

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

Кваліфікаційна наукова
робота на правах рукопису

ТОВКАЧ ІГОР ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.396.96

ДИСЕРТАЦІЯ

**МЕТОДИ АДАПТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ
БЕЗПІЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТУ НА ОСНОВІ
ВИМІРЮВАНЬ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ**

05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи

Технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук.
Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ І. О. Товкач
(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник
ЖУК Сергій Якович доктор технічних наук, професор

Київ-2018

АНОТАЦІЯ

Товкач І.О. Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотного літального апарату на основі вимірювань сенсорної мережі.
– Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису.

Дисертаційна робота на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.17 – Радіотехнічні та телевізійні системи – Київ, 2018.

У дисертаційній роботі вирішена актуальна наукова задача розробки методів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні, які дозволяють підвищити точність визначення його місцеположення.

У першому розділі дисертації показана актуальність задачі визначення параметрів руху БПЛА на основі даних сенсорної мережі, яка обумовлена появою нового класу загроз з використанням БПЛА, що призводить до необхідності розробки систем, які вирішують завдання виявлення, визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА. Проведено аналіз методів визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, що базуються на математичних методах максимальної правдоподібності та найменших квадратів. Відмічено, що у відомих методах обчислення координат БПЛА виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків. Розглянуто методи калмановської фільтрації і адаптивного оцінювання параметрів руху цілі і зроблено висновок про доцільність застосування для вирішення сформульованої наукової задачі математичного апарату змішаних марківських процесів у дискретному часу. Виконано постановку задачі дослідження.

У другому розділі дисертації з використанням математичного апарату розширеної калманівської фільтрації розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА за даними сенсорної мережі на основі:

TDOA-вимірювань; RSS-вимірювань; комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань, які після формування початкових умов на основі вимірювань від мінімального числа датчиків, дозволяють рекурентно уточнювати на кожному кроці l місцеположення БПЛА по мірі надходження вимірювань від інших датчиків. За допомогою статистичного моделювання виконано аналіз точностних характеристик розроблених алгоритмів. Проведено їх порівняння з нижньою границею Рао-Крамера і відомими алгоритмами. Також виконано аналіз впливу конфігурації датчиків (топології) сенсорної мережі на точність визначення місцеположення БПЛА. Отримано конфігурації сенсорної мережі, які можуть бути рекомендовані, у випадках відомого і невідомого напрямків появи БПЛА.

У третьому розділі дисертації на основі математичного апарату змішаних марківських процесів в дискретному часі синтезовано оптимальні та квазіоптимальні алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі: TDOA-вимірювань; RSS-вимірювань; комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань. Оптимальні алгоритми адаптивного є рекурентними і описують еволюцію апостеріорних розподілів оцінюваних параметрів, а оптимальні пристрої є багатоканальними і відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. Квазіоптимальні алгоритми отримані з використанням полігаусівської апроксимації апостеріорних розподілів. Аналіз отриманих квазіоптимальних алгоритмів виконано за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ на прикладі оцінювання параметрів руху БПЛА, що виконує на випадкових часових інтервалах заздалегідь невідомі види маневрів.

У четвертому розділі дисертації виконано аналіз ефективності розроблених в розділах 2 і 3 алгоритмів в просторі, що відповідає реальній ситуації оцінювання параметрів руху БПЛА, який випромінює радіосигнал. Розроблені алгоритми дозволяють отримати характеристики визначення місцеположення БПЛА близькі до потенційно досяжних, що визначаються

нижньою границею Рао-Крамера, за всіма трьома просторовими координатам. Також розроблені адаптивні фільтр на основі TDOA- і RSS-вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань дозволяє значно підвищити ймовірність розпізнавання короточасних маневрів БПЛА. Крім того, проведено порівняльний аналіз обчислювальних витрат, необхідних при реалізації синтезованих алгоритмів, а також можливостей їх реалізації на базі сучасних обчислювальних систем в реальному масштабі часу.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому що:

1. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, виконується розпізнавання виду його маневру і оцінювання помилки вимірювання опорного датчика, що дозволяє реалізувати послідовну обробку вимірювань, що надходять і уникнути обернення матриць великих розмірностей.

2. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, оцінюється невідома потужність передавача, виконується розпізнавання виду його маневру і враховується дисперсія помилок вимірювання потужності датчиками мережі, що дозволяє його використовувати для визначення місцеположення БПЛА невідомого типу.

3. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА, в якому, на відміну від існуючих, виконується комплексна обробка TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі при невідомій потужності передавача, що дозволяє підвищити точність визначення його місцеположення в порівнянні з їх роздільною обробкою.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що:

1. Розроблені адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2 – 4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі, дозволяє зменшити СКВ цієї помилки додатково в 2 – 5 рази.

2. Адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короточасних маневрів БПЛА на 15 – 40 %.

3. Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно на колі, забезпечує вид ізоліній кругового СКВ місцеположення в горизонтальній площині також у вигляді кіл і може бути рекомендована, якщо напрямок появи БПЛА невідомий.

4. Розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі забезпечують точнісні характеристики близькі до потенційно можливих, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера.

5. Розроблені алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, а також при їх комплексному використанні не вимагають значних обчислювальних витрат і можуть бути реалізовані на сучасному процесорі DSP TMS320C6747 в реальному масштабі часу.

Ключові слова: безпілотний літальний апарат, TDOA-вимірювання, RSS-вимірювання, сенсорна мережа, розширений фільтр Калмана, рекурентний адаптивний алгоритм, параметри руху джерела радіовипромінювання, змішані марківські процеси.

SUMMARY

Tovkach I.O. Methods of adaptive estimation of unmanned aerial vehicles movement parameters based on measurement of the sensor network.
— Qualification manuscript.

The dissertation for the scientific degree of candidate of engineering sciences in the speciality 05.12.17 – Radio engineering and television systems – Kyiv, 2018.

An actual scientific problem of developing methods for adaptive estimation of the maneuvering UAV movement parameters based on TDOA- and RSS-measurements of the sensor network and their complex use that allow to increase the accuracy of determination its location has been solved in the dissertation.

The first section of the dissertation shows the relevance of the task of determining of the UAV movement parameters based on the sensor network data, due to the emergence of a new class of threats using UAV, which leads to the need to develop systems that solve the problems of detection, location and UAV movement parameters. The analysis of methods for locating UAVs based on TDOA- and RSS- measurements of the sensor network based on mathematical methods of maximum likelihood and least squares is carried out. It is noted that in known methods of calculating the UAV coordinates is performed after arrival of measurements from all sensors. The methods of Kalman filtering and adaptive estimation of object motion parameters are considered and conclusion that it is expedient to use the mathematical apparatus of mixed Markov processes in discrete time to solve the formulated scientific problem. The research problem was formulated.

The second section of the dissertation, with use of a mathematical apparatus of the extended Kalman filtering, recurrent algorithms for determining the UAV location according to a sensor network data were developed on the basis of: TDOA-measurements; RSS-measurements; complex processing of TDOA- and RSS- measurements, which, after formation of initial conditions based on

measurements of the minimum number sensors, allow recurrently to specify at each step l the UAV location in process of arrival of measurements from other sensors. With the help of statistical modeling, the analysis of the accuracy characteristics of the developed algorithms is performed. Comparing with lower bound of Cramer-Rao and the known algorithms is carried out them. The analysis of the influence of sensors configuration (topology) of the sensor network on the UAV location accuracy was also performed. Sensor network configurations have been obtained, which can be recommended in cases of known and unknown directions of UAV appearance.

The third section of the dissertation, on the basis of a mathematical apparatus of the mixed Markov processes in discrete time optimal and quasioptimal algorithms of the adaptive filtering of the maneuvering UAV movement parameters according to a sensor network data are synthesized on a basis of: TDOA-measurements; RSS-measurements; complex processing of TDOA- and RSS- measurements. The optimal adaptive algorithms are recurrent and describe the evolution of a posteriori distributions of the estimated parameters, and the optimal devices are multi-channel and belong to the class of devices with feedbacks between channels. Quasioptimal algorithms obtained using polygous approximation of a posteriori distributions. The analysis of the obtained quasioptimal algorithms is carried out with the help of statistical computer simulation using the example of estimation of the UAV movement parameters performing in advance at random time intervals unknown types of maneuvers.

The fourth section of the dissertation analyzes the effectiveness of algorithms developed in sections 2 and 3 in space, which corresponds to a real situation of estimating of the UAV movement parameters emitting a radio signal. The developed algorithms allow to obtain UAV location characteristics close to the potentially achievable ones determined by lower bound Cramer-Rao over all three spatial coordinates. Also developed adaptive filter based on TDOA- and RSS-measurements allow to recognize the hovering and almost uniform motion of the UAV with a probability close to unity. The adaptive filter based on complex

processing of TDOA- and RSS-measurements allows to significantly increase the probability of recognition of short-time UAV maneuvers. In addition, a comparative analysis of the computational costs required for the implementation of synthesized algorithms, and also possibilities of their implementation on the basis of modern computer systems is carried out.

The scientific novelty of obtained results is as follows:

1. For the first time, a method of adaptive estimation of a maneuvering UAV movement parameters based on TDOA measurements of a sensor network is developed, in which, unlike the existing ones, it recognizes the type of maneuver and estimates the measurement error of the reference sensor, which allows sequential processing of the incoming measurements and avoid the inversion of large-dimensional matrixes.

2. For the first time, a method of adaptive estimation of a maneuvering UAV movement parameters based on RSS measurements of a sensor network is developed, in which, unlike the existing ones, estimated unknown transmitter power, executed recognition of its manoeuvre type and dispersion of power measurement errors by network sensors is considered, which allows it to be used to determine the location of a UAV of unknown type.

3. For the first time, a method of adaptive estimation of a maneuvering UAV movement parameters, in which, unlike the existing ones, complex processing of TDOA- and RSS- measurements of the sensor network is performed at an unknown transmitter power, that allows to increase the accuracy of determination its location in comparison with their separate processing.

Practical importance of obtained results is as follows:

1. The developed adaptive filters based on TDOA- and RSS- measurements allow to reduce RMS errors UAV position in the horizontal plane in comparison with recurrent location algorithms by 2 to 4 times, and the use of complex

processing of TDOA- and RSS- measurements of the sensor network, allows to reduce RMS of this error by an additional 2 to 5 times.

2. Adaptive filters based on TDOA- and RSS- measurements allow to recognize the hovering and almost uniform motion of the UAV with the probability close to unit. Adaptive filter based on complex processing of TDOA- and RSS- measurements allows to increase the probability of recognition of short-term UAV maneuvers by 15 – 40%.

3. The configuration of nine sensors, eight of which are located uniformly on a circle, provides a view of the isolines of the circular RMS in the horizontal plane also in the form of circles and can be recommended if the direction of the UAV appearance is unknown.

4. The developed recurrent algorithms of estimation UAV position based on TDOA-, RSS-, and also complex processing of TDOA- and RSS- measurements of the sensor network provide accuracy characteristics close to the potentially achievable ones determined by the lower limit of the Cramer-Rao.

5. The developed algorithms of the adaptive filtering of the maneuvering UAV movement parameters based on TDOA- and RSS- measurements of a sensor network and also in case of their complex use, do not require the considerable computing costs and can be realized on the modern DSP TMS320C6747 processor in real time.

Keywords: unmanned aerial vehicles, TDOA-measurement, RSS-measurement, sensor network, an extended Kalman filter, recurrent adaptive algorithm, UAV parameters movement, mixed Markov processes.

Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

1. Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55. (**WEB OF SCIENCE**).

2. Товкач И. О. Адаптивная фильтрация параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2017. – № 69. – с. 41-48. (**WEB OF SCIENCE**).

3. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Recurrent Algorithm for TDOA Localization in Sensor Networks, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.9, №4, pp.489-494, Oct.-Dec., 2017. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727> (**SCOPUS**).

4. I. Tovkach, S. Zhuk (2017). Filtration of parameters of the UAV movement at complex use of data sensor networks, obtained based on the TDOA and RSS methods, Information and Telecommunication Sciences. 2017, №1, pp.31-36. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12017.31-36>

5. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods, Radioelectronics and Communications Systems. Volume 60, Issue 12, 1 December 2017, Pages 528-537. (**SCOPUS**).

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Товкач І.О. Аналіз алгоритмів оцінювання місцезнаходження об'єкту за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція

«Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 14 — 20 березня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016. — С. 50 — 52.

7. Товкач И.О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети по разностно-дальномерному методу при некоррелированных ошибках измерений / И.О. Товкач, С.Я. Жук // X Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2016", 19.04-22.04.2016 р.: тези доп. — Київ, 2016. — С.432-434.

8. Товкач І.О. Алгоритми пасивної локації за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу при корельованих похибках вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // X науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». Київ, 12 — 13 травня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016.

9. Товкач И.О. Анализ точностных характеристик алгоритма калмановской фильтрации параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе метода RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.

10. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya., Tkachuk P.S. Methods of determining the location of the radio sources in sensor networks based on WLAN, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 43-46.

11. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of movement of the maneuvering UAV according to sensor networks, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 47-50.

12. Товкач И.О. Фильтрация параметров движения БПЛА при комплексном использовании данных сенсорной сети, полученных на основе методов TDOA и RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // XI Міжнародна науково-

технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 374 — 376.

13. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of the unmanned aerial vehicle movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 160-165. **(SCOPUS)**.

14. I.O. Tovkach, O. S. Neuimin, S.Ya. Zhuk (2018). Filtration of parameters of the UAV movement based on the RSS-measurement at the unknown power of the transmitter, Proceedings of 14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018, pp. 57-60. **(SCOPUS)**.

15. Товкач І.О. Анализ влияния конфигурации сенсорной сети на точность определения местоположения источника радиоизлучения на основе TDOA-измерений / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 19 — 25 березня 2018 р.: матеріали конференції — Київ, 2018. — С. 38 — 40.

16. Товкач І.О. Анализ влияния конфигурации сенсорной сети на точность определения местоположения источника радиоизлучения при комплексном использовании TDOA- и RSS- измерений /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С.323 — 325.

ЗМІСТ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ	16
ВСТУП	17
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ І ПАРАМЕТРІВ РУХУ БПЛА	23
1.1 Актуальність завдання визначення параметрів руху БПЛА на основі даних сенсорної мережі	23
1.2 Аналіз методів визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань	29
1.3 Аналіз методів визначення місцеположення БПЛА на основі RSS- вимірювань	36
1.4 Аналіз методу калманівської фільтрації параметрів руху цілі	39
1.5 Аналіз адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючої цілі	44
1.6 Постановка задачі дослідження	53
Висновки по першому розділу	54
РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РЕКУРЕНТНИХ АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ БПЛА ЗА ВИМІРЮВАННЯМ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	57
2.1 Розробка рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань	57
2.2 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань	60
2.3 Розробка рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань	64
2.4 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань	67
2.5 Розробка алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань	72

2.6 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань	75
2.7 Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань.....	77
Висновки по другому розділу	86
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ АДАПТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МАНЕВРУЮЧОГО БПЛА НА ОСНОВІ TDOA- І RSS- ВИМІРЮВАНЬ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ	89
3.1 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань	89
3.2 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань	98
3.3 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при невідомій потужності передавач.....	103
3.4 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при невідомій потужності передавача.....	108
3.5 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань з відомою потужністю передавача.....	111
3.6 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань.....	115
3.7 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі	

	15
комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань.....	119
Висновки по третьому розділу.....	122
РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ І МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ	125
4.1 Аналіз ефективності визначення місцеположення БПЛА в просторі з використанням розроблених алгоритмів.....	125
4.2 Аналіз ефективності визначення параметрів руху маневруючого БПЛА в просторі з використанням розроблених алгоритмів.....	133
4.3 Аналіз можливості практичної реалізації розроблених алгоритмів.	145
Висновки по четвертому розділу.....	149
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ.....	151
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	154
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації.....	164
ДОДАТОК Б. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	167

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ СКОРОЧЕНЬ

API	Application Programming Interface
DSP	Digital Signal Processing
RSS	Received Signal Strength
TDOA	Time Difference of Arrival
БПЛА	безпілотні літальні апарати
БП	блок прогнозу
БСМ	бездротова сенсорна мережа
БФ	блок фільтрації
ВП	вирішальний пристрій
ДРВ	джерело радіовипромінювання
ДС	динамічна система
ЕОМ	електронна обчислювальна машина
ЗМП	змішаний марківський процес
СКВ	середньоквадратичне відхилення
ЦОМ	цифрова обчислювальна машина
ЩЙ	щільність ймовірності

ВСТУП

Актуальність теми. Доступність і масове використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА), привело до появи нового класу загроз: застосування в терористичних цілях, фотозйомка засекречених об'єктів, отримання несанкціонованого доступу до інформації в мережах WLAN, вторгнення на заборонену територію та ін. Це обумовлює необхідність розробки систем, які вирішують завдання визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА.

Розвиток технологій бездротового зв'язку і мікроелектроніки призвів до появи і широкого використання бездротових сенсорних мереж (БСМ), одним з основних застосувань яких є створення різних систем моніторингу та відстеження рухомих джерел радіовипромінювання (ДРВ), в тому числі і БПЛА. Найбільшого поширення для визначення місцеположення невідомого БПЛА за допомогою БСМ знаходять методи на основі вимірювання різниці часу приходу сигналів (TDOA-вимірювання) і потужності сигналу (RSS-вимірювання). Однак в отриманих з використанням критеріїв максимальної правдоподібності і найменших квадратів методах позиціонування БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань, обчислення координат БПЛА виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків, що призводить до необхідності обертати матриці великих розмірностей, а також не враховується дисперсія помилок вимірювання потужності.

Сучасні БПЛА можуть виконувати рух з різними видами маневрів, що призводить до зниження точності визначення їх місцеположення і параметрів руху, а також ускладнює вирішення завдань протидії БПЛА і їх нейтралізації. Синтезовані на основі методу калмановської фільтрації в дискретному часі алгоритми визначення параметрів руху цілі за даними траєкторних вимірювань є рекурентними і зручними для реалізації на ЕОМ. Однак при оцінюванні параметрів руху маневруючих об'єктів такі алгоритми часто є розбіжними.

Байєсівський метод адаптивного оцінювання процесів з випадковою структурою в дискретному часі призводить до фільтрів зі зростаючим числом каналів, які є практично нереалізованим і не дозволяє отримати рекурентні оптимальні алгоритми оцінювання таких процесів.

Тому актуальною **науковою задачею** є розробка методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні для підвищення точності визначення його місцеположення.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана на кафедрі «Радіотехнічних пристроїв і систем» радіотехнічного факультету КПІ ім. Ігоря Сікорського в рамках науково-дослідних робіт «Розробка алгоритмів адаптивного супроводу безпілотних літальних апаратів за даними сенсорної мережі з використанням методів пасивної локації» (номер державної реєстрації 0116U007862) (2016 р.) та «Розробка алгоритмів супроводження цілі за даними трикоординатної РЛС з виявленням маневру» (номер державної реєстрації 0116U006094) (2016 р.).

Мета роботи – підвищення точності визначення місцеположення БПЛА шляхом розробки методів адаптивного оцінювання його параметрів руху на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.

Відповідно до мети, **основними задачами** дослідження є:

1. Проаналізувати методи визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.
2. Удосконалити методи визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.
3. Розробити методи адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.

4. Проаналізувати ефективність синтезованих алгоритмів визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА шляхом статистичного моделювання на ЕОМ і порівняння їх з відомими.

5. Виконати аналіз обчислювальних затрат і можливостей практичної реалізації синтезованих алгоритмів з використанням сучасної мікропроцесорної техніки.

Об'єктом дослідження є процеси визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Предметом дослідження є методи оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Методи дослідження. В роботі використовувалися методи теорії ймовірностей, марківських випадкових процесів, лінійної і нелінійної фільтрації в дискретному часі, статистична теорія прийняття рішень і статистичного моделювання на ЕОМ.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, виконується розпізнавання виду його маневру і оцінювання помилки вимірювання опорного датчика, що дозволяє реалізувати послідовну обробку вимірювань, які надходять, і уникнути обернення матриць великих розмірностей.

2. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі, в якому, на відміну від існуючих, оцінюється невідома потужність передавача, виконується розпізнавання виду його маневру і враховується дисперсія помилок вимірювання потужності датчиками мережі, що дозволяє його використовувати для визначення місцеположення БПЛА невідомого типу.

3. Вперше розроблено метод адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА, в якому, на відміну від існуючих, виконується комплексна обробка TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі при

невідомої потужності передавача, що дозволяє підвищити точність визначення його місцеположення в порівнянні з їх роздільною обробкою.

Практичне значення отриманих результатів.

1. Розроблені адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2 – 4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі, дозволяє зменшити СКВ цієї помилки додатково в 2 – 5 рази.

2. Адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короткочасних маневрів БПЛА на 15 – 40 %.

3. Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно на колі, забезпечує вид ізоліній кругового СКВ місцеположення в горизонтальній площині також у вигляді кіл і може бути рекомендована, якщо напрямок появи БПЛА невідомий.

4. Розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі забезпечують точності характеристики близькі до потенційно можливим, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера.

5. Розроблені алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневрового БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, а також при їх комплексному використанні не вимагають значних обчислювальних витрат і можуть бути реалізовані на сучасному процесорі DSP TMS320C6747 в реальному масштабі часу.

Особистий внесок.

Основні теоретичні положення і результати моделювання в дисертаційній роботі отримані автором самостійно. У співавторстві з науковим керівником сформульовані мета і завдання досліджень, висновки. Особистий внесок автора в наукових працях, опублікованих у співавторстві, такий: в [1], [3] розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення джерел радіовипромінювання на основі RSS- і TDOA-вимірювань; в [2], [5] синтезовані оптимальні і квазіоптимальні адаптивні алгоритми оцінювання параметрів руху БПЛА на основі RSS-вимірювань, а також при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань; в [4] розроблено рекурентний алгоритм оцінювання параметрів руху БПЛА при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертації та основні положення, отримані в роботі, представлялися на: міжнародних науково-технічних конференціях «Радіотехнічні поля, сигнали та системи» (м. Київ, 2016, 2017, 2018); X, XI Міжнародних Науково-технічних Конференціях «ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ» (м. Київ, 2016, 2017, 2018); X науково-технічній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в XXI столітті» (м. Київ, 2016); IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON) (Kyiv, Ukraine, 2017); The International Emergency Management Society, Special Edition (Belgium, 2017); TCSET-2018: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Lviv-Slavske, Ukraine, 2018).

Публікації. За результатами дисертаційної роботи опубліковано 16 наукових робіт, в тому числі 5 статей в провідних фахових виданнях, з яких 2 у виданнях України включених до міжнародної наукометричної бази WEB OF SCIENCE та 2 в іноземних виданнях, які включені до міжнародної наукометричної бази SCOPUS, 11 тез доповідей.

Структура і обсяг дисертації.

Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел, одного додатку. Робота містить 169 сторінки, в тому числі 163 сторінок основного тексту, 92 рисунка, 3 таблиці. Список використаної літератури включає 87 найменувань. Додатки розміщено на 6 сторінках.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ І ПАРАМЕТРІВ РУХУ БПЛА

1.1 Актуальність задачі визначення параметрів руху БПЛА на основі даних сенсорної мережі

Останнім часом стрімкий розвиток отримує безпілотна авіація. Розробка безпілотних авіаційних комплексів на основі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) проводиться практично всіма індустріально розвиненими країнами світу. За сучасним визначенням, БПЛА є апарат, який знаходиться під постійним дистанційним контролем пілота або пілотів і призначений для повернення на аеродром та для подальшого повторного використання (рис.1.1) [1].



Рис. 1.1 Безпілотний літальний апарат

БПЛА розрізняються за розміром, продуктивністю і типом. У таблиці 1.1 наведені типи безпілотних літальних апаратів за вагою.

Внаслідок зменшення масогабаритних характеристик навігаційного і оптико-електронних приладів, велика кількість завдань вирішується БПЛА злітною масою до 5 кг (клас «мікро» (μ) відповідно до міжнародної класифікації UVS International). БПЛА цього класу мають такі характерні риси: дальність дії до 10 км, максимальна злітна маса до 5 кг, переважна більшість БПЛА даного класу не піднімається більш ніж на 150 м над землею. Повітряний простір на цій висоті використовується в основному для польотів планерів і легкомоторної авіації.

Основними аргументами поширення БПЛА класу (μ) стали мінімальна вартість, висока мобільність і здатність до передачі фото-відеоінформації в реальному масштабі часу. Висока мобільність забезпечується малими геометричними розмірами і масою, що дозволяє транспортувати БПЛА до місця запуску в невеликих транспортних контейнерах і виконувати швидкий старт протягом 10 ... 25 хв після збору БПЛА в льотну конфігурацію.

Таблиця 1.1

Тип БПЛА	Поточний і потенційний вид використання
Мікро, масою до 5 кг.	Поточне використання: дозвілля і комерційне використання (наприклад спостереження, контроль, фотографія).
Малі, масою до 25 кг.	Поточне використання: дозвілля і комерційне використання (наприклад спостереження, контроль, фотографія).
Легкі, масою від 25 до 150 кг.	Поточне використання: просторова зйомка з широкою зоною спостереження. Потенційне використання: огляд трубопроводів, силових кабелів, оприскування зернових культур, пошуково-рятувальні роботи, контроль кордонів, моніторинг лісових пожеж.
Великі, масою більше 150 кг.	Поточне використання – у військовій і оборонній сфері. Потенційне використання – для перевезення вантажів і пасажирів.

В даний час БПЛА класу (μ), використовуються для вирішення широкого кола завдань [2, 3]:

- силовими відомствами: забезпечення масових заходів; запобігання терористичних актів; контроль акцій протесту; операції по боротьбі з організованою злочинністю; операції по затриманню злочинців; розшук зниклих людей; підтримка оперативного зв'язку; охорона державного кордону, і т.д;

- МНС: забезпечення рятувальних операцій; гірничо-рятувальні операції, включаючи наслідки лавин і селів; моніторинг радіаційної, біологічної та

хімічної обстановки; боротьба з лісовими пожежами (моніторинг, виявлення), і т.д;

- відомчою охороною: контроль периметрів; охорона критично важливих об'єктів та інфраструктур; охорона матеріальних цінностей і виробничих потужностей; охорона кабельних ліній і ЛЕП, вітряних і сонячних електростанцій; охорона нафтогазових родовищ і трубопроводів і т.д.

З іншого боку, доступність і масове використання БПЛА призвело до появи нового класу загроз [3-10]:

- **Загроза падіння.** При падінні може бути завдано істотної шкоди як людині, так і власності.

- **Загроза для повітряного транспорту.** Польоти БПЛА в районах розташування аеродромів становлять небезпеку для літаків, які здійснюють зліт і посадку.

