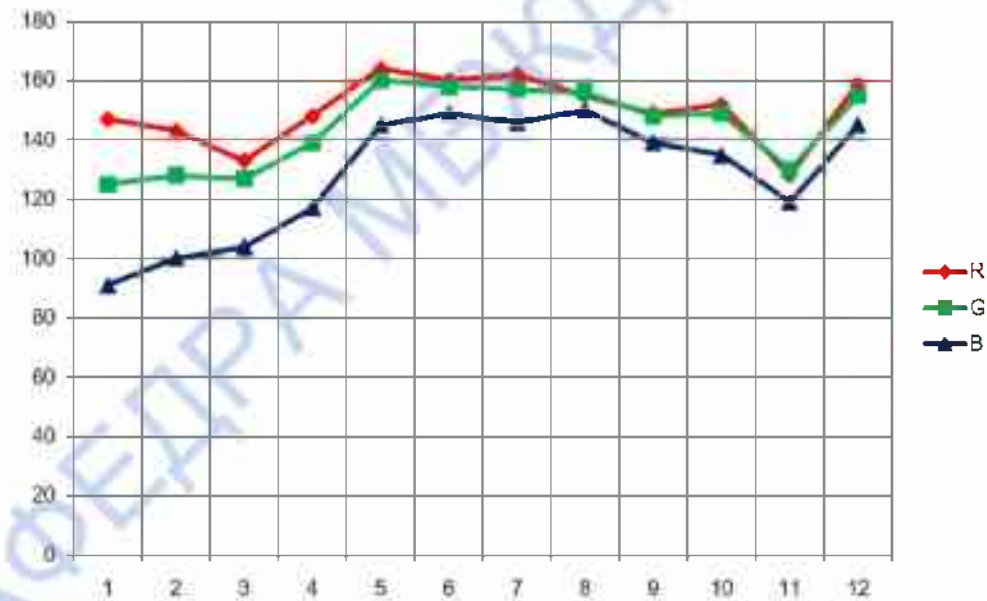
Схема створення луна-сигналів від поверхні з дрібномасштабними нерівностями

Схема створення луна-сигналів від нерівної гладкої поверхні

Приклад можливого орієнтиру для АМР



Залежність параметрів кольоровості від горизонтальної координати при розділі фотографії на 4 вертикальні смуги



Система стохастичних диференціальних рівнянь

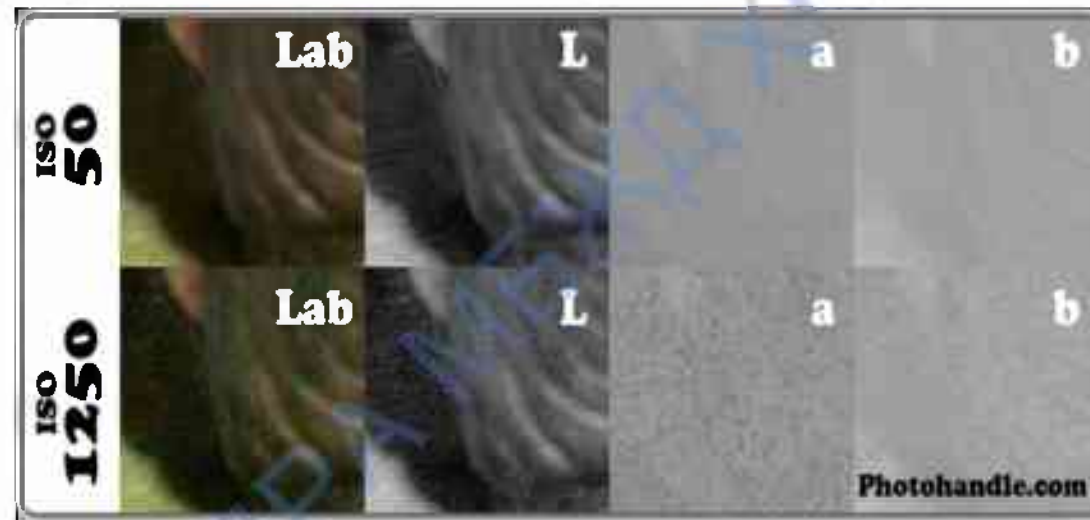
$$\frac{dR(t)}{dt} = -\alpha_r R(t) + n_{r,t} \quad (3.1)$$

$$\frac{dG(t)}{dt} = -\alpha_g G(t) + n_{g,t} \quad (3.2)$$

$$\frac{dB(t)}{dt} = -\alpha_b B(t) + n_{b,t} \quad (3.3)$$

де $\alpha_r, \alpha_g, \alpha_b$ - коефіцієнти, що являють собою ширину спектру повідомлення про інтенсивність відповідно червоного, зеленого і синього кольорів, $n_{r,t}, n_{g,t}, n_{b,t}$ - незалежні гауссівські білі шуми для червоного, зеленого та синього кольорів, що мають двохсторонню спектральну щільність $\frac{1}{2}N_{0r}, \frac{1}{2}N_{0g}, \frac{1}{2}N_{0b}$ відповідно і створюють матрицю спектральних інтенсивностей.