- **Умовна анонімність.** Після того, як БПЛА піднявся в повітря, визначити власника БПЛА стає складно. Особливо, з огляду на той факт, що керувати ним можна без візуального контакту. Звідси впливає безліч можливостей вчинення протиправних дій – від фотозйомки засекречених об'єктів до контрабанди.

- **Вторгнення в приватне життя.** БПЛА дозволяє стежити за приватними особами і порушувати границі приватної власності.

- **Можливість терактів.** Існує різноманітні способи вчинення терактів з використанням БПЛА.

- **Небезпека батарей при перевезенні.** У БПЛА використовуються в основному літій-іонні акумулятори, які при ударі здатні загорятися.

Це призводить до необхідності розробки систем, які вирішують завдання виявлення, визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА.

На сьогоднішній день повітряна безпека такого роду забезпечується системами, які носять комплексний характер і використовують підсистеми, що працюють в різних діапазонах частот на принципах акустичного, оптичного, активного і пасивного радіочастотного виявлення [11-17].

Розвиток технологій бездротового зв'язку і мікроелектроніки дозволило розробити недорогі, малопотужні, багатофункціональні і високоінтегровані сенсорні вузли, які можуть здійснювати зв'язок в бездротовому режимі ad-hoc на коротких відстанях [18]. Бездротові ad-hoc-мережі – це мережі, які не мають постійної структури, в яких клієнтські пристрої з'єднуються «на льоту», утворюючи собою мережу. Ці мініатюрні вузли (бездротові датчики – рис.1.2) зазвичай складаються з сенсора, пристроя для обробки, невеликого обсягу пам'яті, акумулятора і радіоприйомопередатчика для зв'язку, які призначені для створення бездротової сенсорної мережі (БСМ) [19-22].

Бездротові датчики мають значні переваги в порівнянні зі звичайними дротяними датчиками. Вони можуть не тільки знизити вартість і затримку в розгортанні, але і застосовуватися в будь-якому середовищі, особливо в тих випадках, коли звичайні провідні сенсорні мережі неможливо розгорнути, наприклад, важкодоступна місцевість, поле бою, або глибини океанів.

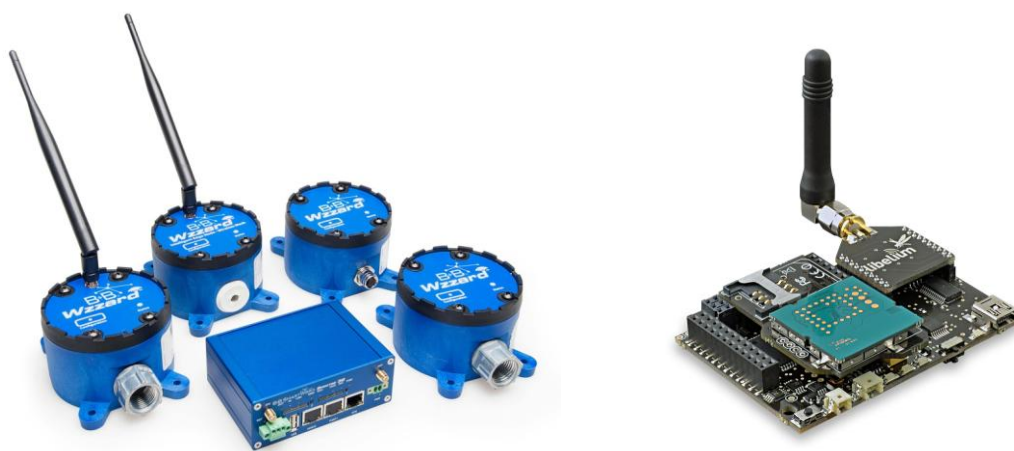


Рис. 1.2. Бездротові датчики

Останні досягнення в області бездротових сенсорних мереж відкривають нові можливості при вирішенні задач визначення місцеположення джерел радіовипромінювання (ДРВ). Дане завдання має широкий спектр додатків, таких як [23,24]: аварійно-рятувальні операції, системи оборони і забезпечення безпеки, автономне спостереження і моніторинг промислових процесів і навколишнього середовища (моніторинг тваринного світу),

контроль і управління рухомими об'єктами, контроль персоналу і ін. При виконанні аварійно-рятувальних операцій БСМ забезпечує можливість визначення місцеположення членів рятувальних команд (наприклад, пожежної команди), а також технічних засобів (наприклад, роботів), що полегшує досягнення поставлених цілей. Однією з важливих особливостей БСМ є можливість отримання інформації про місцезнаходження рухомих об'єктів (цілей), в тому числі і БПЛА.

Протягом останніх років було розроблено ряд методів для оцінки місцеположення невідомого БПЛА за допомогою БСМ [25]:

RSS (Received Signal Strength) – відстань до об'єкта оцінюється за потужністю (рівню) сигналу. Даний метод добре працює на малих відстанях, але при збільшенні дальності дає велику помилку за рахунок специфіки поширення радіосигналу;

AoA (Angle of Arrival) – місцезнаходження об'єкта визначається в межах площі трикутника, утвореного перетином осей діаграм спрямованості антен секторів трьох базових станцій;

ToA (Time of Arrival) – вимір часу проходження сигналу від об'єкту до базової станції, при якому відстань до об'єкта розраховується виходячи з різниці часу відправки сигналу і його отримання. При цьому даний спосіб вимагає суворої синхронізації часу як у відправника так і в одержувача, чого досягти досить складно.

TDoA (Time Difference of Arrival) – проводиться вимір різниці часу приходу сигналу від мобільного пристрою до декількох базових станцій. Так само як і при попередньому способі, потрібна сувора синхронізація часу, але тільки на базових станціях, до мобільного пристрою таких вимог не висувають.

Із запропонованих методів найбільшого поширення для визначення координат невідомого джерела радіовипромінювання знаходять TDOA і RSS методи [26-38].

На сьогоднішній день розроблено ряд сенсорів для TDOA- і RSS-вимірювань [39]. Основними характеристиками сенсора для TDOA-вимірювань є точнісні характеристики синхронізації між датчиками сенсорної мережі і вимірювання часу приходу сигналу, для RSS-вимірювань – точність визначення потужності прийнятого сигналу.

Прикладом сенсорів для TDOA- і RSS- вимірювань є високочастотний сенсор N6841A (рис. 1.3) компанії Keysight [40]. Він має широке перекриття по частоті від 20 МГц до 6 ГГц і повністю цифровий тракт проміжної частоти з пропускною здатністю до 20 МГц.

Для TDOA-вимірювань даний сенсор має високоточну синхронізацію вимірів за допомогою GPS < 20 нс (для відкритого простору), за допомогою PTP (протокол точного часу) < 40 нс (всередині приміщення), а також точність оцінки часу приходу сигналу – 18 нс. Для RSS-вимірювань в діапазоні частот від 20 МГц до 5.9 ГГц точність визначення потужності прийнятого сигналу ± 3 дБ, в діапазоні частот 5.9 – 6.0 ГГц – ± 4 дБ.



Рис. 1.3. Високочастотний сенсор N6841A

Більшість сучасних БПЛА використовують для передачі даних Wi-Fi IEEE 802.11 [41]. Інформація передається у вигляді послідовності фреймів (рис. 1.4). Фрейми містять MAC-адреси джерела (Address 2) і одержувача (Address 1), номер фрейма (Sequence Control) в послідовності, тіло фрейма і перевірочну послідовність фрейму для корекції помилок. Це дозволяє розрізняти між собою як БПЛА, так і окремі випромінені ними фрейми.

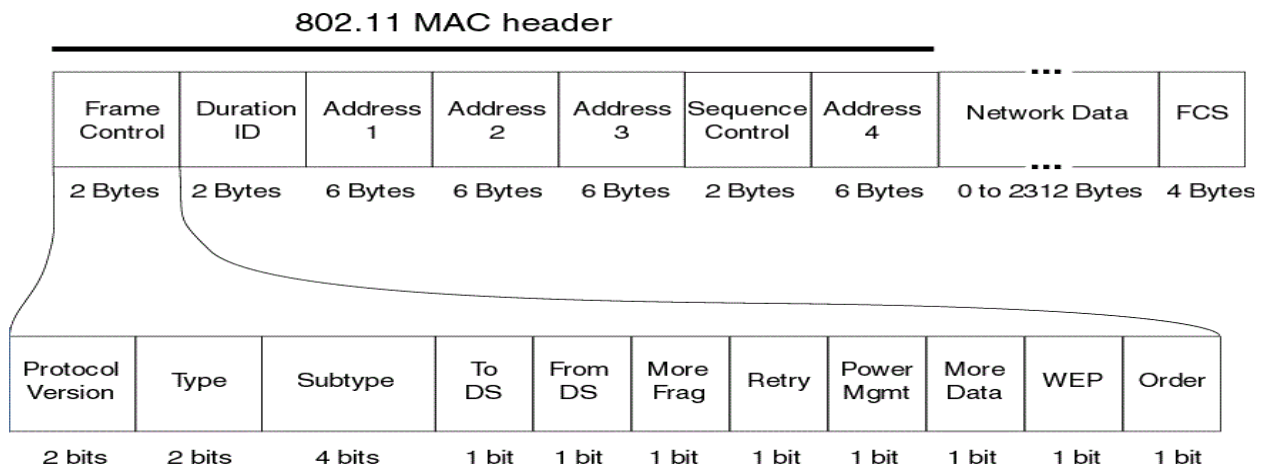


Рис. 1.4. Фрейм Wi-Fi IEEE 802.11

Сучасні БПЛА класу (μ) можуть виконувати рух з різними видами маневрів, що призводить до зниження точності визначення їх місцеположення і параметрів руху, а також ускладнює вирішення завдань протидії БПЛА і їх нейтралізації. Тому, з проведеного аналізу випливає, що важливе практичне значення має завдання підвищення точності визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі.

1.2 Аналіз методів визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань

TDOA метод заснований на різниці часів приходу сигналу від джерела радіовипромінювання (ДРВ, БПЛА) на поточний і опорний датчики – TDOA-вимірювання (рис. 1.5) [26-31]. Місцезнаходження джерела радіовипромінювання в просторі визначається як точка перетину трьох гіпербол. Отримання TDOA-вимірювань за допомогою сенсорної мережі зводиться до розстановки датчиків сенсорної мережі, які мають координати $(x_s, y_s), s = \overline{0, S}$. Положення БПЛА характеризується точкою з координатами (x, y) .

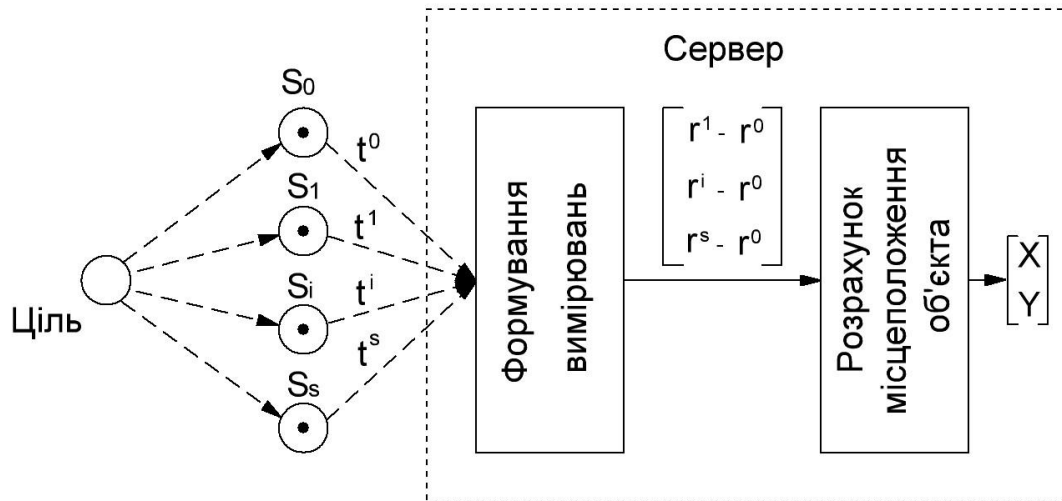


Рис. 1.5. Принцип роботи TDOA методу

При визначенні координат БПЛА на площині, сенсорна мережа повинна складатися не менше ніж з чотирьох датчиків за допомогою яких отримуємо три різниці відстаней. На рис. 1.6 показані структурні схеми сенсорних мереж на площині, що складаються з дев'яти $S = 8$ і чотирьох $S = 3$ датчиків.

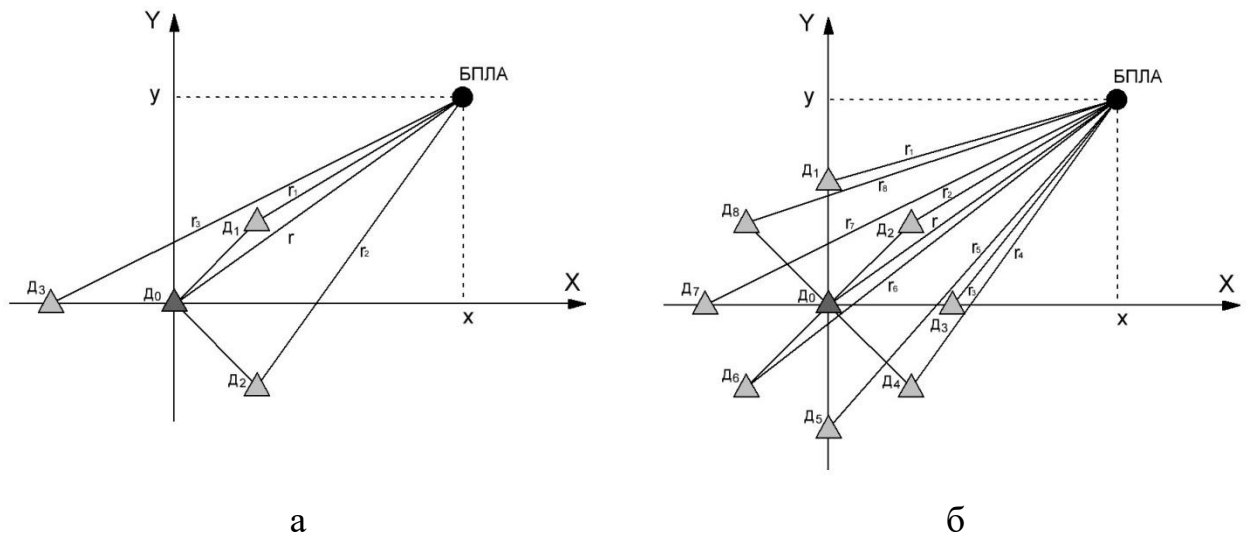


Рис. 1.6. Конфігурація сенсорної мережі з: а – 4 датчиків; б – 9 датчиків.

TDOA-вимірювання являють собою різницю часів прийому сигналів між датчиками $s = \overline{1, S}$ і опорним датчиком

$$\tau^s = t^s - t^0 + v^s - v^0, s = \overline{1, S}, \quad (1.1)$$

де t^s – час прийому сигналу s -м датчиком; t^0 – час прийому сигналу опорним датчиком; v^s – некорельована похибка вимірювань часу прийому сигналу s -м датчиком з дисперсією σ_{Δ}^2 , $s = \overline{0, S}$.

В результаті перетворень виразу (1.1), рівняння TDOA для мережі можна представити у вигляді

$$\Delta^s = c(t^s + v^s - t) - c(t^0 + v^0 - t) = r^s - r^0 + v^s - v^0 = r^s - r^0 + v^{s0}, \quad s = \overline{1, S}, \quad (1.2)$$

де r^s – відстань між s -м датчиком і БПЛА $s = \overline{1, S}$; r^0 – відстань між опорним датчиком і БПЛА; Δ^s – виміряна різниця відстаней $s = \overline{1, S}$; c – швидкість поширення електромагнітних хвиль; t – момент випромінювання сигналу БПЛА; v^{s0} – помилка вимірювань різниці відстаней

$$v^{s0} = v^s - v^0, \quad s = \overline{1, S}; \quad (1.3)$$

v^s – випадкові некорельовані величини, які мають значення помилок вимірювання відстаней між БПЛА і датчиками мережі з дисперсією $\sigma_{\Delta}^2 = c^2 \sigma^2$.

Різниця відстаней $r^s - r^0$ визначається за формулою

$$r^s - r^0 = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} - \sqrt{x^2 + y^2} \quad (1.4)$$

У виразі (1.4), координати опорного датчика вважалися нульовими.

Помилки вимірювання різниці відстаней v^{s0} , $s = \overline{1, S}$ є корельованими, оскільки вони містять в якості складової помилку вимірювання опорного датчика v^0 .

TDOA метод об'єднує групу методів для визначення місцеположення БПЛА. Метод сферичної інтерполяції (Spherical Interpolation - SI) запропонували Абель і Сміт [42, 43]. Метод складається з двох ітерацій. Спочатку отримують оцінку координат, яка лінійно залежить від відстані до

джерела, і підставляють її в початковий функціонал. Повторно вирішують задачу лінійної оптимізації та знаходять цю відстань. Паралельно вони узагальнюють метод сферичного перетину (Spherical Intersection - SX), що відрізняється другою ітерацією: рішення, отримане на першій ітерації, підставляють в квадратичний зв'язок і вирішують квадратне рівняння відносно відстані до джерела [43]. Чисельні тести показали, що в різних конфігураціях мережі датчиків обидва рішення поведуть себе по-різному.

Чан і Хо [44] представили алгоритм квадратичної корекції (Quadratic-Correction Least-Squares - QCLS). Він також складається з двох ітерацій: з координат джерела і відстані до джерела складають розширений вектор невідомих величин. Вважаючи його компоненти незалежними, на першій ітерації отримують рішення за критерієм максимальної правдоподібності. На другій ітерації воно коригується з урахуванням квадратичного зв'язку. Пізніше, в [45] перша ітерація Чана і Хо оформляється в окремий метод. Доводиться його еквівалентність методу сферичної інтерполяції Абеля і Сміта. Відносну ефективність алгоритму квадратичної корекції в різних конфігураціях мережі підтвердили чисельні тести.

Метод Хуанга, Бенести і Елко [46, 47], які формулюють рішення задачі лінійної оптимізації з квадратичним зв'язком за допомогою методу множників Лагранжа - алгоритм лінійної корекції (Linear-Correction Least-Squares - LCLS), що не залежить від статистичних властивостей помилок вимірювань.

Розглянемо найбільш відомий метод визначення місцеположення БПЛА, який зводиться до розрахунку системи рівнянь за допомогою методу найменших квадратів (МНК)

$$\begin{cases} x \cdot x_1 + y \cdot y_1 + \Delta^1 \cdot r^0 = 0.5(x_1 + y_1 - (\Delta^1)^2) \\ x \cdot x_2 + y \cdot y_2 + \Delta^2 \cdot r^0 = 0.5(x_2 + y_2 - (\Delta^2)^2) \\ \dots \\ x \cdot x_s + y \cdot y_s + \Delta^s \cdot r^0 = 0.5(x_s + y_s - (\Delta^s)^2) \end{cases} \quad (1.5)$$

Надалі систему рівнянь зручно переписати в матричній формі:

$$\omega = 0.5 \left(A^T \Sigma^{-1} A \right)^{-1} A^T \Sigma^{-1} b, \quad (1.6)$$

де $\omega^T = (x, y, r^0)$ – вектор, що включає оцінки координат БПЛА;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & \Delta^{10} \\ x_2 & y_2 & \Delta^{20} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_s & y_s & \Delta^{s0} \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 - (\Delta^{10})^2 \\ x_2 + y_2 - (\Delta^{20})^2 \\ \dots \\ x_s + y_s - (\Delta^{s0})^2 \end{bmatrix};$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 2\sigma_{\Delta}^2 & \sigma_{\Delta}^2 & \sigma_{\Delta}^2 \\ \sigma_{\Delta}^2 & 2\sigma_{\Delta}^2 & \sigma_{\Delta}^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{\Delta}^2 & \sigma_{\Delta}^2 & \dots & 2\sigma_{\Delta}^2 \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця помилки оцінки вектора ω визначається за допомогою виразу

$$\Omega = \left(\left(\bar{A}^0 \right)^T H^{-1} \bar{A}^0 \right)^{-1}, \quad (1.7)$$

де H – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B; \quad B = \text{diag}\{\hat{r}^1, \hat{r}^2, \dots, \hat{r}^s\}; \quad \hat{r}^s = \sqrt{(\hat{x}_0 - x_s)^2 + (\hat{y}_0 - y_s)^2}; s = \overline{1, S}.$$

Проведено аналіз ефективності трьох алгоритмів визначення координат БПЛА на основі TDOA-вимірювань: сферичного перетину, сферичної інтерполяції, квадратичної корекції [48,49]. Як показник ефективності використовувалося кругове СКВ $\hat{\sigma} = \sqrt{\text{tr}(\hat{R})}$, де \hat{R} – кореляційна матриця похибки оцінки визначення координат БПЛА.

Моделювання кожного алгоритму проведення для двох конфігурацій сенсорної мережі: перша складається з чотирьох датчиків (рис 1.6 а), де $D_0(0;0)$, $D_1(70.71; 70.71)$, $D_3(0;-100)$, $D_4(-70.71; 70.71)$; друга з дев'яти датчиків (рис. 1.6 б) - $D_0(0;0)$, $D_1(0;100)$, $D_2(70.71; 70.71)$, $D_3(100;0)$, $D_4(70.71;-$

70.71), D_5 (0;-100), D_6 (-70.71;-70.71), D_7 (-100;0), D_8 (-70.71; 70.71) і БПЛА знаходиться на колі з радіусом 100 м відносно опорного датчика D_0 . СКВ похибки вимірювання датчиків $\sigma_{\Delta} = 1$ м.

На рис. 1.7 і рис. 1.8 показані отримані алгоритмом сферичного перетину фактичне кругове СКВ $\hat{\sigma}_{SX}^{MK}$ (крива 1) помилки оцінки місцеположення БПЛА, отримане методом Монте-Карло. Воно має великі значення, обумовлені помилками у визначенні кореня квадратичного рівняння. Для першої конфігурації сенсорної мережі воно коливається в межах від 25 до 180 м (рис. 1.7), для другої конфігурації сенсорної мережі – 100 до 160 м (рис. 1.8). Теоретичне значення СКВ $\hat{\sigma}_{SX}$ для даного методу не розраховується.

Алгоритм сферичної інтерполяції: фактичне кругове СКВ $\hat{\sigma}_{SI}^{MK}$ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА, а також теоретичне СКВ $\hat{\sigma}_{SI}$ (крива 3), яке отримано аналітично, показані на рис. 1.7 і рис. 1.8. Значення фактичного СКВ коливається відносно його теоретичного. СКВ $\hat{\sigma}_{SI}^{MK}$ приймає значення: для першої конфігурації сенсорної мережі в межах від 30 до 60 м (рис. 1.7), для другої конфігурації сенсорної мережі – 17 до 19 м (рис. 1.8).

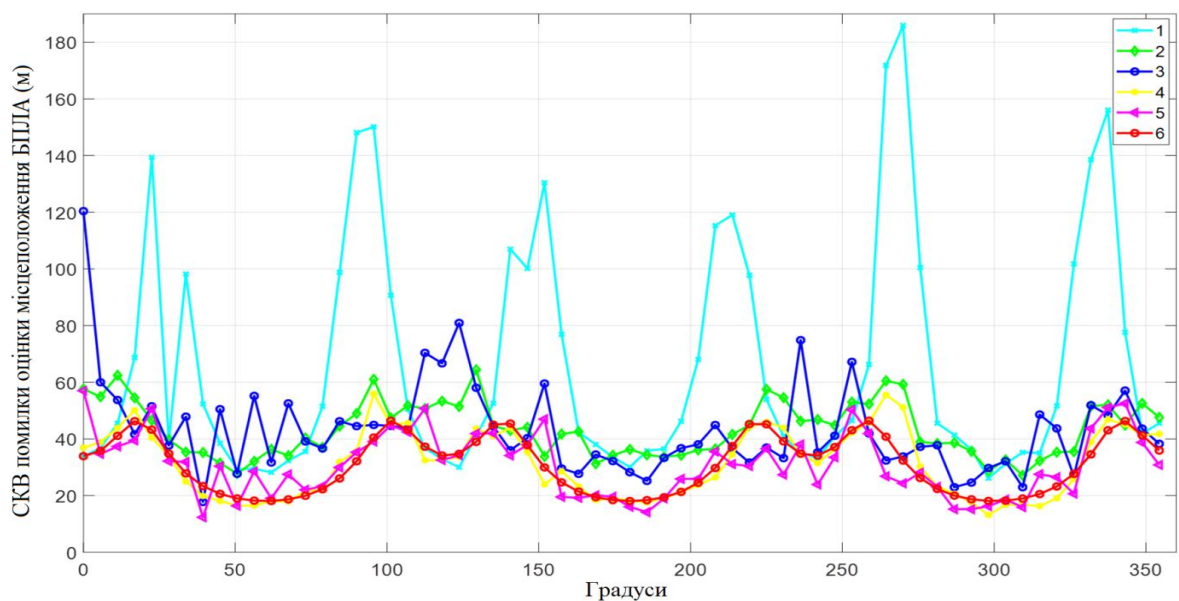


Рис. 1.7. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для сенсорної мережі з 4 датчиків.

Алгоритм квадратичної корекції: фактичне кругове СКВ $\hat{\sigma}_{LCLS}^{MK}$ (крива 4) помилки оцінки місцеположення БПЛА, а також теоретичне СКВ $\hat{\sigma}_{LCLS}$ (крива 5), яке отримано аналітично, показані на рис. 1.7 і рис. 1.8. Значення фактичного СКВ, також коливається відносно його теоретичного. СКВ $\hat{\sigma}_{LCLS}^{MK}$ приймає значення: для першої конфігурації сенсорної мережі в межах від 19 до 49 м (рис. 1.7), для другої конфігурації сенсорної мережі – 17 до 19 м (рис. 1.8).

Також на рис. 1.7 і рис. 1.8 (крива 6) показано СКВ $\hat{\sigma}_{НГРК}$, яке відповідає нижньої границі Рао-Крамера (НГРК), яка характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА.