Цифрові шуми в кольоровому просторі Lab



Як видно з рисунку, шуми каналу L відповідають за яскравість цифрового шуму, а шуми в каналах a і b, - за хроматичність.

Спектральна щільність кольорових шумів за методом
Монте Карло

$$\mathbf{N}_c = \begin{pmatrix} \frac{N_{0R}}{2} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N_{0G}}{2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N_{0B}}{2} \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

$$\xi_x(t) = R(t) + n_x(t), \quad (3.7)$$

$$\xi_y(t) = G(t) + n_y(t), \quad (3.8)$$

$$\xi_z(t) = B(t) + n_z(t), \quad (3.9)$$

Синтезована система диференціальних рівнянь

$$\frac{dK_{11}(t)}{dt} = -2\alpha_1 K_{11}(t) - \frac{2K_{11}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{11}^2(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{11}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} + \frac{N_{11}}{2}$$

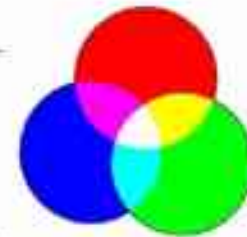
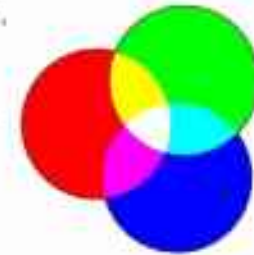
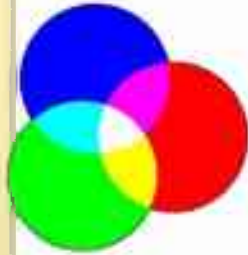
$$\frac{dK_{12}(t)}{dt} = -(\alpha_1 + \alpha_2)K_{12}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{11}(t)K_{12}(t)h_2^2(t)}{N_2}$$

$$\frac{dK_{13}(t)}{dt} = -(\alpha_1 + \alpha_2)K_{13}(t) - \frac{2K_{11}(t)K_{13}(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{11}(t)K_{13}(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{11}(t)K_{13}(t)h_2^2(t)}{N_2}$$

$$\frac{dK_{21}(t)}{dt} = -2\alpha_1 K_{21}(t) - \frac{2K_{21}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{21}^2(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{21}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} + \frac{N_{21}}{2}$$

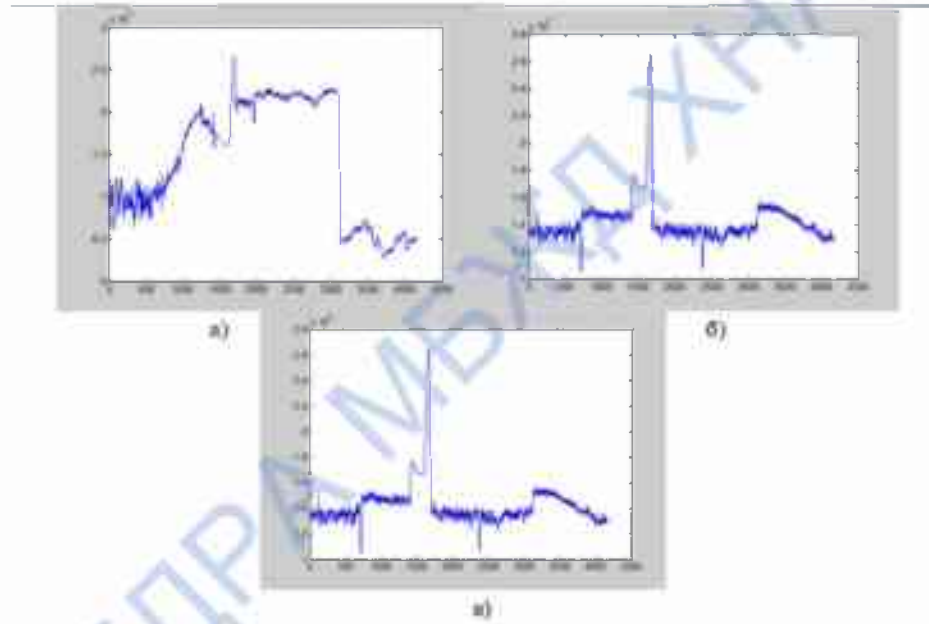
$$\frac{dK_{22}(t)}{dt} = -(\alpha_1 + \alpha_2)K_{22}(t) - \frac{2K_{21}(t)K_{22}(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{21}(t)K_{22}(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{21}(t)K_{22}(t)h_2^2(t)}{N_2}$$

$$\frac{dK_{31}(t)}{dt} = -2\alpha_1 K_{31}(t) - \frac{2K_{31}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} - \frac{2K_{31}^2(t)h_0^2(t)}{N_0} - \frac{2K_{31}^2(t)h_2^2(t)}{N_2} + \frac{N_{31}}{2}$$





Оцінки інтенсивності кольорів



а) червоного, б) зеленого, в) синього.