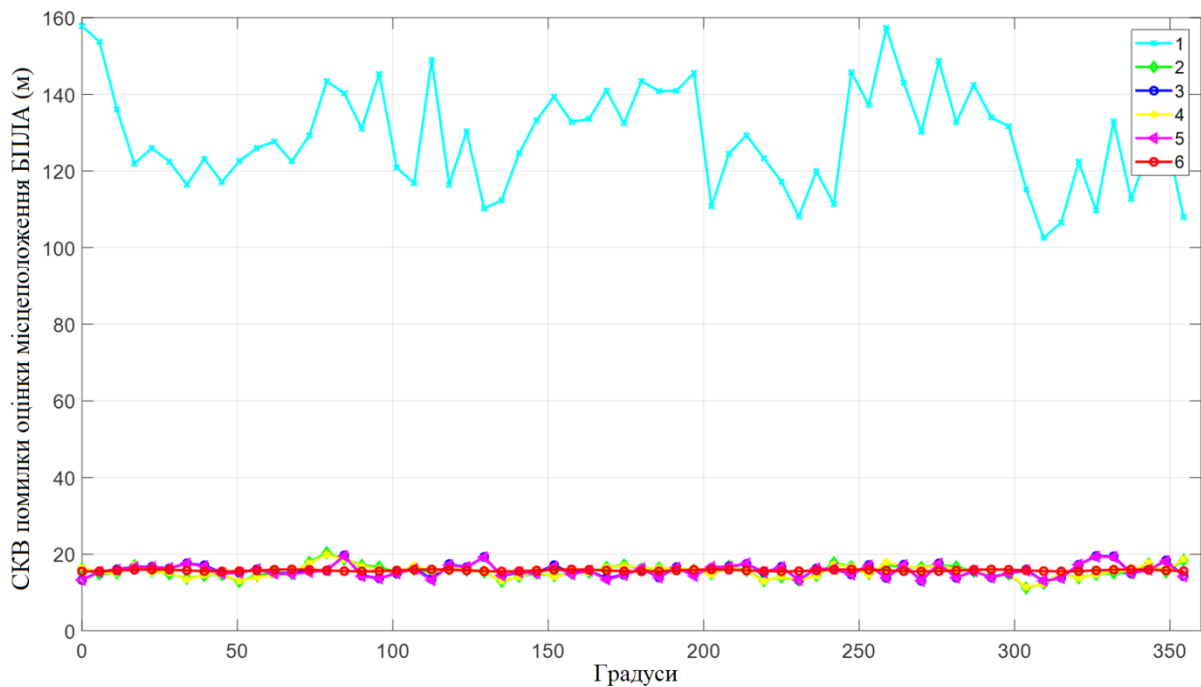


Рис. 1.8. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для сенсорної мережі з 9 датчиків.

Як впливає з проведеного аналізу, відомі методи визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань, базуються на математичних методах максимальної правдоподібності та найменших квадратів. При цьому обчислення координат БПЛА виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків. При значному числі датчиків БСМ, представляє інтерес розробки методу, який після формування початкових умов на основі вимірів часу прийому сигналів від мінімального

числа датчиків, дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження TDOA-вимірювань від інших датчиків.

1.3 Аналіз методів визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань

Для пасивного визначення місцеположення БПЛА в сенсорних мережах використовується метод RSS (received-signal strength) [32-34]. Він об'єднує групу процедур, відмінною рисою яких є застосування для визначення місцеположення БПЛА вимірних значень потужності прийнятого сигналу – RSS-вимірювання (рис. 1.9). Результат цього виміру можна вивести, відкалібрувати за відомою відстанню, і на його основі оцінити дальність до джерела випромінювання. У сучасних системах на рівні інтерфейсу API (Application Programming Interface), доступна інформація про вимірювання потужності прийнятого сигналу. Так, наприклад, будь-який бездротовий канал по стандарту IEEE 802.15.4 [50] має протокольну функцію оцінки якості зв'язку (Link Quality Indicator), яка визначає потужність прийнятого сигналу.

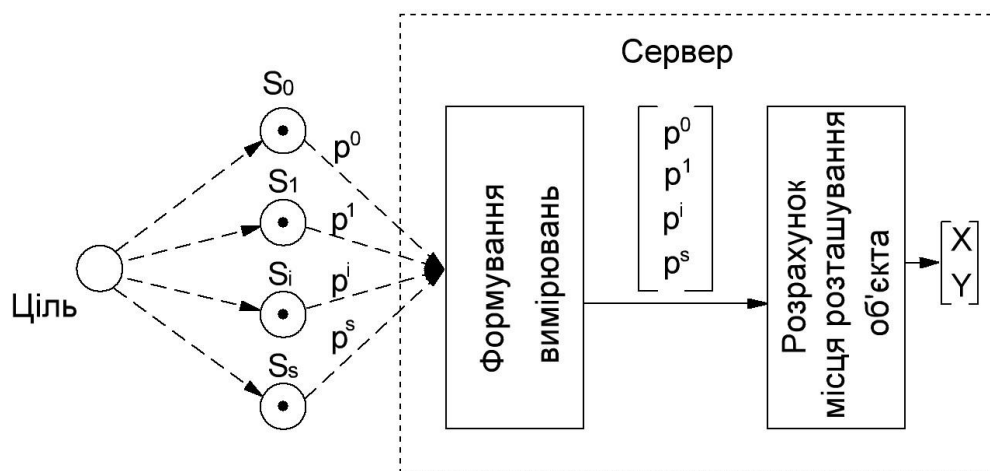


Рис. 1.9. Принцип роботи RSS методу

Точність визначення координат БПЛА на основі RSS-вимірювань залежить від помилок вимірювання потужності сигналів датчиками сенсорної мережі, які, як правило, є некорельованими. Також точність методу в значній

мірі залежить від адекватності використовуваної моделі розповсюдження сигналу в радіоканалі.

У роботах [37, 38], отримані різновиди методу RSS, в яких після обчислення дальностей на основі вимірних значень потужності прийнятих сигналів, для визначення місцеположення БПЛА використовуються різницево-daleкомірний (TDOA) і daleкомірний (TOA) методи. При цьому оцінки місцеположення БПЛА визначаються за критерієм найменших квадратів.

Датчики сенсорної мережі мають координати $(x_s, y_s), s = \overline{1, S}$. Положення БПЛА характеризується точкою з координатами (x, y) . При визначенні координат БПЛА на площині сенсорна мережа повинна складатися не менше, ніж з трьох датчиків. На рис. 1.10 показані структурні схеми сенсорних мереж на площині, що складаються з восьми $S = 8$ і трьох $S = 3$ датчиків.

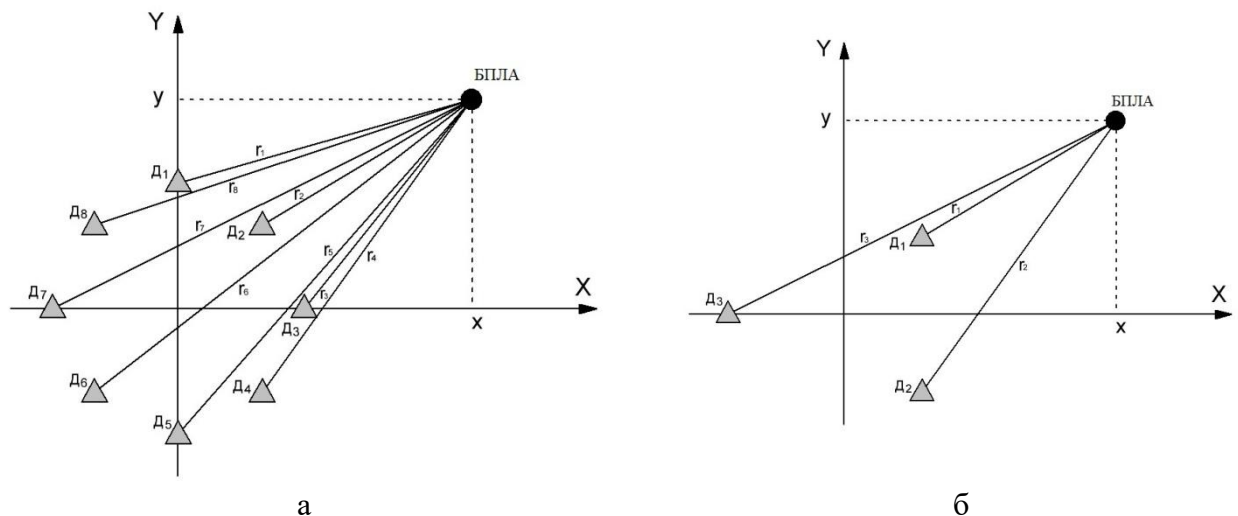


Рис. 1.10. Конфігурація сенсорної мережі з: а – 8 датчиків; б – 3 датчиків.

Алгоритми локального визначення місцеположення на основі RSS-вимірювань, моделюють, як поширення сигналу від передавача до приймача, на основі чого визначається залежність потужності від відстані об'єкт-приймач. Найпростішою моделю є модель прямого поширення, що враховує тільки згасання сигналу:

$$p^s = p_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left(\frac{r^s}{r_0} \right) + v^s \quad (1.8)$$

де p^s – RSS-вимірювання, виміряна s -м датчиком потужність сигналу БПЛА, що знаходяться на відстані $r^s, s = \overline{1, S}$; p_0 – потужність сигналу на заданій відстані r_0 ; a – коефіцієнт згасання сигналу (близький до 2); v^s – помилка вимірювання потужності прийнятого сигналу.

Місцеположення БПЛА визначаються на основі методу найменших квадратів при наявності трьох вимірювань потужності сигналу за допомогою системи рівнянь

$$\begin{cases} x \cdot x_1 + y \cdot y_1 - 0.5 = 0.5(x_s + y_s - 10^{\frac{p_0 - p^1}{5 \cdot a}}) \\ x \cdot x_2 + y \cdot y_2 - 0.5 = 0.5(x_s + y_s - 10^{\frac{p_0 - p^2}{5 \cdot a}}) \\ \dots \\ x \cdot x_s + y \cdot y_s - 0.5 = 0.5(x_s + y_s - 10^{\frac{p_0 - p^s}{5 \cdot a}}) \end{cases} \quad (1.9)$$

В подальшому систему рівнянь також перепишемо до матричної форми:

$$\omega = 0.5(A^T A)^{-1} A^T b, \quad (1.10)$$

де $\omega^T = (x, y, R)$ – вектор, що включає оцінки координат БПЛА;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & -0.5 \\ \dots & \dots & \dots \\ x_s & y_s & -0.5 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 - 10^{\frac{p_0 - p^1}{5 \cdot a}} \\ x_2 + y_2 - 10^{\frac{p_0 - p^2}{5 \cdot a}} \\ \dots \\ x_s + y_s - 10^{\frac{p_0 - p^s}{5 \cdot a}} \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця помилки оцінки вектора ω визначається за допомогою виразу

$$\Omega = \left(\left(\bar{A}^0 \right)^T H^{-1} \bar{A}^0 \right)^{-1}, \quad (1.11)$$

де H – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B; \quad B = \text{diag}\{\hat{r}^1, \hat{r}^2, \dots, \hat{r}^s\}; \quad \Sigma = \text{diag}\{\sigma_{r^1}^2, \sigma_{r^2}^2, \dots, \sigma_{r^s}^2\};$$

$\sigma_{r^s}^2, s = \overline{1, S}$ – дисперсія вимірювання дальності s -м датчиком, що обчислюється за допомогою виразів

$$\sigma_{r^s}^2 = \frac{\left(r_{\max}^s - r_{\min}^s \right)^2}{12}; \quad r_{\max}^s = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^s}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{2 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}}; \quad r_{\min}^s = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^s}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{-2 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}}.$$

Як випливає з проведеного аналізу, відомі методи визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювання, базуються на математичному методі найменших квадратів. При цьому в них не враховується дисперсія помилок вимірювання потужності, а обчислення координат БПЛА виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків. При значному числі датчиків БПЛА представляє інтерес розробки методу, який після формування початкових умов на основі вимірювання потужності сигналів від мінімального числа датчиків, дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження RSS-вимірювань від інших датчиків і враховує дисперсію помилок вимірювання потужності.

1.4 Аналіз методу калмановської фільтрації параметрів руху цілі

Розглянуті в підрозділах 1.2 і 1.3 TDOA і RSS методи спрямовані на вирішення завдання визначення місцеположення ДРВ. БПЛА є рухомими об'єктами. Тому найбільш повна інформація про його місцезположення і параметри руху може бути отримана на основі алгоритмів траєкторної фільтрації. В даний час для вирішення цього завдання широко використовується дискретна калмановської фільтрація [51,52].

Дискретна модель руху цілі описується рівнянням

$$u(k) = F(k, k-1)u(k-1) + G(k)\omega(k), \quad (1.12)$$

де $u(k)$ – вектор стану, компонентами якого є параметри руху цілі; $\omega(k)$ – шум збудження моделі, є некорельованою послідовністю гаусівських векторів з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею; $F(k, k-1)$ – матриця переходу; $G(k)$ – відома матриця.

Рівняння спостереження, яке описує процес вимірювання координат цілі, має вид

$$u_{\text{И}}(k) = H(k)u(k) + v(k), \quad (1.13)$$

де $u_{\text{И}}(k)$ – вектор спостереження, компонентами якого є параметри руху цілі, які вимірюються; $v(k)$ – вектор помилки вимірювання параметрів руху цілі, є некорельованою послідовністю гаусівських векторів з нульовим математичним очікуванням і кореляційною матрицею $R(k)$; $H(k)$ – матриця спостереження.

Дискретний фільтр Калмана, який синтезується по рівнянням (1.12), (1.13), описується виразами [53,54]

$$u^*(k) = F(k, k-1)\hat{u}(k-1); \quad (1.14)$$

$$\hat{u}(k) = u^*(k) + K(k)(u_{\text{И}}(k) - H(k)u^*(k)), \quad (1.15)$$

де $u^*(k)$, $\hat{u}(k)$ – вектори прогнозу і оцінки параметрів руху цілі в момент часу k ; $K(k)$ – коефіцієнт підсилення фільтра Калмана, який визначається шляхом рішення рекурентних рівнянь

$$P^*(k) = F(k, k-1)\hat{P}(k-1)F^T(k, k-1) + G(k)Q(k)G^T(k); \quad (1.16)$$

$$K(k) = P^*(k)H^T(k)(H(k)P^*(k)H^T(k) + R(k))^{-1}; \quad (1.17)$$

$$\hat{P}(k) = P^*(k) - K(k)H(k)P^*(k), \quad (1.18)$$

де $P^*(k)$ – кореляційна матриця помилки прогнозу $\Delta u^*(k) = u^*(k) - u(k)$; $\hat{P}(k)$ – кореляційна матриця помилки оцінки $\Delta \hat{u}(k) = \hat{u}(k) - u(k)$.

Початкова умова має вид $\hat{u}(0) = \bar{x}(0), \hat{P}(0) = \bar{P}(0)$.

Структурна схема фільтра Калмана показана на рис. 1.11. Вектор стану системи $u(k)$, що містить параметри руху цілі, моделюється у вигляді випадкового процесу, одержаного шляхом пропускання білого гаусівського шуму $\omega(k)$ через лінійний фільтр в загальному випадку з залежними від часу параметрами. Ці параметри визначаються перехідними матрицями системи $F(k, k-1)$ і шумів збудження $G(k)$.

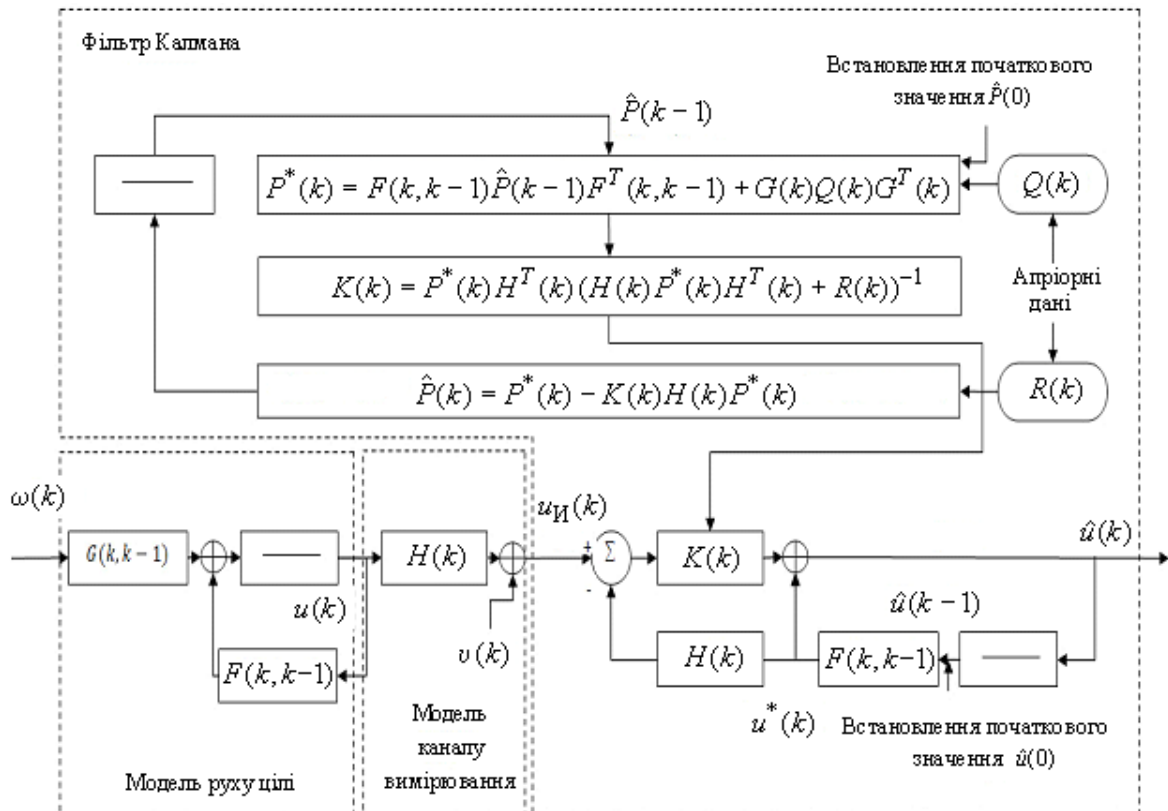


Рис. 1.11. Структурна схема фільтра Калмана

Вектор вимірювання $u_M(k)$ формується шляхом перетворення вектора стану $u(k)$ і адитивного накладення шуму вимірювання $v(k)$.

Робота фільтра починається з установки початкових значень $\hat{u}(0)$ і $\hat{P}(0)$, відомих на основі апіорної інформації, і введення величин елементів кореляційних матриць шумів збудження $Q(k)$ і шумів вимірювання $R(k)$. Оцінки вектора стану $\hat{u}(k)$ обчислюються рекурентно по мірі надходження нових вимірів $u_M(k)$. При цьому, як видно з (1.15), для обчислення поточного

значення оцінки $\hat{u}(k)$ немає необхідності запам'ятовувати всі попередні вимірювання $\{u_{\text{И}}(1), u_{\text{И}}(2), \dots, u_{\text{И}}(k-1)\}$, оскільки вся інформація міститься в оцінці $\hat{u}(k-1)$, яка отримана на попередньому кроці.

Фільтр Калмана є динамічною системою зі змінним матричним коефіцієнтом підсилення $K(k)$, величина якого залежить від точності поточних оцінок і рівня шумів вимірювань. Коефіцієнт підсилення $K(k)$ на кожному кроці k визначається рекурентно на основі рівнянь (1.16)...(1.18). При цьому також визначаються кореляційні матриці помилок прогнозу $P^*(k)$ і оцінки $\hat{P}(k)$, які характеризують точностні характеристики алгоритму фільтрації. Фільтр Калмана можна розглядати як лінійну систему, що стежить, ефективна смуга пропускання якої змінюється в процесі роботи. Поточна оцінка відповідно до формули (1.15) є сумою оцінки екстраполяції $u^*(k)$ і коректуючою поправкою $K(k)(u_{\text{И}}(k) - H(k)u^*(k))$. Екстраполяція параметрів руху цілі виконується на основі виразу (1.14) шляхом множення оцінки фільтрації на попередньому кроці $\hat{u}(k-1)$ на матрицю переходу системи $F(k, k-1)$. Остання описує вільний рух динамічної системи, тобто зміна вектора стану за відсутності зовнішніх впливів на систему. Величина поправки визначається тією вагою $K(k)$, яка додається до нових вимірів на поточному етапі оцінювання. Вага поправки $K(k)$ залежить від рівня шумів вимірювань і поточної точності оцінки, зменшуючись в процесі уточнення оцінок. Так, наприклад, якщо модель системи не містить шумів збудження $\omega(k)$ або ці шуми досить малі, то оптимальний коефіцієнт підсилення $K(k) \rightarrow 0$ при $k \rightarrow \infty$, що фізично означає розмикання системи. В результаті цього фільтр Калмана втрачає чутливість до нових даних і постійно видає оцінку екстраполяції.

Основними перевагами фільтра Калмана [55]:

1. фільтр є рекурентний, зручний для реалізації на ЕОМ, алгоритм обчислення оцінки стану динамічної системи при повністю відомій її моделі;

2. оцінка $\hat{u}(k)$ є лінійною за спостереженням;
3. кореляційна матриця помилок фільтрації $\hat{P}(k)$ внаслідок лінійності фільтра не залежить від спостережень $u_{\text{н}}(k)$ і, отже, може бути обчислена заздалегідь (тому заздалегідь можна обчислити і коефіцієнт підсилення $K(k)$);
4. алгоритми фільтрації легко поширюються на багатовимірний випадок (для багатоканальних систем);
5. оскільки параметри фільтра Калмана змінюються в часі, то такий фільтр мінімізує СКВ помилки фільтрації не тільки в сталому режимі, але і в ході перехідного процесу.

У монографії [56] виконано аналіз можливостей практичної реалізації лінійного фільтра Калмана і показано, що для цього не потрібно більш-менш значних обчислювальних витрат.

Однак разом із зазначеними перевагами, фільтру Калмана притаманний і серйозний недолік, який отримав назву розбіжність, який проявляється в значному перевищенні дисперсії або математичного очікування фактичних помилок оцінювання, дисперсії помилок оцінювання, розрахованих фільтром [56]. Основними причинами розбіжності є: неточності задачі моделей процесу, що підлягають фільтрації, і спостереження, лінеаризація рівнянь, відсутність повної інформації про реальну фізичну задачу, а також всякого роду спрощення, що дозволяють описати математично задачу. Розбіжність можуть викликати також помилки округлення, обумовлені цифровою реалізацією алгоритмів оцінювання.

Як зазначалося в підрозділі 1.1, сучасні БПЛА класу (μ) можуть виконувати рух з різними видами маневрів, які для спостерігача є невідомими. Невідомі також моменти зміни виду руху БПЛА. При відсутності повної апіорної інформації про рух маневруючої цілі, алгоритми траєкторної фільтрації на основі фільтра Калмана часто є розбіжним.

1.5 Аналіз адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючої цілі

Маневром називають раптову зміну характеру руху під впливом випадкових (для некерованого об'єкта) або детермінованих (для керованого об'єкта) сил. Супровід маневруючих цілей є досить складним завданням, оскільки в більшості випадків апіорні знання про характер маневру відсутні.

В даний час розроблено значну кількість алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючої цілі. Їх класифікація приведена на рис. 1.12. В основі побудови адаптивних алгоритмів лежить уявлення моделей руху цілі в вигляді дискретних динамічних систем і використання математичного апарату теорії оптимальної лінійної і нелінійної фільтрації.

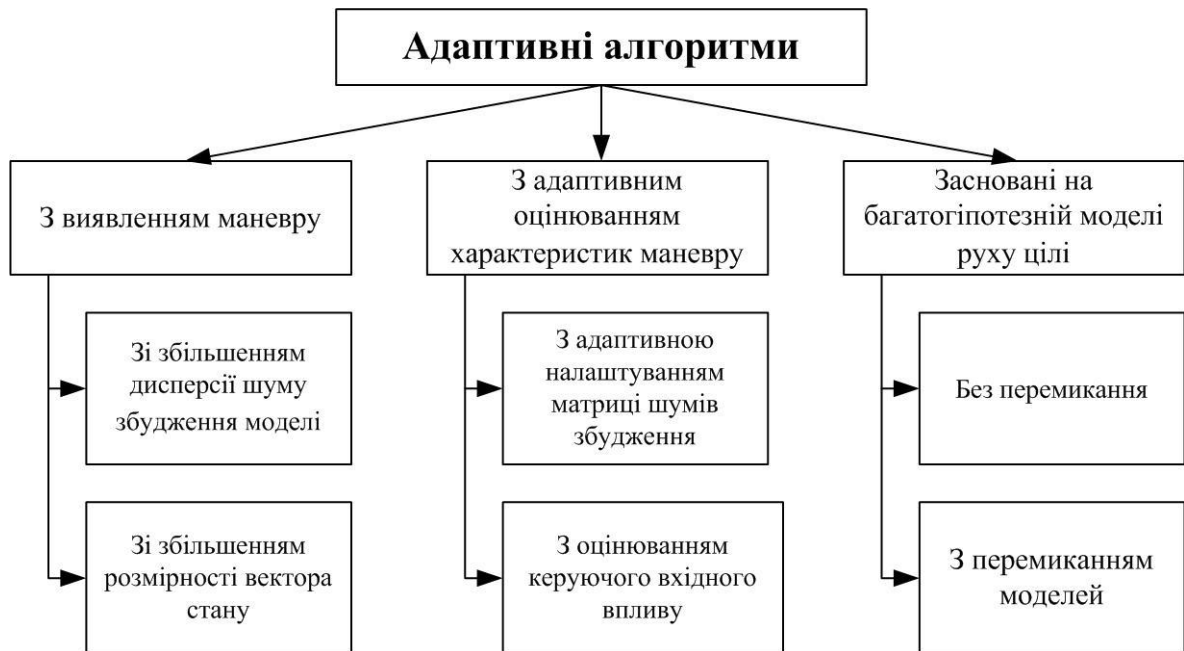


Рис. 1.12. Класифікація адаптивних алгоритмів оцінювання параметрів руху маневруючої цілі

Одними з перших з'явилася група алгоритмів, в яких визначається маневр цілі і відповідно змінюється алгоритм її супроводу. Визначення моменту початку маневру відбувається по зростанню квадратичної форми, побудованої на основі невязки калманівського фільтра. Квадратична форма має χ -квадратичний розподіл з числом ступенів свободи, рівним розмірності вектору виміру. При досягненні значення квадратичної форми обраного порога приймається рішення про виявлення маневру. В алгоритмах зі

збільшенням дисперсії шуму збудження моделі руху цілі, його кореляційна матриця перераховується множенням її елементів на заданий коефіцієнт.

Велику точність оцінювання параметрів руху цілі забезпечують алгоритми зі збільшенням розмірності вектора стану. Даний підхід передбачає розширення вектора стану цілі на етапі маневру включенням в його склад прискорення цілі. Ціль, що не здійснює маневр, описується моделлю з постійною швидкістю, а маневруюча ціль – з постійним прискоренням. На початковому етапі працює перший фільтр, на етапі маневру відбувається перемикання на другий. Зворотне перемикання відбувається після того, коли сума квадратичних форм невязок на ковзаючому вікні обраної довжини, стає менше обраного порога. При цьому приймається рішення про завершення маневру цілі.

Наступну групу складають алгоритми з адаптивним оцінюванням характеристик маневру. Тут необхідно зазначити алгоритми супроводу маневруючої цілі, засновані на адаптивній настройці матриці шумів збудження об'єкта. Однак дані алгоритми не знайшли широкого застосування в силу їх високої складності і низької ефективності, обумовлених нелінійною залежністю оцінюваних параметрів.

Основну групу в даному класі складають алгоритми з оцінюванням керуючого входного впливу. У модель руху цілі вводиться керуючий вплив, який покладають як невідомий і повинен бути оцінений, після чого він використовуються для корекції оцінки вектора стану. Як правило, в таких алгоритмах управління вважається постійним в рамках виділеного часового вікна. Маневр вважається закінченим, коли значення оцінки управління, отриманої по вимірах за допомогою ковзаючого вікна, стає нижче обраного порога. Однак такі алгоритми можуть бути використані, як правило, при високому темпі надходження даних, що обумовлено прийнятою гіпотезою про характер керуючого впливу.

Найбільшого поширення в даний час отримав клас методів заснованих на багатогіпотезній моделі руху цілі. Вони забезпечують більш високі

точностні характеристики оцінювання параметрів руху цілі, а також можуть бути використані при будь-якому темпі надходження даних.

Першими з'явилися адаптивні алгоритми, засновані на багатогіпотезній моделі руху цілі без перемикавання моделей. Вони базуються на методі поділу Лайніотіса [57]. В цьому випадку задається кілька моделей руху і відповідних їм фільтрів, що включаються паралельно. Для кожної моделі розраховується ймовірність оцінки вектора стану відповідним фільтром, а результуюча оцінка знаходиться як математичне очікування одержуваних оцінок з урахуванням їх ймовірностей. Можливість існування моделі на поточному кроці визначається за правилом Байєса. Структурна схема багатогіпотезної моделі руху і непевного оцінювання вектора стану зображена на рис. 1.13 [58].

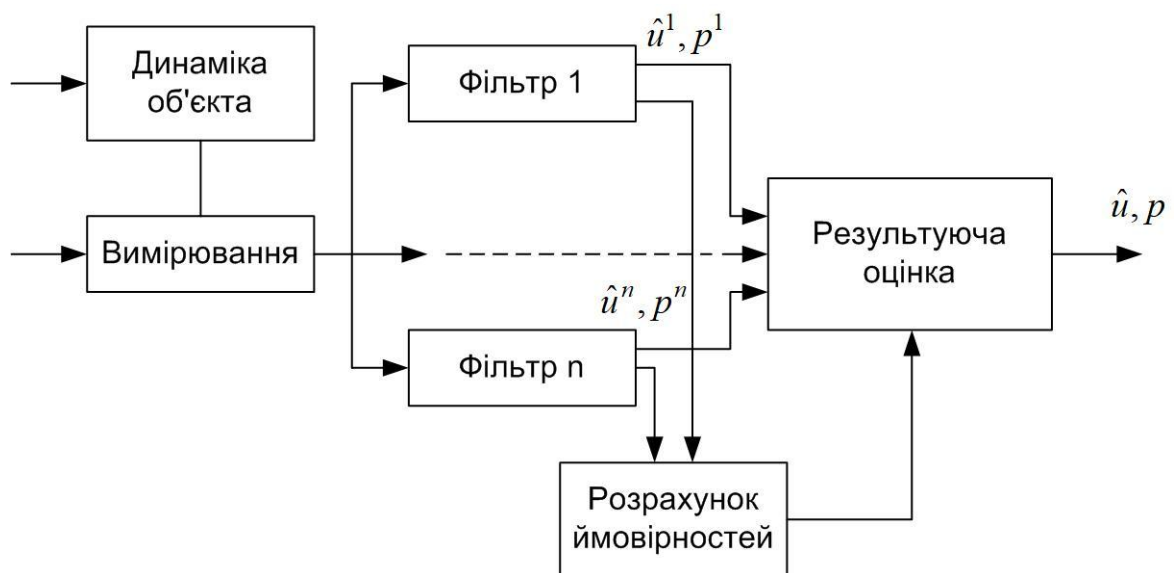


Рис. 1.13. Структурна схема багатогіпотезної моделі руху

Недоліком розглянутого алгоритму є значні тривалості перехідних процесів при зміні характеру руху цілі, а також необхідність підстроювання каналів адаптивного фільтра, який на поточному етапі не відповідає типу руху цілі.

Подальшим розвитком даного класу методів є адаптивні алгоритми, засновані на багатогіпотезній моделі руху цілі з перемиканням моделей. У таких алгоритмах перехід від однієї моделі руху цілі до іншої описується

марківським колом. Зупинимося на даному класі адаптивних алгоритмів більш детально.

Багатогіпотезні моделі руху цілі з перемиканням моделей представляють у вигляді дискретних динамічних систем, параметри або структура яких, відомі з точністю до набору гіпотез, змінюються стрибком в випадкові моменти часу [51].

Модель дискретної ДС з випадковою структурою і рівняння спостереження можна представити у вигляді

$$u(k) = F[u(k-1), a_j(k)] + G[a_j(k)]\omega(k), j = \overline{1, M}; \quad (1.19)$$

$$u_{\text{и}}(k) = h[u(k)] + v(k), \quad (1.20)$$

де $u(k)$ – вектор стану ДС; $\omega(k)$ – вектор некорельованої гаусівської послідовності $N(0, Q(k))$; $u_{\text{и}}(k)$ – вектор спостереження; $v(k)$ – вектор некорельованої гаусівської послідовності $N(0, R(k))$; $F[\circ], h[\circ]$ – векторнозначні функції; $G[\circ]$ – відома матриця; M – число структур ДС; $u(0)$ – початковий вектор стану ДС.

Рівняння стану (1.19) характеризує динаміку системи, а рівняння спостереження (1.20) описує механізм утворення даних, доступних спостереженню.

Випадкову величину $a_j(k)$ прийнято називати змінною перемикання [59]. Представимо змінну перемикання $a_j(k)$ у вигляді марківського кола з матрицею ймовірностей переходів $\Pi_{ij}(k, k-1)$ і початковими ймовірностями $p_i(0)$, $i, j = \overline{1, M}$, відповідно.

Для вирішення задачі оцінювання вектора стану $u(k)$ застосовується байесовський метод адаптивного оцінювання [59]. Байєсівське рішення задачі адаптивного оцінювання полягає в знаходженні апостеріорної ЩЙ $W(u(k))$ вектора, що оцінюється $u(k)$ за отриманою послідовністю вимірювань

$U_{\text{и}}(k) = u_{\text{и}}(1), \dots, u_{\text{и}}(k)$. За допомогою цієї ЩЙ вдається отримати оптимальні оцінки для будь-яких розумних функцій втрат.

Для синтезу оптимального алгоритму оцінювання до розгляду вводиться безліч $\Omega(k)$ всіх можливих послідовностей значень $I_s(k) = a_l(0), \dots, a_j(k)$, прийнятих змінною перемикавання $a_j(k)$, на інтервалі $0, \dots, k$, яке містить M^{k+1} елементів. Рівняння для апостеріорної ЩЙ вектора стану $W(u(k)) = P(u(k) / U_{\text{и}}(k))$ може бути записано у вигляді

$$W(u(k)) = \sum_{I_s(k) \in \Omega(k)} W_{I_s(k)}(u(k)) W_{I_s(k)}(k), \quad (1.21)$$

де $W_{I_s(k)}(u(k)) = P(u(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k))$ – умовна апостеріорна ЩЙ вектора стану за умови $I_s(k)$; $W_{I_s(k)}(k) = P(I_s(k) / U_{\text{и}}(k))$ – апостеріорна ймовірність послідовності $I_s(k)$.

Сумування у формулі (1.21) проводиться за всіма послідовностями простору $\Omega(k)$.

Алгоритм обчислення умовної апостеріорної ЩЙ $W_{I_s(k)}(u(k))$ може бути записаний у вигляді [59]

$$W_{I_s(k)}^*(u(k)) = \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(u(k) / u(k-1), a_j(k)) W_{I_r(k-1)}(u(k-1)) du(k-1); \quad (1.22)$$

$$W_{I_s(k)}(u(k)) = P(u_{\text{и}}(k) / u(k)) W_{I_s(k)}^*(u(k)) / P(u_{\text{и}}(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k-1)), \quad (1.23)$$

де $W_{I_s(k)}^*(u(k)) = P(u(k) / I_s(k), U(k-1), U_{\text{и}}(k-1))$ – умовна екстрапольована ЩЙ вектора $u(k)$, за умови $I_s(k)$; $P(u_{\text{и}}(k) / u(k))$ – однокрокова функція правдоподібності, що визначається на підставі рівняння (1.20); $\Pi(u(k) / u(k-1), a_j(k))$ – умовна ЩЙ, яка визначається на підставі рівняння (1.17); $P(u_{\text{и}}(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k-1))$ – умовна ЩЙ, що визначається за допомогою рівняння

$$P(u_{\text{и}}(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k-1)) = \int_{-\infty}^{\infty} P(u_{\text{и}}(k) / u(k)) W_{I_s(k)}^*(u(k)) du(k).$$

Рівняння для обчислення екстрапольованих $W_{I_s(k)}^*(k) = P(I_s(k) / U_{\text{и}}(k-1))$ і апостеріорних $W_{I_s(k)}(k)$ ймовірностей послідовностей $I_s(k)$, $s = \overline{1, M}^{k+1}$ мають вид

$$W_{I_s(k)}^*(k) = \Pi_{ij}(k, k-1) W_{I_r(k-1)}(k-1); \quad (1.24)$$

$$W_{I_s(k)}(k) = P(u_{\text{и}}(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k-1)) W_{I_s(k)}^*(k) / P(u_{\text{и}}(k) / U_{\text{и}}(k-1)), \quad (1.25)$$

де $P(u_{\text{и}}(k) / U_{\text{и}}(k-1))$ – умовна ЩЙ, що визначається за формулою

$$P(u_{\text{и}}(k) / U_{\text{и}}(k-1)) = \sum_{I_s(k) \in \Omega(k)} P(u_{\text{и}}(k) / I_s(k), U_{\text{и}}(k-1)) W_{I_s(k)}^*(k).$$

Оптимальний алгоритм оцінювання (1.21)...(1.25) є нелінійним, і являє собою оптимальні рішення задачі спільної прямої інтерполяції змінної перемикавання $a_j(k)$ на інтервалі спостереження $0, \dots, k$ і фільтрації процесу з випадковою структурою $u(k)$.

Широке застосування при визначенні оцінки вектора стану знаходить квадратична функція втрат, що мінімізує СКВ помилки оцінки. При цьому оптимальна оцінка дорівнює математичному очікуванню апостеріорної ЩЙ вектора стану $W(u(k))$. В роботі [59] показано, що оптимальна оцінка $\hat{u}(k)$ і кореляційна матриця помилки оцінки $\hat{P}(k)$ вектора стану при квадратичній функції втрат обчислюються за формулами

$$\hat{u}(k) = \sum_{I_s(k) \in \Omega(k)} \hat{u}_{I_s(k)} W_{I_s(k)}(k);$$

$$\hat{P}(k) = \sum_{I_s(k) \in \Omega(k)} (\hat{P}_{I_s(k)} + (\hat{u}_{I_s(k)} - \hat{u}(k))(\hat{u}_{I_s(k)} - \hat{u}(k))^T) W_{I_s(k)}(k),$$

де $\hat{u}_{I_s(k)}, \hat{P}_{I_s(k)}$ – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної ЩЙ $W_{I_s(k)}(u(k))$.

З виразу для визначення оцінки $\hat{u}(k)$ випливає, що вона знаходиться як зважена сума математичних очікувань умовних ЩЙ $W_{I_s(k)}(u(k))$. Ваги оцінок дорівнюють умовним апостеріорним ймовірностям $W_{I_s(k)}(k)$. На кожному кроці k загальне число можливих послідовностей значень змінної перемикавання зростає в M разів. Тому навіть при помірних k оптимальний алгоритм є нереалізованим.

У разі, якщо в рівняннях (1.19), (1.20) функції $F[\circ], h[\circ]$ є лінійними, алгоритм оптимальної фільтрації значно спрощується. Це обумовлено тим, що умовна апостеріорна ЩЙ $W_{I_s(k)}(u(k))$ є гаусівською, і для її визначення достатньо обчислити тільки перший і другий моменти. Алгоритм обчислення умовних моментів $\hat{u}_{I_s(k)}, \hat{P}_{I_s(k)}$ є лінійним фільтром Калмана [59]. Однак байєсівський алгоритм адаптивного оцінювання (1.21)...(1.25) залишається нелінійним. Нелінійні операції виконуються при обчисленні умовної ЩЙ $P(u_i(k) / I_s(k), U_i(k-1))$, використовуваної для визначення апостеріорних ймовірностей $W_{I_s(k)}(k)$. Необхідно відзначити, що навіть в цьому випадку оптимальний алгоритм практично не можна реалізувати, оскільки кількість паралельно працюючих фільтрів Калмана збільшується експоненціально з ростом k . Такі оптимальні пристрої отримали назву фільтрів зі зростаючим числом каналів.

Набори послідовності значень змінної перемикавання можна представити у вигляді дерева траєкторій перемикавання. На рис. 1.14 показано дерево траєкторій перемикавання на інтервалі $k = 0, \dots, 2$ для випадку $M=3$.

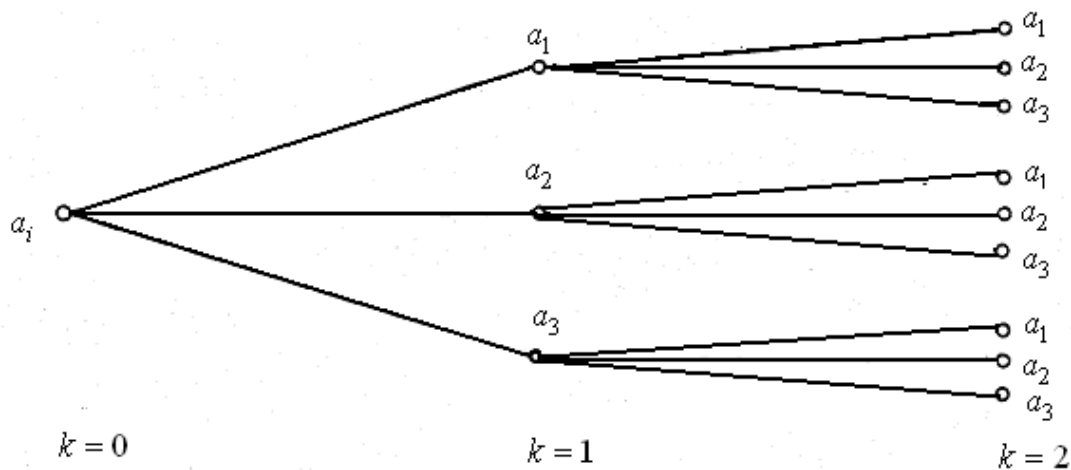


Рис. 1.14. Дерево траєкторій перемикавання на інтервалі $k = 0, \dots, 2$ для випадку $M = 3$

Точками виділені вузли дерева. Вузол в момент часу $k=0$ відповідає початковому стану системи, при цьому передбачається, що значення дискретного компонента відомо точно. Відрізки між вузлами називають ребрами. Сукупність декількох послідовних ребер називають траєкторією перемикавання. Справжньою траєкторією перемикавання називають траєкторію, відповідну реалізованій моделі результатів спостережень. Рішення байєсівської задачі адаптивного оцінювання містить рішення задачі виявлення істинної траєкторії перемикавання.

На рис. 1.15 показана структурна схема оптимального пристрою зі зростаючим числом каналів на інтервалі $k=0, \dots, 2$ при $M = 3$. У блоках прогнозу БП обчислюються екстрапольовані розподілення $W_{I_s(k)}^*(u(k)), W_{I_s(k)}^*(k)$, а в блоках фільтрації БФ виконується їх корекція на основі спостереження $u_i(k)$ і визначаються апостеріорні розподіли $W_{I_s(k)}(u(k)), W_{I_s(k)}(k)$. При переході на наступний крок розмірність простору $\Omega(k)$ зростає в M разів, а отже, в те саме число раз збільшується число фільтрів, необхідних для обчислення умовних апостеріорних розподілів, і обсяг пам'яті, необхідний для зберігання результатів обчислень.

Для подолання обчислювальних труднощів отримано велику кількість різних квазіоптимальних алгоритмів оцінювання. Синтез квазіоптимальних алгоритмів оцінювання заснований на різних апроксимаціях апостеріорної

ЩЙ $W(u(k))$. Найбільш широко використовується уявлення апостеріорної ЩЙ $W(u(k))$ у вигляді суми гауссівських щільностей, для обчислення моментів яких застосовуються узагальнені фільтри Калмана.

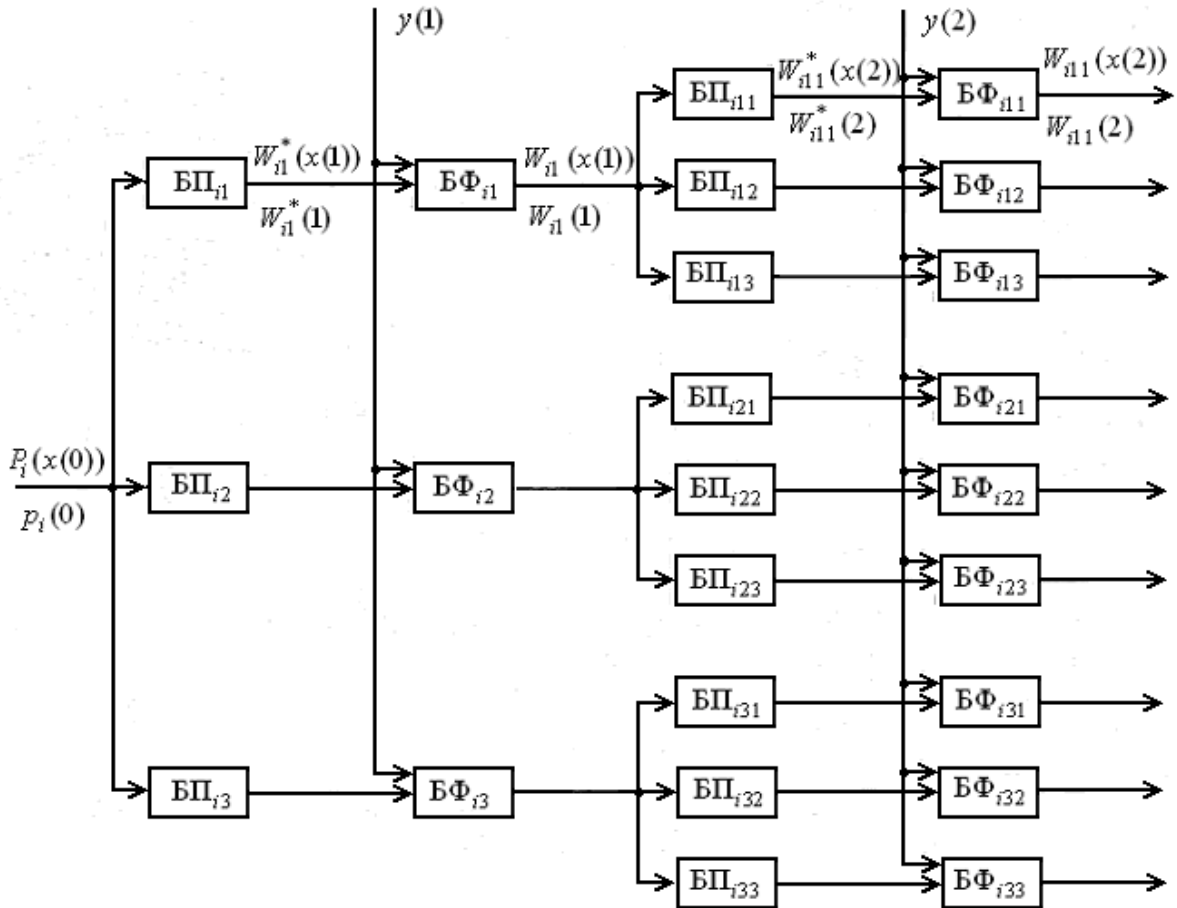


Рис. 1.15. Оптимальний устрій зі зростаючим числом каналів на інтервалі $k=0, \dots, 2$ при $M=3$

До числа таких алгоритмів відносяться псевдобайєсівські алгоритми з пам'яттю на Δ кроків [59], в яких при розрахунках розглядаються послідовності змінних перемикавання тільки на інтервалі $k - \Delta, \dots, k$. Для реалізації псевдобайєсівських алгоритмів використовується $M^{\Delta+1}$ фільтрів Калмана, що все ж вимагає значних обчислювальних затрат.

Синтез квазіоптимальних алгоритмів можна здійснити також, обмежуючи число розглянутих послідовностей значень змінної перемикавання за допомогою відкидання найменш імовірних послідовностей. У цьому випадку на k -му кроці відбирають послідовності значень змінної перемикавання, апостеріорні ймовірності яких перевищили певний поріг.

Потім проводять перенормування апостеріорних ймовірностей і отримують нову апроксимацію апостеріорної ЩЙ у вигляді гаусівських сум [59]. Однак для реалізації таких алгоритмів також потрібно $M^{\Delta+1}$ фільтрів Калмана, де Δ – число доданків, що зберігаються в представленні апостеріорної ЩЙ на k -му кроці.

С метою подолання зазначених труднощів для вирішення завдання фільтрації процесів з випадковою структурою в роботах [60,61,62] запропоновано використовувати апарат ЗМП в дискретному часі, адекватний ЦОМ. Синтезовані в роботах [60,62] оптимальні алгоритми фільтрації ЗМП в дискретному часі є нелінійними і рекурентними. При цьому в отриманих оптимальних фільтрах відсутній ріст числа каналів, що обумовлено марківською властивістю змішаного процесу, і вони відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. Тому для вирішення завдання оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі доцільно застосувати математичний апарат ЗМП в дискретному часі.

1.6 Постановка задачі дослідження

Як впливає з проведеного аналізу актуальною науковою задачею є розробка методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні для підвищення точності визначення їх місцеположення.

Об'єктом дослідження є процеси визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Предметом дослідження є методи оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Мета роботи - підвищення точності визначення місцеположення БПЛА шляхом розробки методів адаптивного оцінювання його параметрів руху на

основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.

Відповідно до мети, **основними завданнями** дослідження є:

1. Проаналізувати методи визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.
2. Удосконалити методи визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні.
3. Розробити методи адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.
4. Проаналізувати ефективність синтезованих алгоритмів визначення місцеположення і параметрів руху БПЛА шляхом статистичного моделювання на ЕОМ і порівняння їх з відомими.
5. Виконати аналіз обчислювальних затрат і можливостей практичної реалізації синтезованих алгоритмів з використанням сучасної мікропроцесорної техніки.

Висновки по першому розділу

1. Доступність і масове використання БПЛА породжують новий клас загроз: падіння, вторгнення в приватне життя, фотозйомка засекречених об'єктів, контрабанда, можливість терактів, зіткнення з повітряними транспортними засобами, що призводить до необхідності розробки систем, які вирішують задачі визначення їх місцеположення і параметрів руху.
2. Одним з основних застосувань сенсорних мереж є створення різних систем моніторингу та відстеження рухомих ДРВ, до яких також можуть бути віднесені і БПЛА. При цьому найбільшого поширення для визначення місцеположення невідомого ДРВ знаходять методи на основі TDOA- і RSS- вимірювань.

3. У відомих методах визначення місцеположення ДРВ на основі TDOA-вимірювань, що базуються на математичних методах максимальної правдоподібності та найменших квадратів, обчислення координат ДРВ виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків. При значному числі датчиків сенсорної мережі становить інтерес розробка методу, який після формування початкових умов на основі TDOA-вимірювань від мінімального числа датчиків, дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення ДРВ по мірі надходження TDOA-вимірювань від інших датчиків.

4. У відомих методах визначення місцеположення ДРВ на основі RSS-вимірювань, що базуються на математичному методі найменших квадратів, не враховується дисперсія помилок вимірювання потужності, а обчислення координат ДРВ виконується після надходження вимірювань від всіх датчиків. При значному числі датчиків сенсорної мережі становить інтерес розробка методу, який після формування початкових умов на основі вимірів потужності сигналів від мінімального числа датчиків, дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення ДРВ по мірі надходження RSS-вимірювань від інших датчиків і враховує дисперсію помилок вимірювання потужності.

5. Синтезовані на основі методу калмановської фільтрації в дискретному часі алгоритми визначення параметрів руху цілі за даними траєкторних вимірювань є рекурентними і зручними для реалізації на ЕОМ. Однак вони можуть бути синтезовані тільки в умовах повної апріорної інформації про модель руху цілі і при оцінюванні параметрів руху маневруючих об'єктів такі алгоритми часто є розбіжними.

6. Баєсівський метод адаптивного оцінювання процесів з випадковою структурою в дискретному часі призводить до фільтрів зі зростаючим числом каналів, які є практично нереалізованими і не дозволяє отримати рекурентні оптимальні алгоритми оцінювання таких процесів. Математичний апарат ЗМП в дискретному часі дозволяє синтезувати рекурентні оптимальні і квазіоптимальні алгоритми оцінювання процесів з випадковою структурою, а

отримані при цьому фільтри відносяться до класу пристроїв зі зворотніми зв'язками між каналами. Тому для вирішення задачі оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі доцільно застосувати математичний апарат ЗМП в дискретному часі.

7. Актуальною науковою задачею є розробка методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні для підвищення точності визначення його місцеположення.

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБКА РЕКУРЕНТНИХ АЛГОРИТМІВ ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕПОЛОЖЕННЯ БПЛА ЗА ВИМІРЮВАННЯМИ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У розділі 2 з використанням математичного апарату розширеної калмановської фільтрації розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА за даними сенсорної мережі на основі:

- TDOA-вимірювань;
- RSS-вимірювань;
- комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань.

За допомогою статистичного моделювання виконано аналіз точностних характеристик розроблених алгоритмів. Проведено їх порівняння з нижньою границею Рао-Крамера і відомими алгоритмами.

Виконано аналіз впливу зміни положення датчиків (топології) сенсорної мережі на точність визначення місцеположення БПЛА.