Опрацювання даних у програмі Matlab

1. Для виявлення наземних орієнтирів потрібно оцінити результати вимірювання кольоровості з точки зору наявності різких перепадів кольоровості в сусідніх смугах;
2. Вимірювання параметрів кольоровості наземного орієнтиру на фоні шумів кольоровості та різних оптичних ефектів впливу досягається при реалізації синтезованої системи лінійної фільтрації параметрів кольоровості;
3. Для аналізу кольоровості наземного орієнтиру необхідно проводити багаторазові вимірювання на одному і тому ж орієнтиру в різних умовах освітленості і при різному фоні;
4. Внаслідок істотної відмінності кольорів в різних частинах кадру для виділення наземного орієнтиру необхідно здійснити розділення кадру на вертикальні смуги і в кожній смузі проводити вимірювання середньої кольоровості.

Система оцінювання амплітуди стрибка і його дисперсії

$$\begin{cases} \frac{dP_1}{dt} = P_{c_1}(t) \cdot e^{-\lambda t} + \frac{1}{N} \cdot P_1 \cdot (1 - P_1) \left\{ \begin{aligned} &A \cdot \Delta A_1 [1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1)] + \frac{1}{2} (A_1^2) - \\ &-\sigma_{\Delta A}^2 - 2 \cdot n(t) \cdot \Delta A_1 \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \end{aligned} \right\}, \\ \frac{dA_1}{dt} = \frac{P_1}{N} \left\{ A \cdot \Delta A_1 [1 - \cos(\varphi_0 - \varphi_1)] + \frac{1}{2} (\Delta A_1^2 - \sigma_{\Delta A}^2) + 2 \cdot n(t) \cdot (A_1) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) \right\}, \\ \frac{d\Delta A_1}{dt} = \frac{1}{P_1} P_{c_1}(t) \cdot e^{-\lambda t} \cdot (\Delta A_0 - \Delta A_1) + V_1(t) \cdot \frac{1}{N} \cdot [2 \cdot y(t) \cdot \sin(\omega t + \varphi_1) - A \cdot \cos(\varphi_0 - \varphi_1) - \Delta A_1], \\ \frac{dV_1}{dt} = \frac{1}{P_1} P_{c_1}(t) \cdot e^{-\lambda t} \cdot \left[(\Delta A_0 - \Delta A_1)^2 + V_0 - V_1 \right] - \frac{1}{N} V_1^2, \end{cases}$$

Стрибки амплітуди

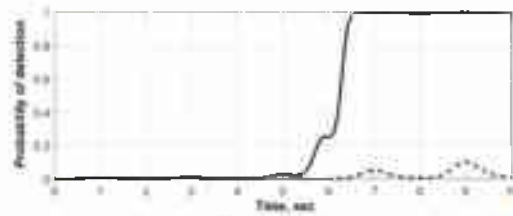


Рисунок 4.1

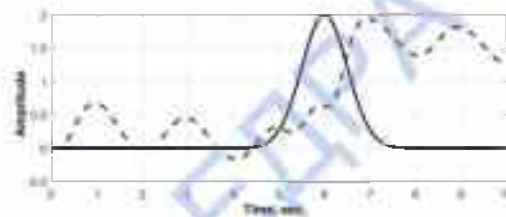


Рисунок 4.3

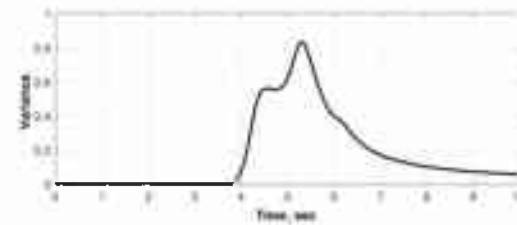


Рисунок 4.4

Висновок

- Метою дипломної роботи було розробка методу вимірювання кольоровості наземних орієнтирів для автономних мобільних роботів і оцінка точності вимірювання цим методом.
- Був обраний об'єкт дослідження, на основі якого отримані графіки залежності параметрів кольоровості від горизонтальної координати кадру, які були розраховані у програмі «Колориметр 2». Також з рівняння Фоккера – Планка і марковської теорії лінійної фільтрації була отримана оптимальна за критерієм максимуму апостеріорної щільності ймовірностей система диференціальних рівнянь, що описує поведінку параметрів кольоровості дослідженого об'єкта і результати оцінки цих параметрів. Для цього використовувалась схема комплексування вимірювачів, що ґрунтуються на різних фізичних принципах. Таким чином, показана можливість високоточних вимірювань в умовах шумів оптичного характеру.
- Для випадків швидких змінювань інтенсивності кольору, обумовлених появою наземного орієнтиру в зоні огляду відео камери, синтезована оптимальна система виявлення і вимірювання амплітуди цих стрибків та дисперсії стрибків, що легко дозволяє оцінити дисперсію вимірювання, тобто його точність для широкого кола умов. Все це свідчить про те, що мета дипломної роботи, на думку автора, досягнута.