2.1 Розробка рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань

Модель TDOA вимірювань сенсорної мережі розглянута в підрозділі 1.2. Координати місцеположення БПЛА, що підлягають оцінці – x, y, z . Помилка вимірювання опорного датчика v^0 в виразах (1.2), (1.3) не змінюється на одному циклі вимірювань (надходження даних від всіх датчиків при прийомі одного і того ж сигналу). Тому вона також може бути включена в вектор стану оцінюваних параметрів. При цьому рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, має вид

$$u^l = u^{l-1}, \quad (2.1)$$

де $u^l = (x^l, y^l, z^l, v^{0l})^T$ – вектор стану, включає координати положення БПЛА і помилку вимірювання опорного датчика v^{0l} на поточному такті l . Індекс l

характеризує послідовність надходжень вимірних різниць дальностей від відповідних датчиків мережі.

Рівняння вимірювання, яке описує вимірювану l -у різницю дальностей, яка отримана з використанням s -того і опорного датчиків, з урахуванням (1.2), (1.4), (2.1) можна представити у виді

$$\Delta^l = h^l(u^l) + v^l, \quad (2.2)$$

де $h^l(u^l)$ – нелінійна функція, яка описується виразом

$$h^l(u^l) = \sqrt{(x^l - x_s)^2 + (y^l - y_s)^2 + (z^l - z_s)^2} - \sqrt{(x^l)^2 + (y^l)^2 + (z^l)^2} - v^{0l}; \quad (2.3)$$

v^l – помилка вимірювання датчика з координатами x_s, y_s, z_s .

Рівняння вимірювання (2.2) є нелінійним.

Включення помилки вимірювання опорного датчика v^0 в вектор стану u^l дозволило отримати рівняння вимірювання (2.2) з некорельованими помилками вимірювань по координаті k . Тому, з використанням моделі (2.2), (2.3), рекурентний алгоритм оцінювання вектора стану u^l може бути отриманий на основі розширеного фільтра Калмана [63] і описується рівняннями [64,65]

$$K^l = \hat{P}^{l-1} \cdot \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \left[\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1} \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_{\Delta}^2 \right]^{-1}; \quad (2.4)$$

$$\hat{u}^l = \hat{u}^{l-1} + K^l [\Delta^l - h^l(\hat{u}^{l-1})]; \quad (2.5)$$

$$\hat{P}^l = \hat{P}^{l-1} - K^l \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1}, \quad (2.6)$$

де \hat{u}_l – оцінка вектора стану u_l на l -му кроці; \hat{P}^l – кореляційна матриця помилки оцінки вектора стану u^l на l -му кроці; K^l – коефіцієнт підсилення фільтра;

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} = & \left[\frac{\hat{x}^{l-1} - x_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{x}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; \right. \\ & \frac{\hat{y}^{l-1} - y_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{y}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; \\ & \left. \frac{\hat{z}^{l-1} - z_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{z}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; -1 \right] \end{aligned}$$

Отриманий алгоритм (2.4)...(2.6) є нелінійним і відноситься до класу адаптивних, оскільки в ньому поряд з оцінюванням координат БПЛА визначається оцінка невідомої помилки v^0 .

Для виконання адаптивного оцінювання необхідно задати початкові умови \hat{u}^0 та \hat{P}^0 . Початковий вектор оцінки $\hat{u}^{0T} = (\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0, 0)$. Початкові оцінки координат БПЛА $\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0$ визначаються на основі методу найменших квадратів при наявності трьох вимірів різниць дальностей [26] за допомогою рівняння

$$\omega = 0.5 \left(A^T \Sigma^{-1} A \right)^{-1} A^T \Sigma^{-1} b, \quad (2.7)$$

де $\omega^T = (\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0, \hat{r}^0)$ – вектор, що включає оцінки координат БПЛА;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & \Delta^1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & \Delta^2 \\ x_3 & y_3 & z_3 & \Delta^3 \\ x_4 & y_4 & z_4 & \Delta^4 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 + z_1 - (\Delta^1)^2 \\ x_2 + y_2 + z_2 - (\Delta^2)^2 \\ x_3 + y_3 + z_3 - (\Delta^3)^2 \\ x_4 + y_4 + z_4 - (\Delta^4)^2 \end{bmatrix}; \quad \Sigma = \begin{bmatrix} 2\sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 \\ \sigma_\Delta^2 & 2\sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 \\ \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & 2\sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 \\ \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & \sigma_\Delta^2 & 2\sigma_\Delta^2 \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця помилки оцінки вектора ω визначається [28] за допомогою виразу

$$\Omega = \left(\left(\bar{A}^0 \right)^T H^{-1} \bar{A}^0 \right)^{-1}, \quad (2.8)$$

де H – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B; \quad B = \text{diag}\{\hat{r}^1, \hat{r}^2, \hat{r}^3, \hat{r}^4\}; \quad \hat{r}^j = \sqrt{(\hat{x}^0 - x_j)^2 + (\hat{y}^0 - y_j)^2 + (\hat{z}^0 - z_j)^2}; \quad j = \overline{1, 4}.$$

Початкова кореляційна матриця \hat{P}^0 має блочний вид $\hat{P}^0 = \begin{bmatrix} \Omega_{2 \times 2} & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta}^2 \end{bmatrix}$,

де $\Omega_{2 \times 2}$ визначається на основі Ω , шляхом викреслювання третього рядка і третього стовпця.

Після формування початкових умов на основі вимірів часу прийому сигналів від чотирьох датчиків, синтезований алгоритм (2.4)...(2.6) дозволяє рекурентно уточнювати на кожному кроці l місцеположення БПЛА по мірі надходження вимірювань від інших датчиків $l = \overline{1, S-3}$.

2.2 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань

Аналіз ефективності рекурентного адаптивного алгоритму (2.4)...(2.6) і його порівняння з алгоритмом квадратичної корекції проведені за допомогою статистичного моделювання. Алгоритм квадратичної корекції забезпечує найбільшу точність серед розглянутих в роботі [30]. Він складається з двох етапів: перший – визначається оцінка координат БПЛА, яка залежить від відстані r^0 , і підставляється в початковий функціонал, після цього повторно вирішується завдання лінійної оптимізації, другий – рішення коригується з урахуванням квадратичної зв'язку.

Точнісні характеристики синтезованих алгоритмів залежать від конфігурації системи та місцеположення цілі, тому їх аналіз і порівняння з відомими алгоритмами в другому розділі виконані на площині.

Моделювання алгоритмів проведено для конфігурації сенсорної мережі (рис. 2.1, а), яка складається з дев'яти датчиків для визначення місцеположення БПЛА з координатами: $D_0 (0;0)$, $D_1 (0;100)$, $D_2 (70.71; 70.71)$,

$D_3 (100;0)$, $D_4 (70.71;-70.71)$, $D_5 (0;-100)$, $D_6 (-70.71;-70.71)$, $D_7 (-100;0)$, $D_8 (-70.71; 70.71)$. Тут і надалі координати датчиків задані в метрах. На рис.2.1, б сенсорна мережа складається з мінімального числа датчиків для формування початкових умов адаптивного оцінювання с координатами: $D_0 (0;0)$, $D_1 (70.71; 70.71)$, $D_2 (70.71;-70.71)$, $D_3 (-100;0)$. БПЛА розташовується по колу з радіусом 300 м відносно опорного датчика D_0 . СКВ помилки вимірювання $\sigma_{\Delta} = 1$ м. Як показник ефективності використовувалося кругове

СКВ $\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2}$.

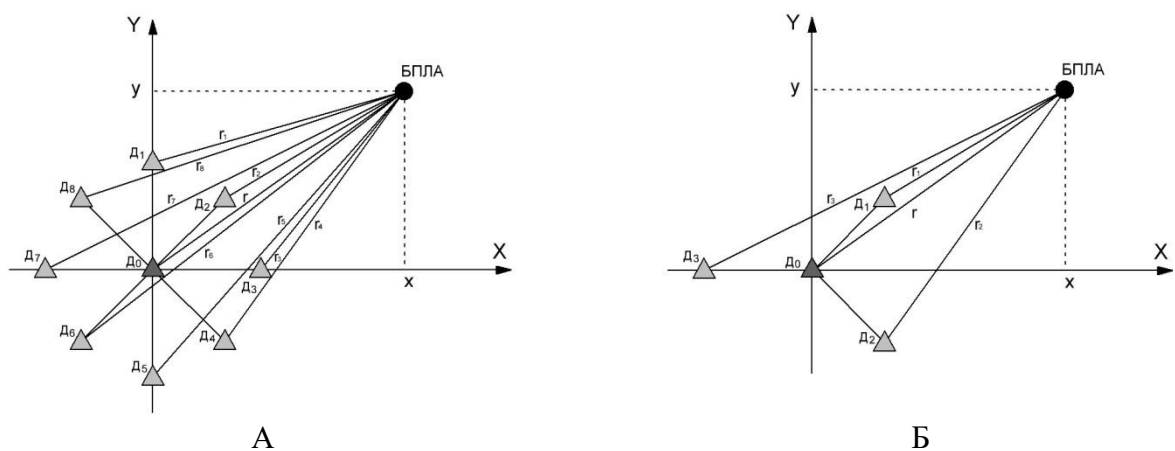


Рис. 2.1. Конфігурація сенсорної мережі з: а – 9 датчиків; б – 4 датчиків.

На рис. 2.2 і рис. 2.3 показана залежність фактичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА за чотирма датчиками рис. 2.1, б, отримана методом Монте-Карло з використанням виразу (2.7), яка відповідає початковим умовам адаптивного фільтра. Також на рис. 2.2 і рис. 2.3 приведена залежність теоретичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}$ (крива 3) помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке розраховане на основі відповідних елементів кореляційної матриці помилок оцінки \hat{P}_0 , яка визначається з використанням формули (2.8). Значення СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ коливається в межах від 21 до 200 м.

На рис. 2.2 і рис. 2.4 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{ФК}^{МК}$ (крива 4) і теоретичного $\hat{\sigma}_{ФК}$ (крива 5) кругового СКВ помилки оцінки

місцеположення БПЛА по дев'яти датчикам рис. 2.1, а, для рекурентного алгоритму. Отримані фактичні і теоретичні значення СКВ добре узгоджуються між собою, що свідчить про правильну роботу алгоритму. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ коливається в межах від 10 до 20 м. Як впливає з рис. 2.2 застосування рекурентного адаптивного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 1.5 – 4.2 рази.

На рис. 2.2 і рис. 2.5. показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (крива 6) і теоретичного $\hat{\sigma}_{KK}$ (крива 7) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для алгоритму квадратичної корекції.

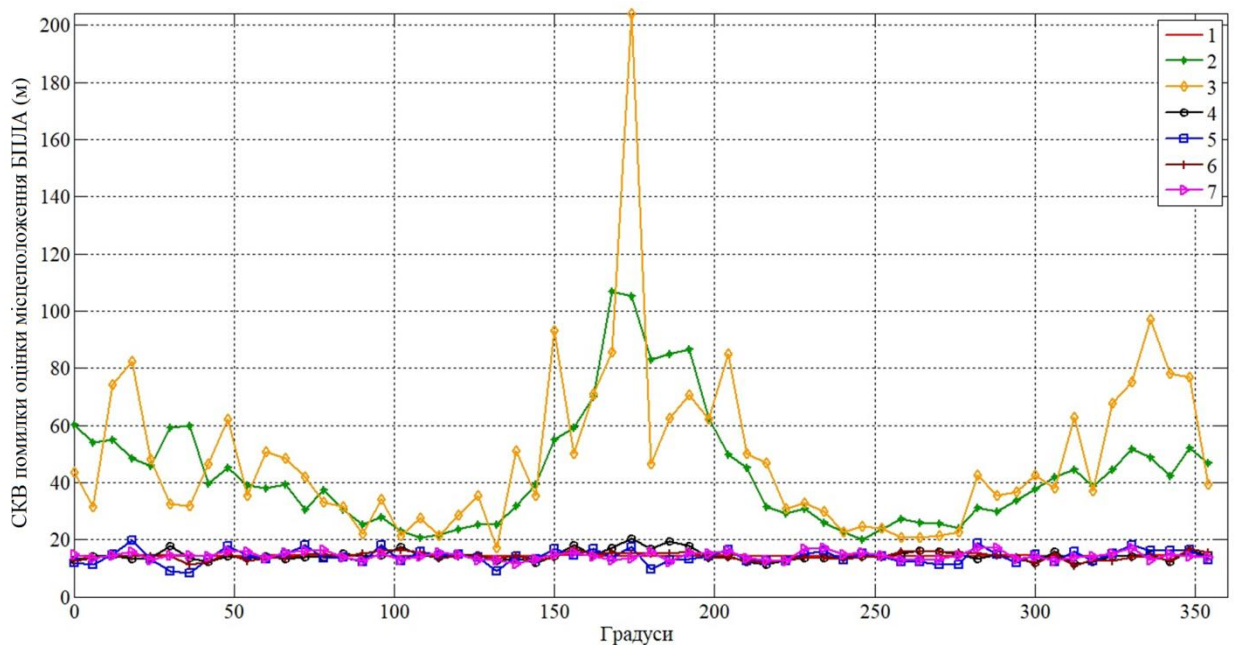


Рис. 2.2 Кругові СКВ помилок оцінки місцезнаходження БПЛА

На рис. 2.2 показано кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1), і характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА рекурентного адаптивного алгоритму і алгоритму квадратичної корекції близькі до відповідних значень кругових СКВ нижній границі Рао-Крамера, що свідчить про їх високу ефективність.

На рис. 2.6 показані залежності фактичних СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА за координатами X (крива 1) і Y (крива 2) розробленим алгоритмом. Значення СКВ коливається в межах від 2м до 20м.

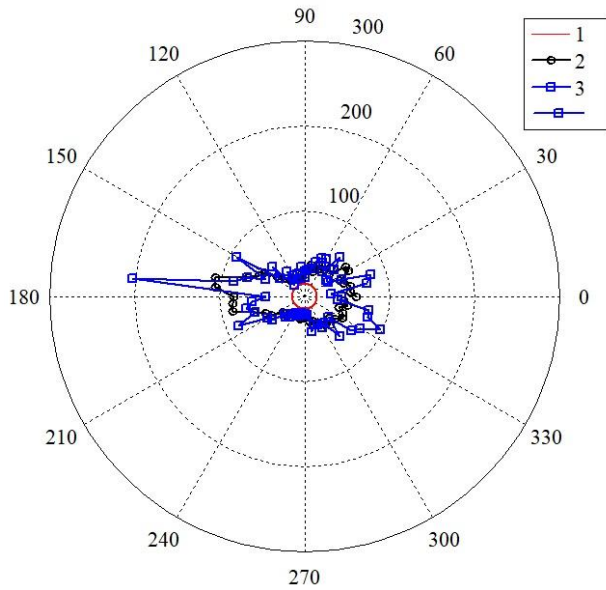


Рис. 2.3. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для початкових умов.

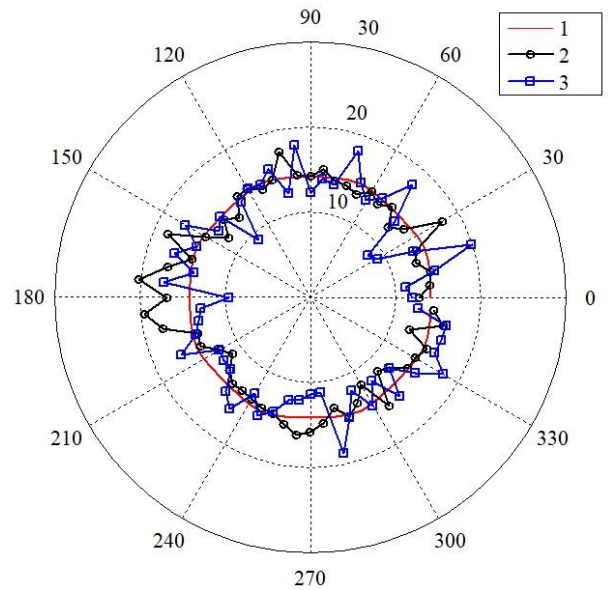


Рис. 2.4. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для рекурентного адаптивного алгоритму.

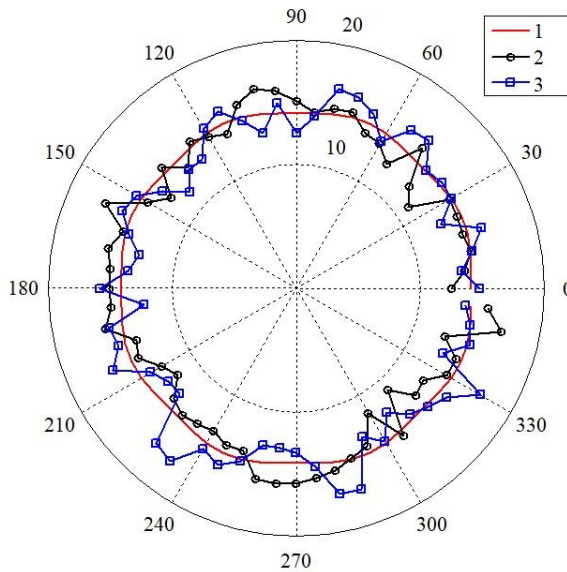


Рис. 2.5. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для алгоритму квадратичної корекції.

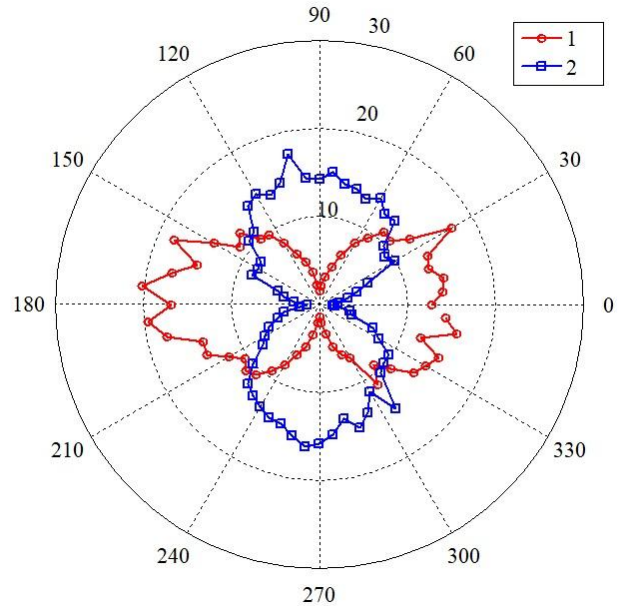


Рис. 2.6. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для X і Y .

На рис. 2.7. показана динаміка зміни фактичного (крива 1) і теоретичного (крива 2) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні рекурентного адаптивного алгоритму при

фіксованих координатах БПЛА x, y . Застосування рекурентного адаптивного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 2.5 рази відносно початкових умов.

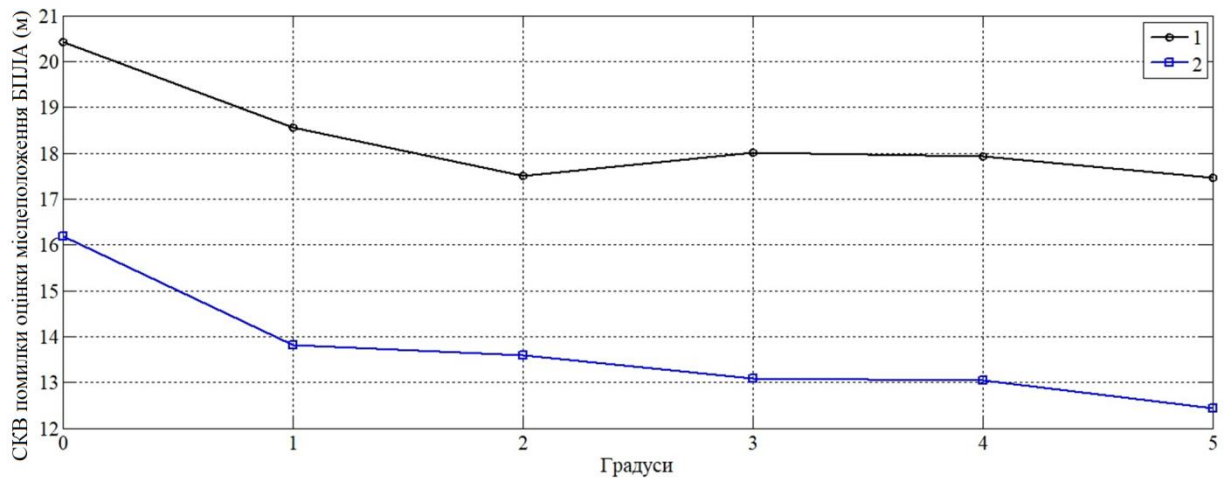


Рис. 2.7. Динаміка зміни кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при послідовному надходженні даних.

Становить інтерес порівняти обчислювальні затрати, необхідні при реалізації рекурентного адаптивного алгоритму і алгоритму квадратичної корекції. Їх можна оцінити шляхом визначення необхідного числа операцій множення (ділення), так як вони виконуються в 100 ... 150 разів повільніше ніж операції додавання і віднімання. Для розглянутого прикладу при виконанні рекурентного адаптивного алгоритму необхідно 461 операцій множення, а для алгоритму квадратичної корекції – 1246. Таким чином застосування розробленого алгоритму дозволяє скоротити обчислювальні витрати в 2.7 рази.

2.3 Розробка рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань

Підлягають оцінці координати положення БПЛА x^l, y^l, z^l . Тому, рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, має вид

$$u^l = u^{l-1}, \quad (2.9)$$

де $u^l = (x^l, y^l, z^l)^T$ – вектор стану, що включає координати положення БПЛА на поточному такті l . Індекс l характеризує послідовність надходження вимірних значень потужностей сигналу від датчиків.

Рівняння спостереження, яке описує механізм вимірювання потужності прийнятого сигналу на l -му кроці, з урахуванням (1) можна представити у виді

$$p^l = h^l(u^l) + v^l, \quad (2.10)$$

де $h^l(u^l)$ – нелінійна функція, яка описується виразом

$$h^l(u^l) = p_0 - 10 \cdot a \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{(x^l - x_s)^2 + (y^l - y_s)^2 + (z^l - z_s)^2}}{r_0} \right); \quad (2.11)$$

v^l – помилка вимірювання потужності сигналу, яка є гаусівською з дисперсією σ_p^2 .

Рівняння спостереження (2.11) є нелінійним. Тому для синтезу алгоритму оцінювання вектора стану u^l застосовується математичний апарат розширеного фільтра Калмана [63]. Виконуючи лінеаризацію рівняння (2.11) щодо оцінених значень вектора стану, можна показати, що алгоритм визначення місцеположення БПЛА описується рівняннями [66]

$$K^l = \hat{P}^{l-1} \cdot \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \left[\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1} \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_p^2 \right]^{-1}; \quad (2.12)$$

$$\hat{u}^l = \hat{u}^{l-1} + K^{l-1} [p^l - h^l(\hat{u}^{l-1})]; \quad (2.13)$$

$$\hat{P}^l = \hat{P}^{l-1} - K^l \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}^{l-1}, \quad (2.14)$$

де \hat{u}^l – оцінка вектора стану u^l на l -му кроці; \hat{P}^l – кореляційна матриця помилки оцінки вектора стану u^l на l -му кроці; K^l – коефіцієнт підсилення фільтра;

$$\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1})}{\partial u^l} = \frac{-10 \cdot a}{\ln(10)} \cdot \left[\frac{\hat{x}^{l-1} - x_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}; \right. \\ \left. \frac{\hat{y}^{l-1} - y_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}; \frac{\hat{z}^{l-1} - z_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2} \right].$$

Отриманий алгоритм (2.12)...(2.14) відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорною щільністю ймовірності [56].

Для виконання фільтрації необхідно задати початкові умови \hat{u}^0 та \hat{P}^0 . Початкові оцінки координат БПЛА $\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0$ визначаються на основі методу найменших квадратів при наявності чотирьох вимірів потужності сигналу [33] за допомогою рівняння

$$\omega = 0.5(A^T A)^{-1} A^T b, \quad (2.15)$$

де $\omega^T = (\hat{x}^0, \hat{y}^0, \hat{z}^0, \hat{r}^0)$ – вектор, що включає оцінки координат БПЛА;

$$A = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & z_1 & -0.5 \\ x_2 & y_2 & z_2 & -0.5 \\ x_3 & y_3 & z_3 & -0.5 \\ x_4 & y_4 & z_4 & -0.5 \end{bmatrix}; \quad b = \begin{bmatrix} x_1 + y_1 + z_1 - 10^{\frac{p_0 - p^1}{5 \cdot a}} \\ x_2 + y_2 + z_2 - 10^{\frac{p_0 - p^2}{5 \cdot a}} \\ x_3 + y_3 + z_3 - 10^{\frac{p_0 - p^3}{5 \cdot a}} \\ x_4 + y_4 + z_4 - 10^{\frac{p_0 - p^3}{5 \cdot a}} \end{bmatrix}.$$

Кореляційна матриця помилки оцінки вектора ω визначається [66] за допомогою виразу

$$\Omega = \left(\left(\bar{A}^0 \right)^T H^{-1} \bar{A}^0 \right)^{-1}, \quad (2.16)$$

де H – матриця визначається за формулою

$$H = B \Sigma B; \quad B = \text{diag}\{\hat{r}^1, \hat{r}^2, \hat{r}^3, \hat{r}^4\}; \quad \Sigma = \text{diag}\{\sigma_{r1}^2, \sigma_{r2}^2, \sigma_{r3}^2, \sigma_{r4}^2\};$$

σ_{rj}^2 , $j = \overline{1,4}$ – дисперсія вимірювання дальності j -м датчиком, що обчислюється за допомогою виразів

$$\sigma_{rj}^2 = \frac{\left(r_{\max}^j - r_{\min}^j \right)^2}{12}; \quad r_{\max}^j = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^j}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{2 \cdot \sigma_p}{10 \cdot a}}; \quad r_{\min}^j = r_0 \cdot 10^{\frac{p_0 - p^j}{10 \cdot a}} \cdot 10^{\frac{-2 \cdot \sigma_j}{10 \cdot a}}.$$

Початкова кореляційна матриця $\hat{P}^0 = \Omega_{2 \times 2}$, де $\Omega_{2 \times 2}$ визначається на основі Ω , шляхом викреслювання третього рядка і третього стовпця.

Після формування початкових умов на основі вимірів потужностей сигналів від трьох датчиків, синтезований алгоритм (2.12)...(2.14) дозволяє рекурентно уточнювати на кожному кроці l місцеположення БПЛА в міру надходження вимірювань потужності сигналу від інших датчиків $l = \overline{1, S-3}$.

2.4 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань

Аналіз ефективності рекурентного алгоритму (2.12)...(2.14) і його порівняння з алгоритмами наведеними в [37, 38] проведені за допомогою статистичного моделювання. Для визначення місцеположення БПЛА в відомих методах використовується МНК.

Моделювання алгоритмів проведено для конфігурації сенсорної мережі (рис. 2.8, а), яка складається з восьми датчиків для визначення місцеположення БПЛА з координатами: $D_1(0;100)$, $D_2(70.71;70.71)$, $D_3(100;0)$, $D_4(70.71;-70.71)$, $D_5(0;-100)$, $D_6(-70.71;-70.71)$, $D_7(-100;0)$, $D_8(-70.71;70.71)$.

На рис. 2.8, б сенсорна мережа складається з мінімального числа датчиків для формування початкових умов адаптивного оцінювання с координатами: Д1(70.71; 70.71), Д2 (70.71;-70.71), Д3 (-100;0). БПЛА розташовувався по колу з радіусом 300 м. СКВ помилки вимірювання $\sigma_p = 1$ дБ. В якості показника ефективності використовувалося кругове СКВ $\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2}$.

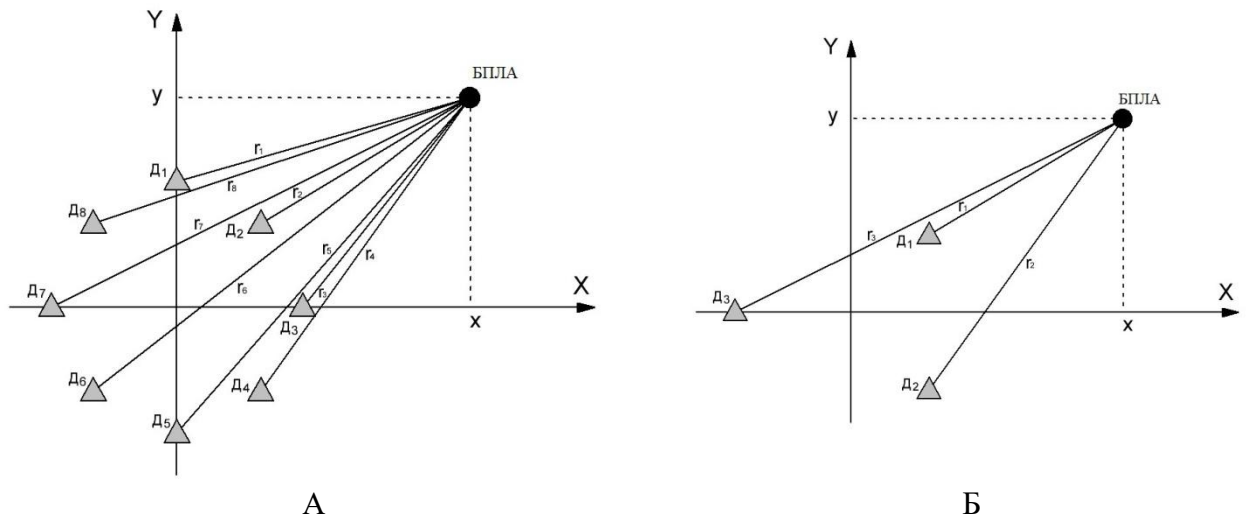


Рис. 2.8. Конфігурація сенсорної мережі з: а – 8 датчиків; б – 3 датчика.

На рис. 2.9 і рис.2.10 показана залежність фактичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА за трьома датчиками рис. 2.8, б, отриманого методом Монте-Карло з використанням виразу (2.15), яка характеризує початкові умови роботи фільтра (2.12), (2.14). Також на рис. 2.9 і рис. 2.10 приведена залежність теоретичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}$ (крива 3) помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке розраховане на основі відповідних елементів кореляційної матриці помилок оцінки \hat{P}_0 , яка визначається з використанням формули (2.16). Значення СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ коливається в межах від 35 до 75 м.

На рис. 2.9. і 2.11 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{ФК}^{МК}$ (крива 4) і теоретичного $\hat{\sigma}_{ФК}$ (крива 5) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, що визначається алгоритмом (2.12)...(2.14) по восьми датчикам рис. 2.8, а. Отримані фактичні і теоретичні значення СКВ добре узгоджуються

між собою, що свідчить про правильну роботу алгоритму. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ коливається в межах від 15 до 22 м. Як впливає з рис. 2.9 застосування рекурентного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 2.8 – 3.5 рази.

На рис. 2.9 і 2.12 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (крива 6) і теоретичного $\hat{\sigma}_{KK}$ (крива 7) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для відомого методу RSS [37]. У ньому після обчислення діяльності на основі вимірних значень потужності прийнятих сигналів, для визначення місцеположення БПЛА використовується алгоритм далекомірного методу (TOA). При цьому оцінки знаходяться за формулою (2.15), в якій використовуються вимірювання від восьми датчиків. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ коливається в межах від 24 до 30 м. Алгоритм RSS, в якому для визначення місцеположення БПЛА використовуються співвідношення різницево-далекомірного методу (TDOA) [38] має аналогічні показники ефективності.

На рис. 2.9 показано кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1), і характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Значення кругових СКВ помилок визначення місцеположення БПЛА рекурентного алгоритму близькі до відповідних значень кругових СКВ нижній границі Рао-Крамера, що свідчить про високу ефективність алгоритму. Значення кругових СКВ помилок визначення місцеположення БПЛА розробленим алгоритмом менше ніж СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА відомими алгоритмами [37, 38] на 36–44%.

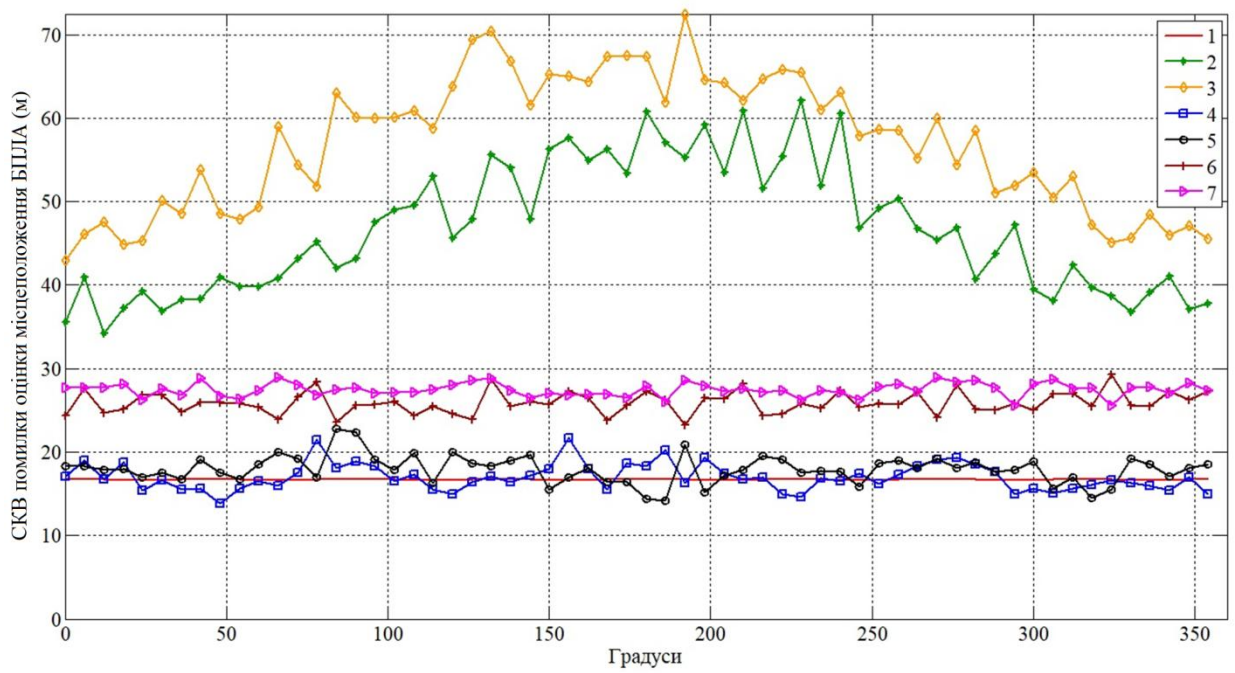


Рис. 2.9 Кругові СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА

На рис. 2.13 показані залежності фактичних СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА за координатами X (крива 1) і Y (крива 2) розробленим алгоритмом. Значення СКВ коливається в межах від 5 до 20 м.

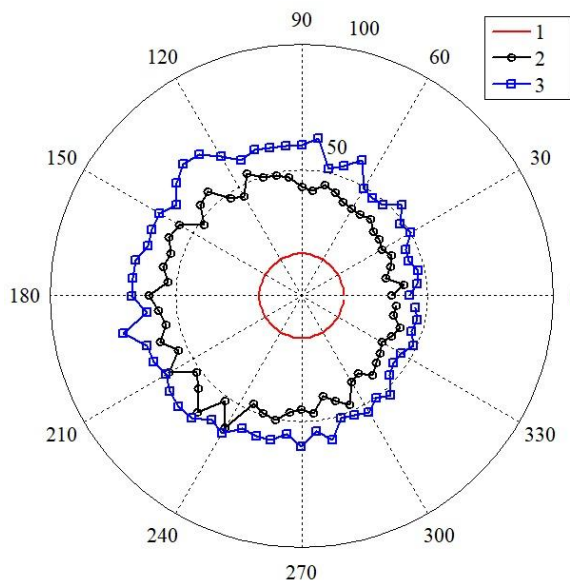


Рис. 2.10. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для початкових умов.

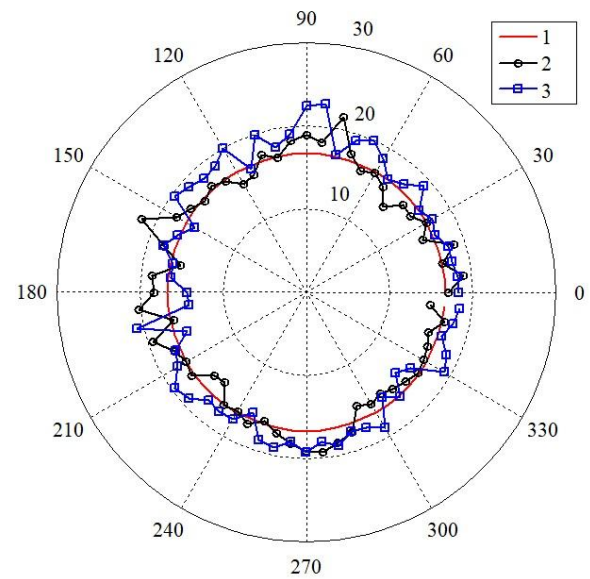


Рис. 2.11. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для рекурентного адаптивного алгоритму.

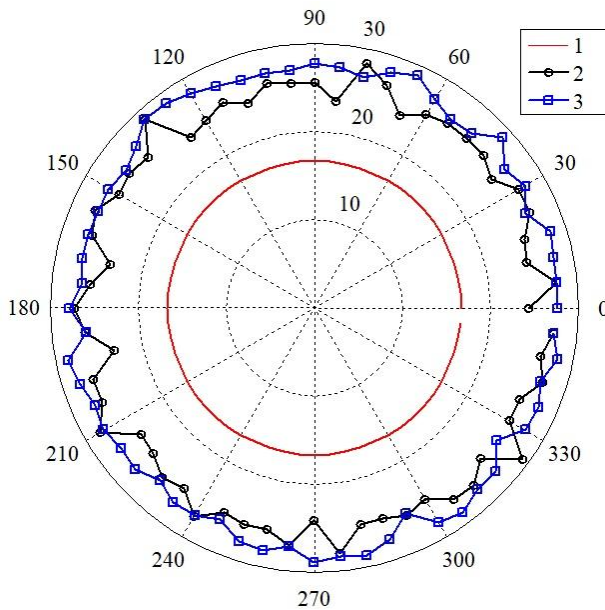


Рис. 2.12. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для алгоритму квадратичної корекції.

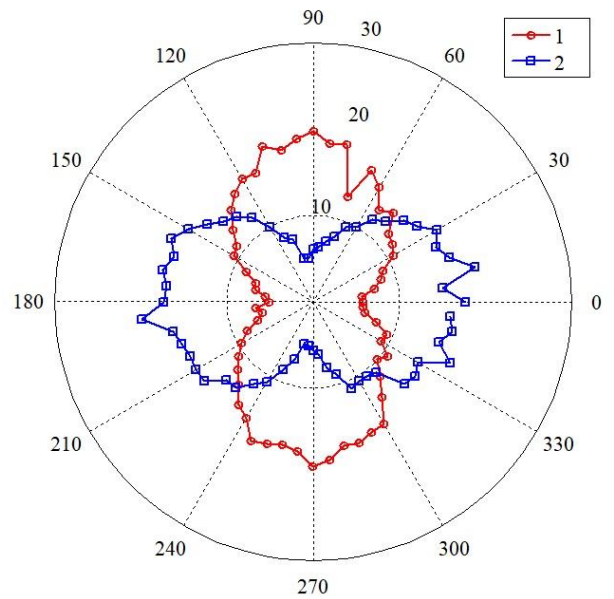


Рис. 2.13. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для X і Y.

На рис. 2.14. показана динаміка зміни фактичного (крива 1) і теоретичного (крива 2) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні рекурентного алгоритму при фіксованих координатах БПЛА. Застосування рекурентного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 2.5 рази відносно початкових умов.

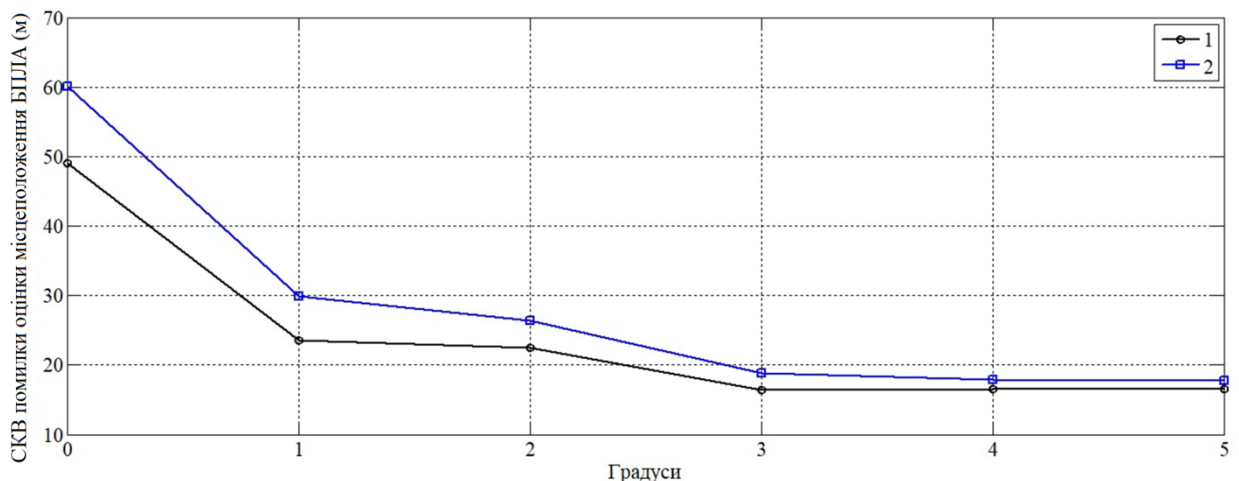


Рис. 2.14. Динаміка зміни кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при послідовному надходженні даних.

Більш висока ефективність розробленого алгоритму (2.12) ... (2.14) у порівнянні з наведеними в [37, 38] обумовлена тим, що в них не враховується

кореляційна матриця помилок вимірювання відстаней. При цьому оцінка, яка визначається на основі методу найменших квадратів, поступається оцінці з мінімальною дисперсією помилки оцінки [53], яка визначається на основі калмановської фільтрації.

У запропонованому підході, помилка вимірювання зберігається адитивною і гаусівською з відомою дисперсією, що дозволяє застосувати адекватний для такої моделі математичний апарат розширеного фільтра Калмана і отримати показники ефективності, близькі до потенційно можливих.

2.5 Розробка алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань

Підвищення точності визначення місцеположення БПЛА може бути досягнуто шляхом комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі [67,68].

Потрібно синтезувати рекурентний алгоритм, який після формування початкових умов на основі вимірів часу прийому сигналів від чотирьох датчиків, дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі.

Рівняння, що описує динаміку зміни оцінюваних параметрів, має вид (2.1)

$$u^l = u^{l-1}. \quad (2.17)$$

Індекс l характеризує послідовність надходження виміряних різниць дальностей і потужностей сигналів від відповідних датчиків мережі.

З використанням моделі (2.2), (2.3), (2.10), (2.11), рекурентний алгоритм оцінювання вектора стану u^l може бути отриманий на основі розширеного фільтра Калмана [63] і описується рівняннями

$$K_{\Delta}^l = \hat{P}_p^{l-1} \cdot \frac{\partial h_{\Delta}^{lT}(\hat{u}_p^{l-1})}{\partial u^l} \left[\frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_p^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}_p^{l-1} \frac{\partial h_{\Delta}^{lT}(\hat{u}_p^{l-1})}{\partial u^l} + \sigma_{\Delta,v}^2 \right]^{-1}; \quad (2.18)$$

$$\hat{u}_{\Delta}^l = \hat{u}_p^{l-1} + K_{\Delta}^l [\Delta^l - h_{\Delta}^l(\hat{u}_p^{l-1})]; \quad (2.19)$$

$$\hat{P}_{\Delta}^l = \hat{P}_p^{l-1} - K_{\Delta}^l \frac{\partial h^l(\hat{u}_p^{l-1})}{\partial u^l} \hat{P}_p^{l-1}; \quad (2.20)$$

$$K_p^l = \hat{P}_{\Delta}^l \cdot \frac{\partial h_p^{lT}(\hat{u}_{\Delta}^l)}{\partial u^l} \left[\frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta}^l)}{\partial u^l} \hat{P}_{\Delta}^l \frac{\partial h_p^{lT}(\hat{u}_{\Delta}^l)}{\partial u^l} + \sigma_{p,v}^2 \right]^{-1}; \quad (2.21)$$

$$\hat{u}_p^l = \hat{u}_{\Delta}^l + K_p^l [p^l - h_p^l(\hat{u}_{\Delta}^l)]; \quad (2.22)$$

$$\hat{P}_p^l = \hat{P}_{\Delta}^l - K_p^l \frac{\partial h^l(\hat{u}_{\Delta}^l)}{\partial u^l} \hat{P}_{\Delta}^l, \quad (2.23)$$

де \hat{u}_{Δ}^l , \hat{u}_p^l – оцінка вектора стану u^l на l -му кроці; \hat{P}_{Δ}^l , \hat{P}_p^l – кореляційна матриця помилки оцінки вектора стану u^l на l -му кроці; K_{Δ}^l , K_p^l – коефіцієнти підсилення фільтра;

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_p^{l-1})}{\partial u^l} = & \left[\frac{\hat{x}^{l-1} - x_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{x}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; \right. \\ & \frac{\hat{y}^{l-1} - y_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{y}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; \\ & \left. \frac{\hat{z}^{l-1} - z_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}} - \frac{\hat{z}^{l-1}}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1})^2 + (\hat{y}^{l-1})^2 + (\hat{z}^{l-1})^2}}; -1 \right]; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta}^l)}{\partial u^l} = & \frac{-10 \cdot a}{\ln(10)} \cdot \left[\frac{\hat{x}^{l-1} - x_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}; \right. \\ & \frac{\hat{y}^{l-1} - y_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}; \frac{\hat{z}^{l-1} - z_s}{(\hat{x}^{l-1} - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1} - y_s)^2 + (\hat{z}^{l-1} - z_s)^2}; 0 \left. \right]. \end{aligned}$$

Розроблений алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі (2.18) ... (2.23) є нелінійним і відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної щільності ймовірності. У ньому враховується дисперсія помилки вимірювання потужності, а також оцінюється невідома помилка вимірювання часу приходу сигналу опорного датчика v_0 . Після формування початкових умов на основі вимірів часу прийому сигналів від чотирьох датчиків, він дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження виміряних різниць дальностей і потужностей прийнятих сигналів від відповідних датчиків мережі (рис. 2.15).

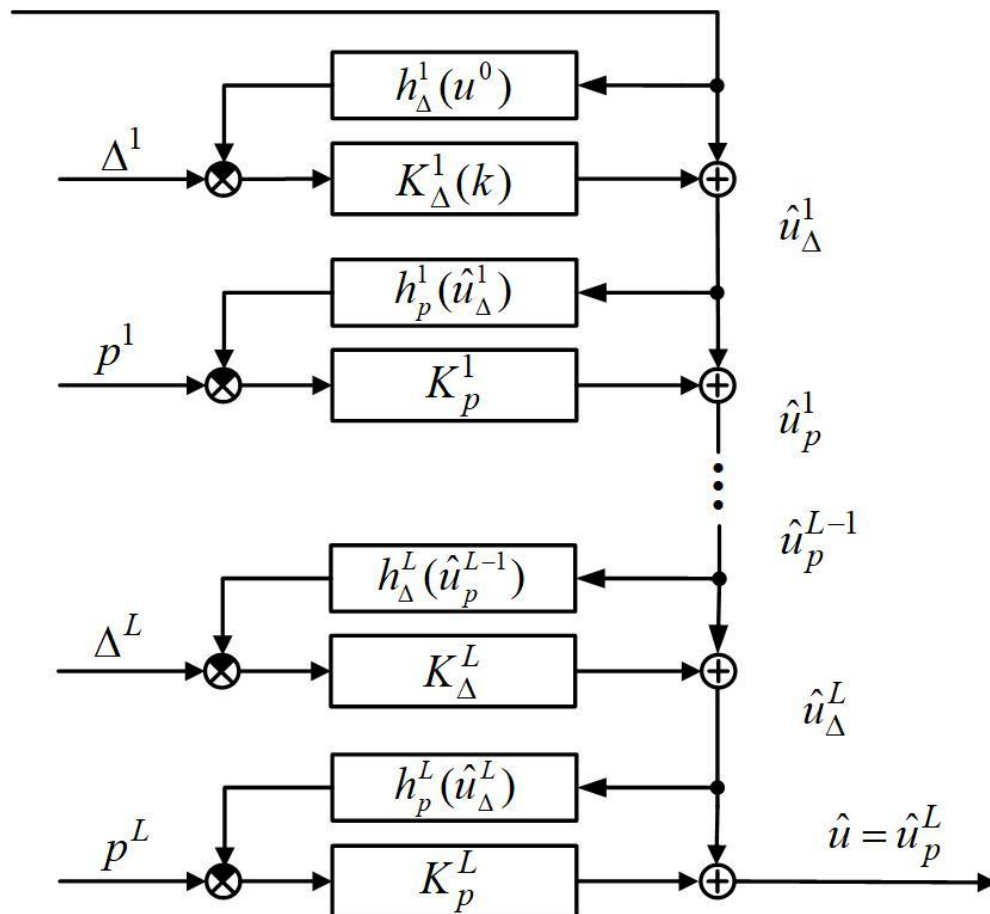


Рис. 2.15. Структурна схема рекурентного алгоритму

2.6 Аналіз ефективності рекурентного алгоритму визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань

Аналіз ефективності рекурентного алгоритму (2.18)...(2.23) і його порівняння з розробленими рекурентними алгоритмами в розділі 2, параграфи 1 та 3 проведені за допомогою статистичного моделювання.

Моделювання алгоритмів проведено для конфігурації сенсорної мережі (рис. 2.1). БПЛА розташовується по колі з радіусом 300 м. СКВ помилок вимірювань при використанні TDOA- і RSS- вимірювань $\sigma_{\Delta} = 1\text{ м}$ і $\sigma_p = 0.5\text{ дБ}$, відповідно. Як показник ефективності використовувалося кругове СКВ $\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2}$.

На рис. 2.16 і рис. 2.17 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ (крива 8) і теоретичного $\hat{\sigma}_{\Phi K}$ (крива 9) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, для рекурентного алгоритму (2.18)...(2.23) на основі TDOA- і RSS-вимірювань (виміри часу і потужності) від дев'яти датчиків рис. 2.1, а. Отримані фактичні і теоретичні значення СКВ добре узгоджуються між собою, що свідчить про правильну роботу алгоритму. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ коливається в межах від 3 до 5 м. Як випливає з рис. 2.16 об'єднання вимірювань дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 3 рази.

На рис. 2.16 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (криві 2,4) і теоретичного $\hat{\sigma}_{KK}$ (криві 3,5) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для розроблених алгоритмів в розділі 2, параграфах 1 і 3.

На рис. 2.16 показано кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1), і характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА рекурентного

алгоритму близькі до відповідних значень кругових СКВ нижній границі Рао-Крамера, що свідчить про високу ефективність алгоритму. Значення кругового СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА розробленим алгоритмом на основі TDOA- і RSS- вимірювань, менше ніж СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА для розроблених алгоритмів в розділі 2, параграфах 1 і 3 в 3 рази.

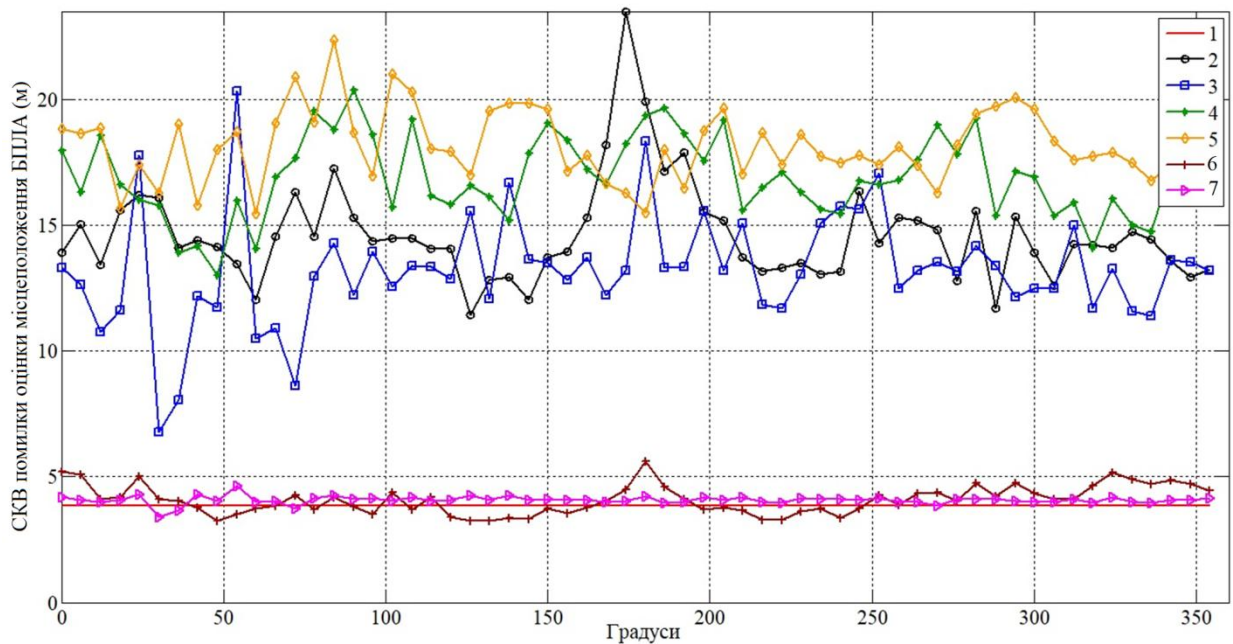


Рис. 2.16. Кругові СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА

На рис. 2.18 показані залежності фактичних СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА за координатами X (крива 1) і Y (крива 2) розробленими алгоритмом. Значення СКВ коливається в межах від 2 до 7 м.

На рис. 2.19 показана динаміка зміни фактичного (крива 1) і теоретичного (крива 2) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні рекурентного алгоритму при фіксованих координатах БПЛА x, y . Застосування рекурентного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 4 рази відносно початкових умов.

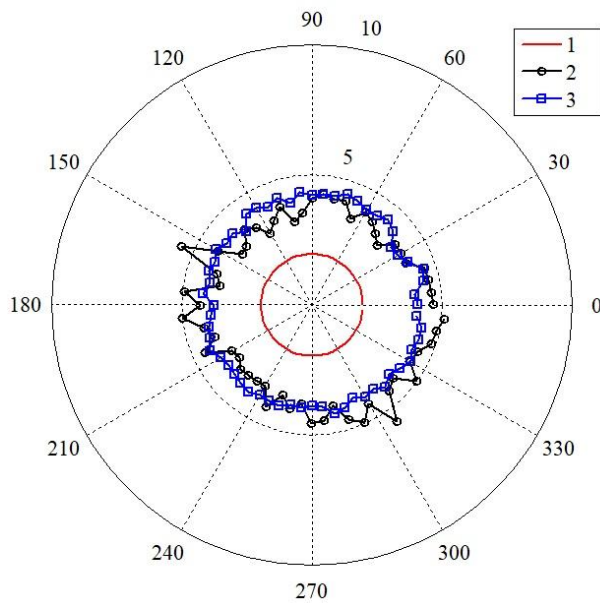


Рис. 2.17. Кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для рекурентного адаптивного алгоритму.

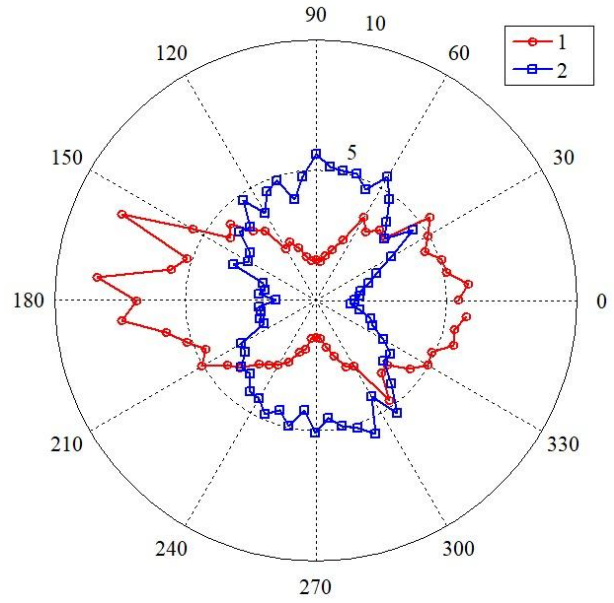


Рис. 2.18. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА для X і Y.

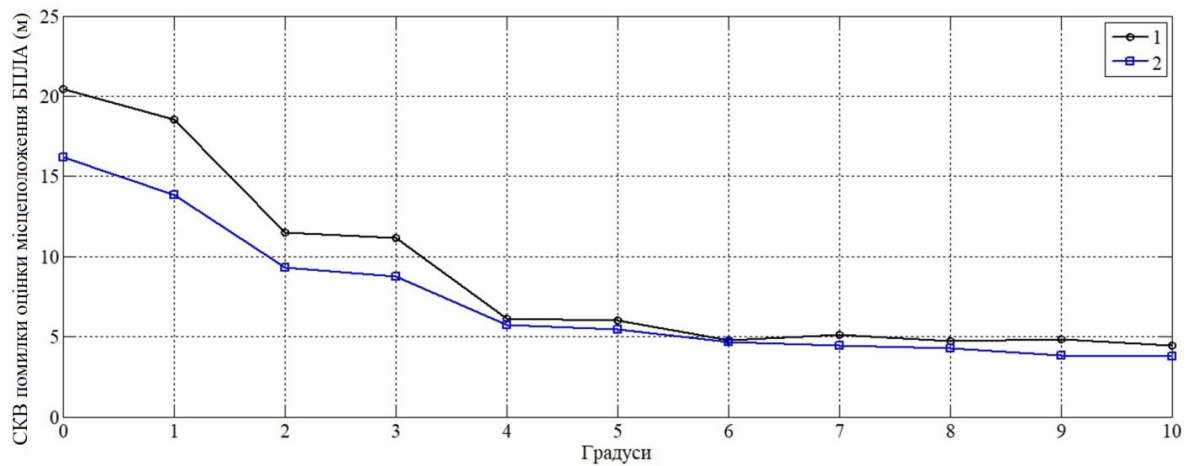


Рис. 2.19. Динаміка зміни кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при послідовному надходженні даних.

2.7 Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань

Узагальненою характеристикою систем пасивної локації є сімейство ізоліній СКВ вимірювання дальності σ_r БПЛА, побудованих в координатах x, y [27].

Графіки сімейства ізоліній для випадку СКВ помилки вимірювання різниці відстаней $\sigma_\Delta = 3$ м, СКВ помилки вимірювання потужності $\sigma_p = 1.5$ м,

побудовані для трьох конфігурацій сенсорної мережі з різним числом датчиків розташованих на колі 100 м. Кожна ізолиня, починаючи від центру, обмежує область, де помилка не перевищує 50 м, 150 м, 250 м, 350 м, відповідно. Задаючи, таким чином, допустиме значення СКВ $\sigma_{r_{\text{доп}}}$ можна визначити область відстаней, в якій значення СКВ буде дорівнювати $\sigma_r \leq \sigma_{r_{\text{доп}}}$. За швидкістю зміни відстаней між ізолініями можна також виявити азимутальні напрямки, де помилки по мірі віддалення від центру зростають повільніше або швидше [69,70].

Перша конфігурація сенсорної мережі показана на рис. 2.20. Сенсорна мережа складається з чотирьох датчиків з координатами: $D_0 (0;0)$, $D_1 (100;0)$, $D_2 (-50;86.6)$, $D_3 (-50;-86.6)$.

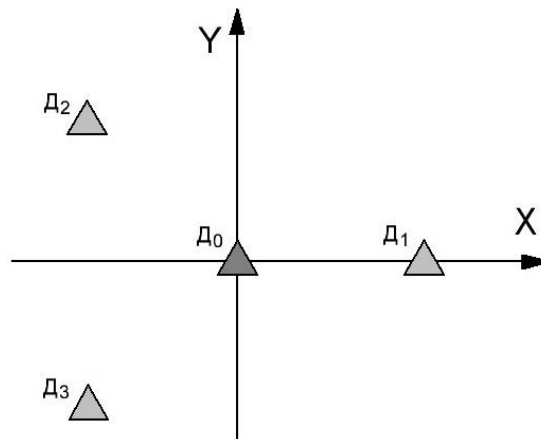


Рис. 2.20. Конфігурація сенсорної мережі з 4 датчиків

При TDOA-вимірюваннях рис. 2.21, СКВ помилки визначення місцеположення, в залежності від напрямку носить нерівномірний характер, на азимутах 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300° воно росте найбільш повільно, а на азимутах 30° , 90° , 150° , 210° , 270° і 330° – найбільш швидко. Перша послідовність азимутів в цьому сенсі відповідає сприятливим напрямками, друга – несприятливим. Очевидно, що дані про точностні характеристики за вказаним напрямком дозволяють досить повно судити про можливості даної системи. СКВ помилки визначення місцеположення на азимутах 0° , 60° , 120° , 180° , 240° , 300° на відстані 287 м не перевищуватиме

допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 475 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 603.9 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 706 м – $\sigma_r \leq 350$ м. СКВ помилки визначення місцеположення на азимутах 30° , 90° , 150° , 210° , 270° и 330° на відстані 163 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 310.227 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 416.293 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 492.443 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

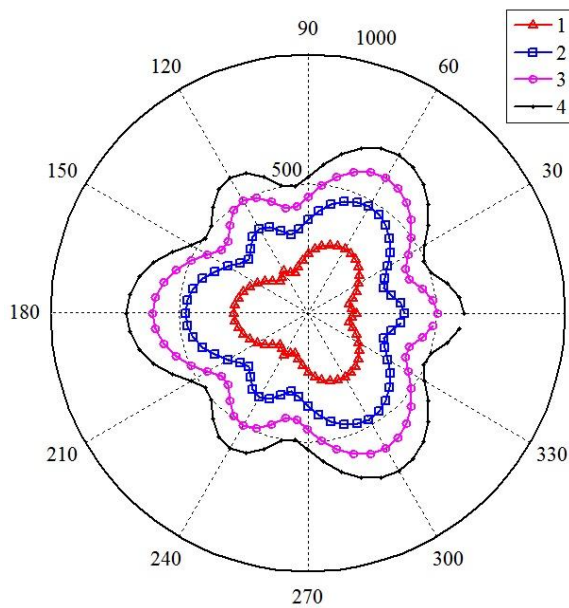


Рис. 2.21. TDOA-вимірювання

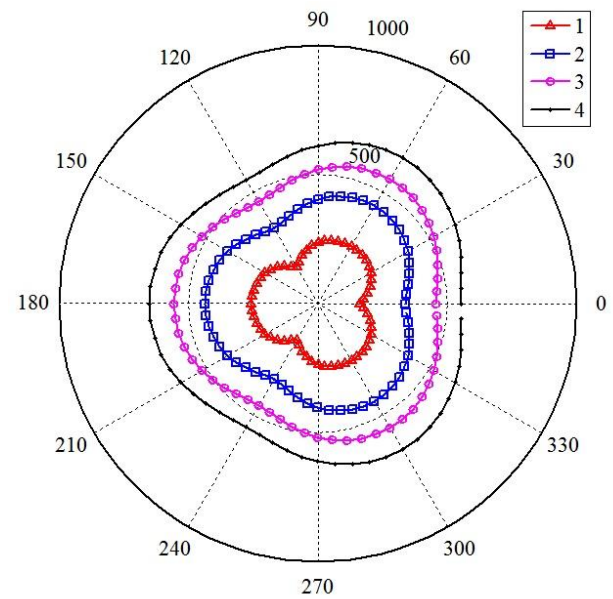


Рис. 2.22. RSS-вимірювання

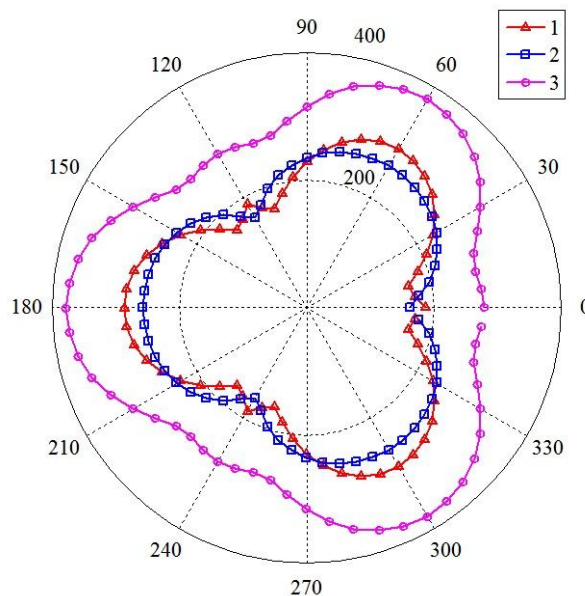


Рис. 2.23. TDOA- і RSS- вимірювання

Для RSS-вимірювань рис. 2.22, СКВ помилки на азимутах 60° , 180° , 300° зростають найбільше повільно, а на азимутах 0° , 120° , 240° – більш швидко. СКВ помилки визначення місцеположення на азимутах 60° , 180° , 300° на відстані 257 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на відстані 437 м – $\sigma_r \leq 150\text{м}$, на відстані 556 м – $\sigma_r \leq 250\text{м}$, на відстані 652 м – $\sigma_r \leq 350\text{м}$. СКВ помилки визначення місцеположення на азимутах 0° , 120° , 240° на відстані 162 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на відстані 338 м – $\sigma_r \leq 150\text{м}$, на відстані 457 м – $\sigma_r \leq 250\text{м}$, на відстані 553 м – $\sigma_r \leq 350\text{м}$.

Після об'єднання TDOA- і RSS- вимірювань рис. 2.23, СКВ помилки на азимутах 60° , 180° , 300° зростають більш повільно, а на азимутах 0° , 120° , 240° – більш швидко, ніж на інших азимутах. Помилка визначення місцеположення на азимутах 60° , 180° , 300° на відстані 379 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$. Помилка визначення місцеположення на азимутах 0° , 120° , 240° на відстані 271 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$.

Друга конфігурація сенсорної мережі показана на рис. 2.24. Сенсорна мережа складається з п'яти датчиків з координатами: $D_0 (0;0)$, $D_1 (100;0)$, $D_2 (30.9;95.1)$, $D_3 (-80.9;58.7)$, $D_4 (-80.9;-58.7)$, $D_5 (95.1;-30.9)$.

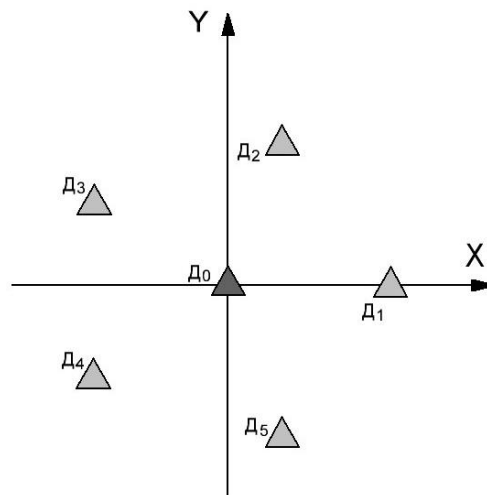


Рис. 2.24. Конфігурація сенсорної мережі з 6 датчиків

Для TDOA-вимірювань рис. 2.25, СКВ помилки на азимутах 0° - 360° коливається. СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 254-300 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 441-508 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 578-649 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 690-762 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

Для RSS-вимірювань рис. 2.26, СКВ помилки на азимуті 0° - 360° також коливається. СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 256-276 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 452-461 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 586-591 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 693-697 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

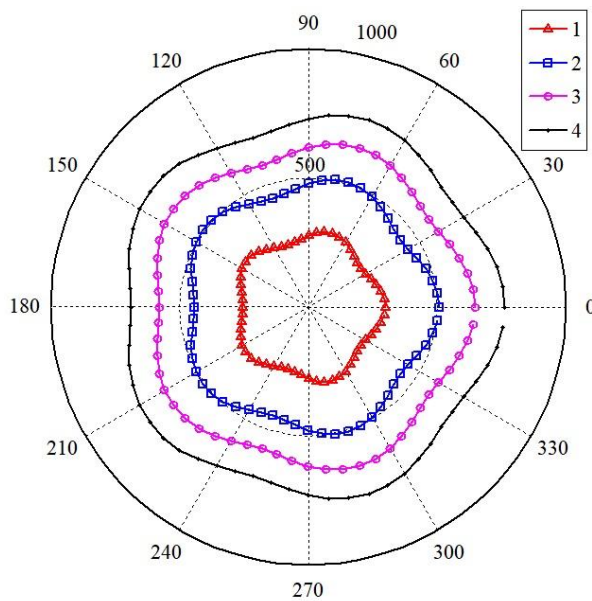


Рис. 2.25. TDOA-вимірювання

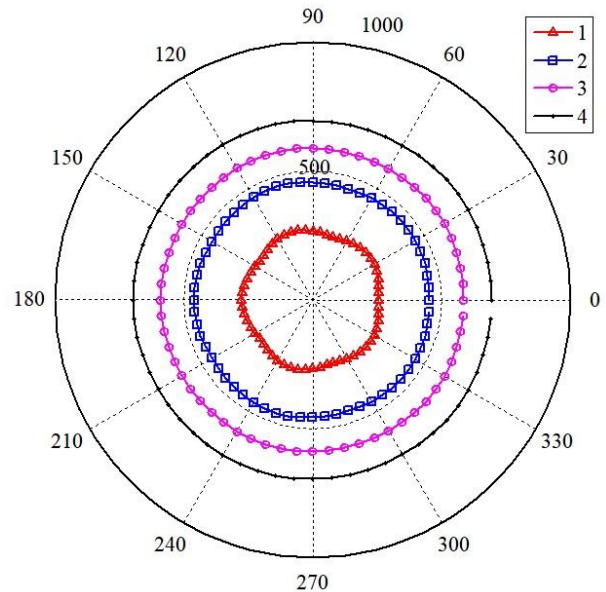


Рис. 2.26. RSS-вимірювання

Після об'єднання TDOA- і RSS- вимірювань рис. 2.27, СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 469-395 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м.

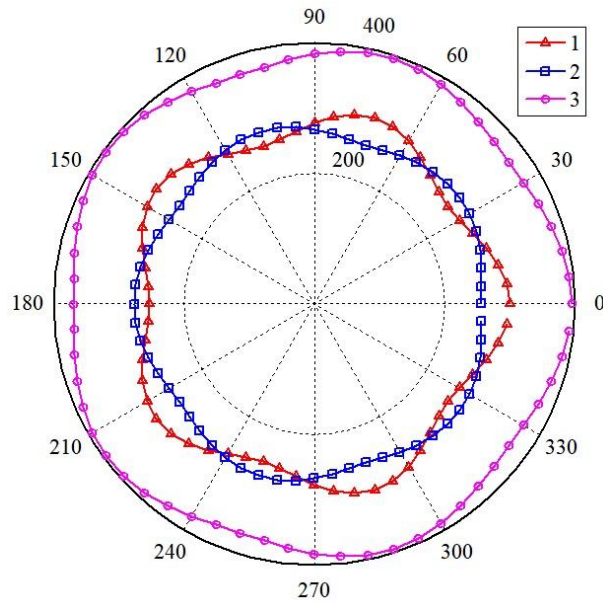


Рис. 2.27. TDOA- и RSS- измерения

Третя конфігурація сенсорної мережі показана на малюнку 2.28. Сенсорна мережа складається з дев'яти датчиків з координатами: Д0 (0;0), Д1 (0;100), Д2 (70.71;70.71), Д3 (100;0), Д4 (70.71;-70.71), Д5 (0;-100), Д6 (-70.71;-70.71), Д7 (-100;0), Д8 (-70.71;70.71).

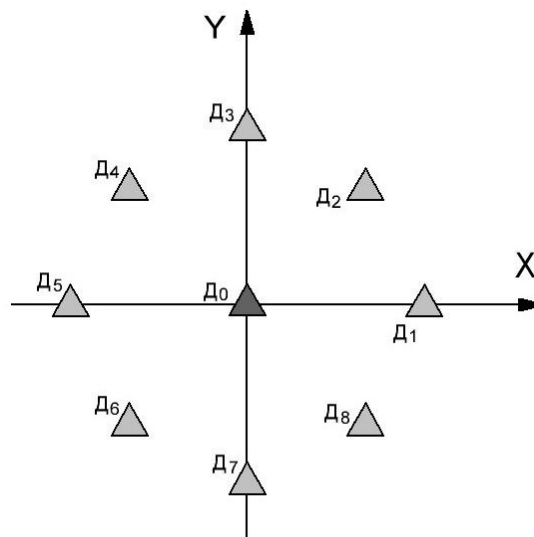


Рис. 2.28. Конфігурація сенсорної мережі з 9 датчиків

Для TDOA-вимірювань рис. 2.29, СКВ помилки на азимуті 0° - 360° зростають рівномірно. СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 309 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на відстані 528 м – $\sigma_r \leq 150\text{м}$, на відстані 680 м – $\sigma_r \leq 250\text{м}$, на відстані 804 м – $\sigma_r \leq 350\text{м}$.

Для RSS-вимірювань рис. 2.30, СКВ помилки на азимуті 0° - 360° ростуть рівномірно. СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 299 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 513 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 661м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 781 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

Після об'єднання TDOA- і RSS- вимірювань рис. 2.31, СКВ помилки визначення місцеположення на відстані 426 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м.

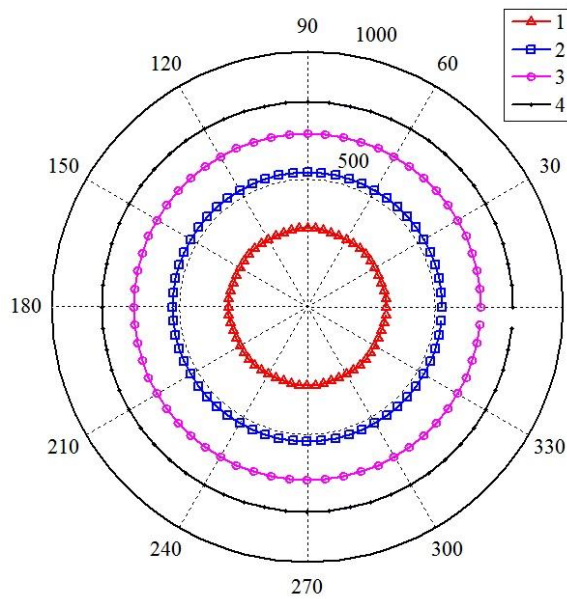


Рис. 2.29. TDOA-вимірювання

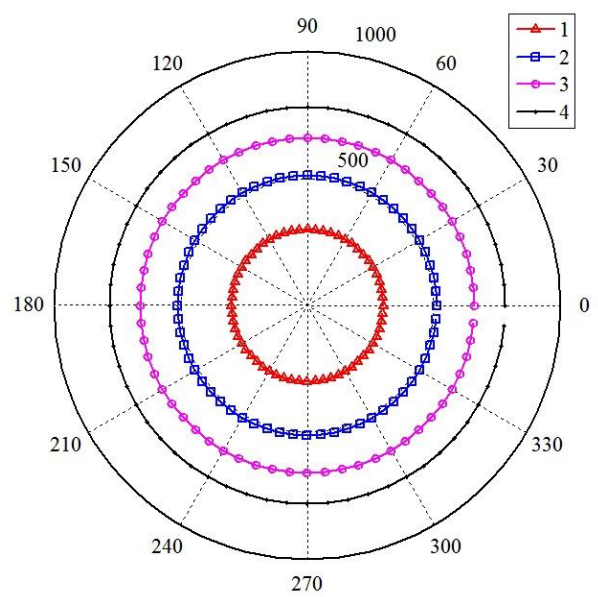


Рис. 2.30. RSS-вимірювання

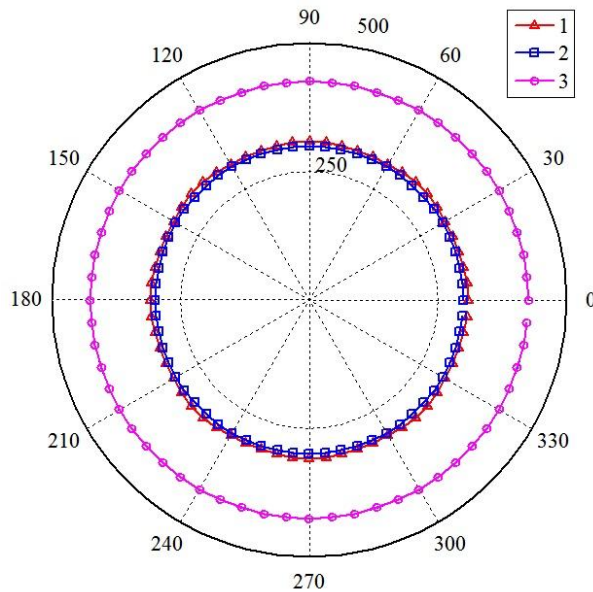


Рис. 2.31. TDOA- і RSS- вимірювання

З усіх розглянутих конфігурацій найбільш рівномірну область покриття і найменші помилки на великих відстанях має сенсорна мережа з дев'яти датчиків. При збільшенні числа датчиків понад дев'ять, істотного приросту в точності визначення місцеположення БПЛА не відбувається. Тому, розглянута топологія мережі з дев'яти датчиків, може бути рекомендована для використання на практиці, якщо напрямок появи цілі невідомий.

Була також досліджена конфігурація датчиків, яка володіє спрямованими властивостями. Конфігурація сенсорної мережі показана на рис. 2.32. Сенсорна мережа складається з п'яти датчиків з координатами: $D_0(0;0)$, $D_1(0;100)$, $D_2(0;-100)$, $D_3(-70.71;-70.71)$, $D_4(-70.71;70.71)$.

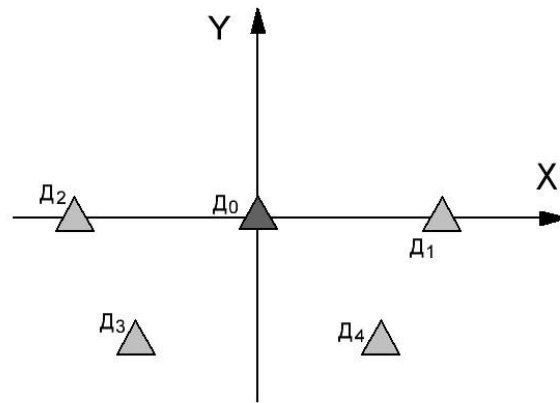


Рис. 2.32. Конфігурація сенсорної мережі з 4 датчиків

Для TDOA-вимірювань рис. 2.33, СКВ помилки на азимуті 90° , 270° ростуть більш повільно, а на азимутах 0° , 180° – більш швидко, ніж на інших азимутах. СКВ помилки визначення місцеположення на азимуті 90° на відстані 303 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на відстані 541 м – $\sigma_r \leq 150\text{м}$, на відстані 704 м – $\sigma_r \leq 250\text{м}$, на відстані 835 м – $\sigma_r \leq 350\text{м}$. СКВ помилки визначення місцеположення на азимуті 270° на відстані 326 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на відстані 559 м – $\sigma_r \leq 150\text{м}$, на відстані 720 м – $\sigma_r \leq 250\text{м}$, на відстані 852 м – $\sigma_r \leq 350\text{м}$. СКВ помилки визначення місцеположення на азимутах 0° , 180° на відстані 147 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на

відстані 224 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 268 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 302 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

Для RSS рис. 2.34, помилки на азимуті 90° , 270° ростуть більш повільно, а на азимутах 0° , 180° – більш швидко, ніж на інших азимутах. Помилка визначення місцеположення на азимуті 90° на відстані 238 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 445 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 585 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 699 м – $\sigma_r \leq 350$ м. Помилка визначення місцеположення на азимуті 270° на відстані 293 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 496 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 634 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 747 м – $\sigma_r \leq 350$ м. Помилка визначення місцеположення на азимутах 0° , 180° на відстані 225 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50$ м, на відстані 362 м – $\sigma_r \leq 150$ м, на відстані 457 м – $\sigma_r \leq 250$ м, на відстані 535 м – $\sigma_r \leq 350$ м.

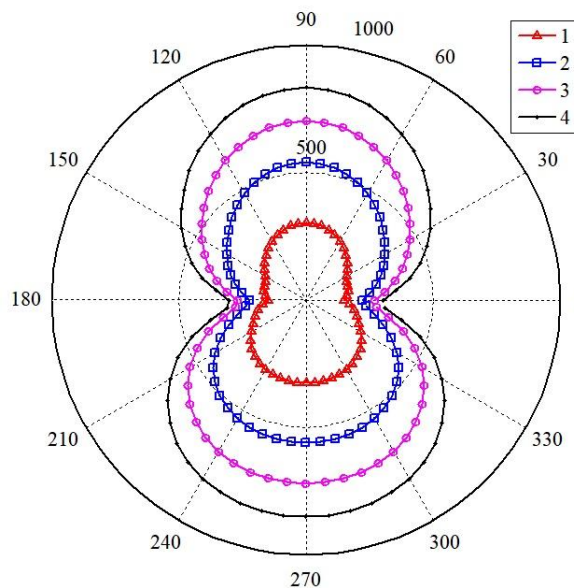


Рис. 2.33. TDOA-вимірювання

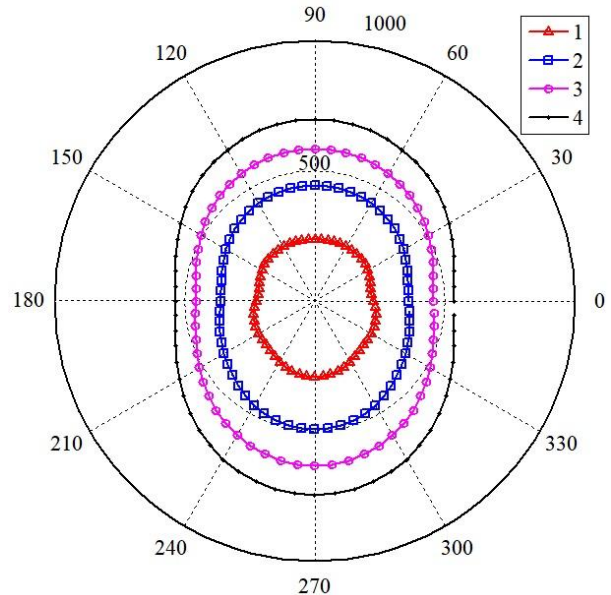


Рис. 2.34. RSS-вимірювання

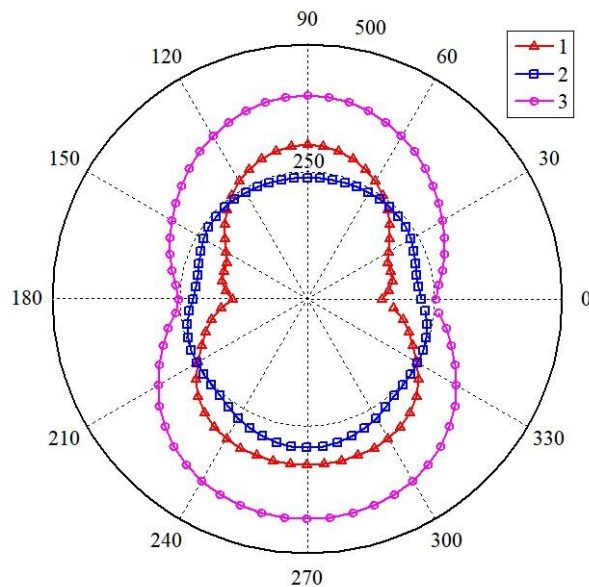


Рис. 2.35. TDOA- і RSS- вимірювання

Після об'єднання вимірювань TDOA і RSS рис. 2.35, помилка визначення місцеположення на азимуті 90° на відстані 400 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на азимуті 270° на відстані 433 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$, на азимутах 0° , 180° на відстані 252 м не перевищуватиме допустимого значення $\sigma_r \leq 50\text{м}$.

Розглянута конфігурація сенсорної мережі з п'яти датчиків, дозволяє в заданих секторах отримати більш високі точностні характеристики при меншій кількості датчиків в порівнянні з конфігурацією мережі з дев'яти датчиків, що забезпечує рівномірну область покриття.

Висновки по другому розділу

1. Розроблений алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі (2.4)...(2.6) є нелінійним і відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної ЩЙ. Він також є адаптивним, оскільки в ньому поряд з оцінюванням координат БПЛА визначається оцінка невідомої помилки вимірювання опорного датчика v_0 . Після формування початкових умов на основі вимірювання часу приходу сигналів від чотирьох датчиків, він

дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження вимірювань від інших датчиків.

2. Як впливає з результатів моделювання, застосування розробленого рекурентного алгоритму (2.4)...(2.6) дозволяє в порівнянні з початковими умовами зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в 1.5 – 4.2 рази і отримати характеристики близькі до потенційно досяжних, визначених нижньою границею Рао-Крамера.

3. Для реалізації розробленого рекурентного адаптивного алгоритму (2.4)...(2.6) потрібно в 2.7 рази менше обчислювальних витрат у порівнянні з алгоритмом квадратичної корекції.

4. Розроблений алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі (2.12)...(2.14) є нелінійним і відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної ЩЙ. У розробленому алгоритмі враховується дисперсія помилки вимірювання потужності. Після формування початкових умов на основі вимірювань потужності сигналів від трьох датчиків, він дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження вимірювань від інших датчиків.

5. Як впливає з результатів моделювання застосування розробленого рекурентного алгоритму (2.12)...(2.14) дозволяє в порівнянні з алгоритмами, в яких не враховується дисперсія помилки вимірювання потужності, зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА на 36 – 44% і отримати характеристики близькі до потенційно досяжних, визначених нижньою границею Рао-Крамера.

6. Розроблений алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі (2.18)...(2.23) є нелінійним і відноситься до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної ЩЙ. У розробленому алгоритмі враховується дисперсія помилки вимірювання потужності, а також оцінюється невідома помилка вимірювання часу приходу сигналу опорного

датчика v_0 . Після формування початкових умов на основі вимірювань часу прийому сигналів від чотирьох датчиків, він дозволяє рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження виміряних різниць відстаней і потужностей прийнятих сигналів від відповідних датчиків мережі.

7. Як впливає з результатів моделювання, значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА розробленим алгоритмом (2.18)...(2.23) при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань, менше ніж СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА при їх роздільному використанні, в 3 рази.

8. Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно на колі, забезпечують вид ізоліній, що обмежують область в яких кругове СКВ не перевищує задане значення, також у вигляді кіл в горизонтальній площині. При подальшому збільшенні числа датчиків, істотного приросту в точності визначення місцеположення БПЛА не відбувається. І вона може бути рекомендована, якщо напрямок появи цілі невідомий. Розглянута конфігурація сенсорної мережі з п'яти датчиків, яка володіє спрямованими властивостями, дозволяє в заданих секторах отримати більш високі точностні характеристики при меншій кількості датчиків в порівнянні з конфігурацією мережі з восьми датчиків, що забезпечує рівномірну область покриття.

РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА МЕТОДІВ АДАПТИВНОГО ОЦІНЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ РУХУ МАНЕВРУЮЧОГО БПЛА НА ОСНОВІ TDOA- І RSS- ВИМІРЮВАНЬ СЕНСОРНОЇ МЕРЕЖІ

У розділі 3 на основі математичного апарату змішаних марківських процесів в дискретному часі синтезовано оптимальні та квазіоптимальні алгоритми адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі:

- TDOA-вимірювань;
- RSS-вимірювань;
- комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань.

Аналіз отриманих квазіоптимальних алгоритмів виконано за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ на прикладі оцінювання параметрів руху БПЛА, що виконує на випадкових часових інтервалах заздалегідь невідомі види маневрів.

3.1 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань

Рух БПЛА з різними видами маневру в прямокутній системі координат можна описати стохастичною динамічною системою з випадковою структурою виду [71]:

$$u^{tr}(k) = F_j^{tr} u^{tr}(k-1) + G_j^{tr} \omega^{tr}(k), \quad j = \overline{1, M}; \quad (3.1)$$

де $u^{tr}(k)$ – вектор стану, що включає параметри руху БПЛА по осях прямокутної системи координат; F_j^{tr} , G_j^{tr} – матриці, що описують різні види руху; $\omega^{tr}(k)$ – некорельована послідовність гаусівських векторів з одиничною кореляційною матрицею.

Для опису типу структури моделі руху БПЛА (3.1), що відповідає певному виду маневру, застосовується змінна перемикачання $a_j(k)$, $j = \overline{1, M}$. Вона відноситься до класу кіл Маркова, з матрицею ймовірностей переходів $\Pi_{i,j}(k, k-1)$, $i, j = \overline{1, M}$ і початковими ймовірностями $w_i(0)$, $i = \overline{1, M}$, що дозволяє врахувати переходи між різними видами руху БПЛА в випадкові моменти часу.

За час поширення сигналу від БПЛА до датчиків мережі його координати не змінюються. Тому вважається, що вимірювання різниць відстаней між датчиками і опорним датчиком надходять в k -й момент часу, в якості якого використовується момент надходження сигналу на опорний датчик з координатами x^0, y^0, z^0 [72, 73]. При цьому рівняння TDOA-вимірювань описується виразом (1.2).

Необхідно на основі моделі руху БПЛА (3.1) і рівняння спостереження сенсорної мережі (1.2) синтезувати оптимальний і квазіоптимальний адаптивні алгоритми фільтрації параметрів руху БПЛА за даними сенсорної мережі, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.

Наявність корельованої помилки ускладнює використання рекурентних алгоритмів оптимальної фільтрації. Як показано в підрозділі 2.1, ці труднощі можна обійти шляхом введенням помилки вимірювань опорного датчика в вектор стану оцінюваних параметрів. Для вирішення сформульованої задачі, вектор стану процесу, що підлягає фільтрації в розглянутій задачі, можна представити у вигляді $u^T(k) = (u^{trT}(k), v^0(k))$. Він включає вектор параметрів руху БПЛА $u^{tr}(k)$ і помилку вимірювання опорного датчика $v^0(k)$ на поточному такті k . При цьому модель процесу, що підлягає фільтрації, перетвориться до виду

$$u(k) = F_j u(k-1) + G_j \omega(k), \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.2)$$

в якому матриці F_j і G_j мають вид

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad G_{\Delta j} = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 \\ 0 & \sigma_{\Delta} \end{bmatrix}.$$

Рівняння спостереження, яке описує процес вимірювання координат БПЛА сенсорною мережею, має вид

$$\Delta^s(k) = h^s(u(k)) + v^s(k), \quad s = \overline{1, S}, \quad (3.3)$$

де $\Delta^s(k)$ – виміряна різниця відстаней між s -м датчиком і опорним датчиком в k -й момент часу, $s = \overline{1, S}$; $v^s(k)$ – помилка вимірювання s -го датчика з дисперсією σ_{Δ}^2 ; $h^s(u(k))$ – нелінійна функція, яка при вимірюванні в просторі описується виразом

$$h^s(u(k)) = \sqrt{(x(k) - x_s)^2 + (y(k) - y_s)^2 + (z(k) - z_s)^2} - \sqrt{x^2(k) + y^2(k) + z^2(k)} - v^0(k); \quad (3.4)$$

$x(k), y(k), z(k)$ – координати положення БПЛА; $v^0(k)$ – помилка вимірювань відстаней опорним датчиком з дисперсією σ_{Δ}^2 . Вимірювання, отримані від всіх датчиків на k -му кроці, позначимо у вигляді вектора $\xi(k) = (\Delta^1(k), \dots, \Delta^S(k))^T$.

У рівнянні (3.3) помилки вимірювання $v^s(k)$, $s = \overline{1, S}$ є незалежними.

Включення $v^0(k)$ в вектор стану $u(k)$, дозволяє одночасно з рішенням основної задачі оцінювання параметрів руху БПЛА, також оцінювати помилку вимірювання опорного датчика на k -му кроці.

Рівняння (3.2) описує процес, який підлягає оцінюванню, а (3.3) – процес формування даних, доступних спостереженню. Застосовуючи методику розширення вектора стану фільтруючого процесу, розглянуту в монографії [56], можна показати, що розширений процес $(u(k), a_j(k))$, що включає неперервний компонент $u(k)$ і дискретний компонент $a_j(k)$ відноситься до класу змішаних марківських процесів в дискретному часі.

Завдання синтезу оптимального алгоритму зводиться до обчислення апостеріорної ЩЙ розширеного процесу $W(u(k), a_j(k)) = P(u(k), a_j(k) / \Xi_\Delta(k))$, де $\Xi(k) = \xi(1), \dots, \xi(k)$ – отримана послідовність вимірювань до k -го моменту включно. Вводячи також позначення екстрапольованої ЩЙ $W^*(u(k), a_j(k)) = P(u(k), a_j(k) / \Xi(k-1))$ розширеного процесу і слідуючи методиці синтезу, розглянутої в монографії [56], можна показати, що оптимальний алгоритм фільтрації може бути представлений у вигляді двох рекурентних рівнянь

$$W^*(u(k), a_j(k)) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(u(k) / u(k-1), a_j(k)) \times \\ \times W(u(k-1), a_i(k-1)) du(k-1); \quad (3.5)$$

$$W(u(k), a_j(k)) = P(\xi(k) / u(k)) W^*(u(k), a_j(k)) / P(\xi(k) / \Xi(k-1)), \quad (3.6)$$

де $P(\xi(k) / u(k)) = \prod_{s=1}^S P(\Delta^s(k) / u(k))$ – однокрокова функція правдоподібності, що визначається на основі вимірів $\xi(k)$, отриманих від всіх датчиків на k -му кроці; $P(\Delta^s(k) / u(k))$ – функція правдоподібності, що визначається на основі вимірювання s -го датчика на k -му кроці $\Delta^s(k)$ з використанням рівняння (3.4); $\Pi(u(k) / u(k-1), a_j(k))$ – умовна ЩЙ, що визначається за допомогою рівняння (3.2); $\Xi(k) = \xi(1), \dots, \xi(k)$ – отримана послідовність вимірювань.

Рівняння (3.5) описує еволюцію екстрапольованої ЩЙ $W^*(u(k), a_j(k))$ і є оптимальним алгоритмом екстраполяції ЗМП $(u(k), a_j(k))$ на один крок. За допомогою співвідношення (3.6) проводиться уточнення екстрапольованої ЩЙ на основі отриманого виміру $\xi(k)$ і визначається апостеріорна ЩЙ $W(u(k), a_j(k))$.

Подальше перетворення виразів (3.5), (3.6) може бути виконано за допомогою теореми множення ймовірностей. При цьому оптимальний

алгоритм фільтрації можна представити у виді такої системи рекурентних рівнянь [56]

$$W_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1); \quad (3.7)$$

$$W_j^*(u(k)) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \Pi(u(k)/u(k-1), a_j(k)) W_i(u(k-1)) du(k-1) / W_j^*(k); \quad (3.8)$$

$$W_j(u(k)) = P(\xi(k)/u(k)) W_j^*(u(k)) / P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1)); \quad (3.9)$$

$$W_j(k) = P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1)) W_j^*(k) / P(\xi(k)/\Xi(k-1)), \quad (3.10)$$

де $W_j^*(u(k))$, $W_j(u(k))$ – умовні екстрапольована і апостеріорна ЩЙ вектора $u(k)$ за умови $a_j(k)$; $W_j^*(k)$, $W_j(k)$ – екстрапольовані і апостеріорні ймовірності $a_j(k)$; $P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1))$ – умовна ЩЙ, що визначається за формулою

$$P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1)) = \int_{-\infty}^{\infty} P(\xi(k)/u(k)) W_j(u(k)) du(k),$$

$P(\xi(k)/\Xi(k-1))$ – визначається за формулою

$$P(\xi(k)/\Xi(k-1)) = \sum_{j=1}^M P(\xi(k)/a_j(k), \Xi(k-1)) W_j^*(k).$$

Початкові умови для алгоритму (3.7) ... (3.10) мають вид

$$W_i(0) = w_i(0), W_i(u(0)) = P(u(0)), i = \overline{1, M}.$$

За допомогою рівнянь (3.7), (3.10) виконується фільтрація дискретних компонентів, а рівнянь (3.8), (3.9) – фільтрація неперервного компонента. Особливість алгоритму полягає в нерозривному зв'язку рівнянь фільтрації дискретного і неперервного компонентів.

Оптимальний пристрій, що реалізує алгоритм (3.7)...(3.10), є багатоканальним з числом каналів M рис. 3.1. Кожен канал складається з блоку прогнозу (БП), в якому обчислюються екстрапольовані розподіли $W_j^*(u(k))$ і $W_j^*(k)$, і блоку фільтрації (БФ), в якому обчислюються умовна апостеріорна ЩЙ $W_j(u(k))$ і ненормована апостеріорна міра $W_j'(k) = P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1))W_j^*(k)$. Обчислені апостеріорні розподілення з виходів кожного каналу з затримкою на один такт надходять по лініях зворотного зв'язку в БП інших каналів оптимального пристрою, а також на вхід вирішального пристрою (ВП), в якому визначається поточні оцінки неперервного $\hat{u}^B(k)$ і дискретного $\hat{a}_i^B(k)$ ЗМП. Оптимальний пристрій відноситься до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. Наявність зворотного зв'язку між каналами обумовлено марківською властивістю дискретного компонента $a_j(k)$.

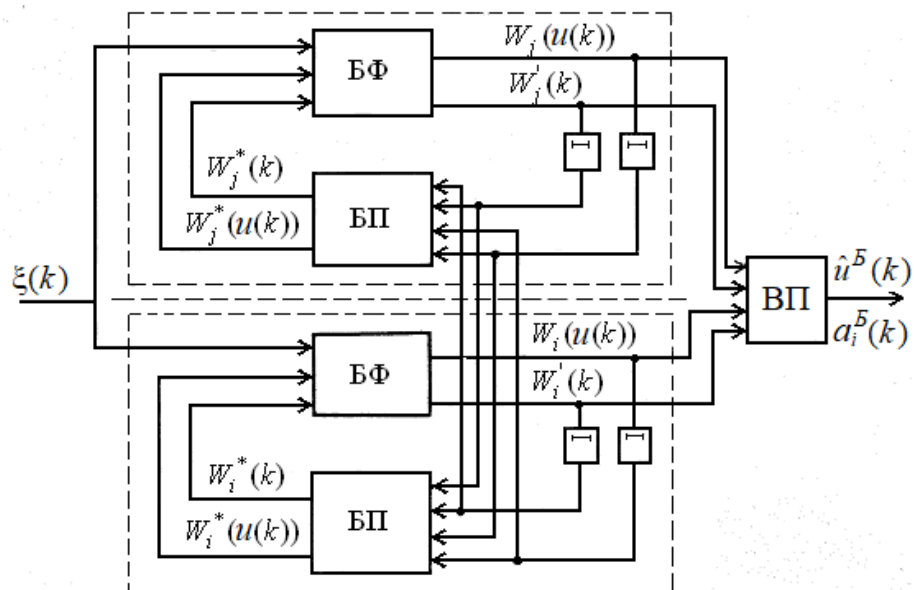


Рис. 3.1. Структурна схема оптимального фільтра

Недоліком оптимального алгоритму є великі обчислювальні затрати, пов'язані з необхідністю інтегрування багатовимірних ЩЙ. При синтезі квазіоптимального алгоритму будемо використовувати послідовний спосіб обробки даних, що надходять. Введемо індекс l , $l = \overline{1, S}$, який характеризує послідовність надходжень вимірювань від відповідних датчиків мережі.

Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання може бути отриманий шляхом розкладання нелінійних функцій в рівняннях (3.3) в ряд Тейлора в околиці отриманих оцінок вектора $u(k)$ і обмеження лінійними членами розкладання, а також застосуванням на кожному кроці гаусівської апроксимації умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$ [56]. При цьому рівняння обчислення умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$ (3.8) зводиться до обчислення її першого $u_j^*(k)$ і другого $P_j^*(k)$ моментів за формулами [74]

$$u_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) F \hat{u}_i(k-1) / W_j^*(k); \quad (3.11)$$

$$P_j^*(k) = \sum_{i=1}^M \Pi_{ij}(k, k-1) W_i(k-1) \{ F_j \hat{P}_i(k-1) F_j^T + G_j G_j^T \} / W_j^*(k); \quad (3.12)$$

Рівняння обчислення умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$ (3.9) при послідовній обробці вимірювань, що надходять, $\Delta^l(k), l = \overline{1, S}$ також зводиться до обчислення її першого $\hat{u}_j^l(k)$ і другого $\hat{P}_j^l(k)$ моментів з використанням рекурентної процедури [74]

$$K_j^l(k) = \hat{P}_j^{l-1}(k) \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} (D_j^l(k))^{-1}, \quad (3.13)$$

$$\hat{u}_j^l(k) = \hat{u}_j^{l-1}(k) + K_j^l(k) (\Delta^l(k) - h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))), \quad (3.14)$$

$$\hat{P}_j^l(k) = \hat{P}_j^{l-1}(k) - K_j^l(k) \frac{\partial h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_j^{l-1}(k), \quad (3.15)$$

де $\hat{u}_j^l(k)$, $\hat{P}_j^l(k)$ – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$, уточненої за вимірюванням $\Delta^l(k), l = \overline{1, S}$. При цьому початкові умови для процедури (3.13)...(3.15) при $l=0$ мають вид $\hat{u}_j^0(k) = u_j^*(k)$, $\hat{P}_j^0(k) = P_j^*(k)$, $j = \overline{1, M}$, а $\hat{u}_j^l(k) = \hat{u}_j^S(k)$, $\hat{P}_j^l(k) = \hat{P}_j^S(k)$, $j = \overline{1, M}$.

Перевагою методу є відсутність необхідності обернення матриць великої розмірності, оскільки $D_j^l(k)$ є скалярною величиною.

Алгоритм фільтрації дискретних компонентів не змінюється і описується рівняннями (3.7), (3.10). При цьому умовна ЩЙ $P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1)) = N(H(u_j^*(k)), D_j(k))$ є гаусівською, а величина $D_j(k)$ визначається за допомогою виразу

$$D_j^l(k) = \frac{\partial h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_j^{l-1}(k) \frac{\partial h^{lT}(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} + \sigma_{\Delta}^l(k). \quad (3.16)$$

Квазіоптимальний пристрій, що реалізує алгоритм (3.7), (3.10) ... (3.15), також є багатоканальним з числом каналів M і в основному зберігає структуру і всі зворотні зв'язки, властиві оптимальному пристрою. Їх відмінність полягає в тому, що в квазіоптимальному пристрої обчислюються тільки перший і другий моменти умовних ЩЙ $W_j^*(u(k))$ и $W_j(u(k))$. При цьому квазіоптимальний алгоритм дозволяє зберегти уявлення апостеріорної ЩЙ $W(u(k))$ у виді суми M гаусівських щільностей.

Структурна схема j -го каналу такого квазіоптимального фільтра показана на рис. 3.2.

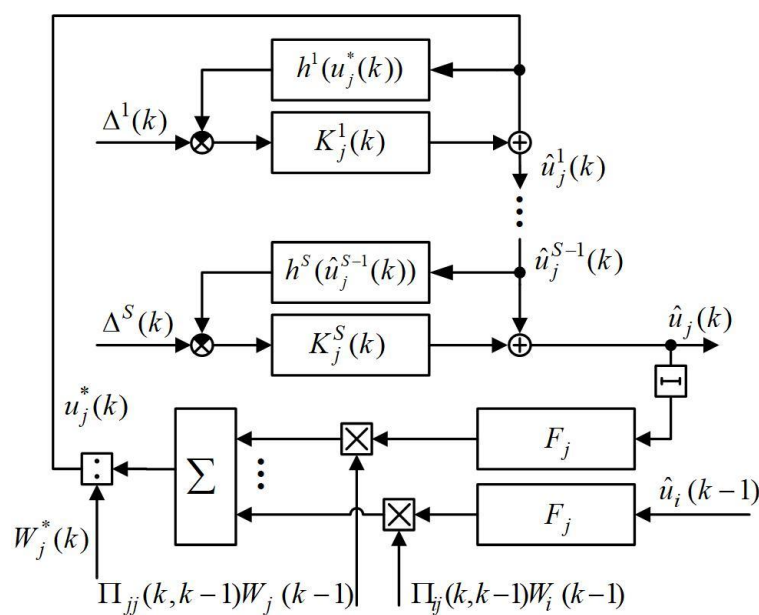


Рис. 3.2. Структурна схема одного каналу квазіоптимального фільтра при послідовній реалізації обчислень

Для визначення оцінок фільтруючого процесу широке застосування знаходить байєсівський критерій оптимальності, що дозволяє отримати нерандомізовані вирішальні правила [75]. Найбільш часто байєсівська оцінка визначається на основі мінімізації апостеріорного ризику, який, стосовно до розв'язуваної задачі, може бути записаний у виді:

$$\Gamma(\hat{u}^B(k), \hat{a}_i^B(k), \Xi(k)) = \min_{\substack{\check{u}(k), \check{a}_i(k)}} \sum_{i=1}^M \int_{-\infty}^{\infty} g_{ij}(\check{u}(k), u(k)) W(u(k), a_j(k)) du(k), \quad (3.17)$$

де $g_{ij}(\check{u}(k), u(k))$ – функція втрат; $\check{u}(k), \check{a}_i(k)$ – рішення, яке приймається; $\hat{u}^B(k), \hat{a}_i^B(k)$ – оптимальне рішення.

При вирішенні багатьох практичних завдань малим помилкам неперервного компонента відповідають менші втрати. У таких випадках застосовується функція втрат [76], проста по дискретному і квадратична по неперервному компонентам

$$g_{ij}(u(k), \check{u}(k)) = 1 - g_i \delta_{ij} \left[1 - c_i (u(k) - \check{u}(k))^T (u(k) - \check{u}(k)) \right], \quad (3.18)$$

де g_i, c_i – коефіцієнти втрат; δ_{ij} – символ Кронекера. Вона означає, що при будь-якому неправильному визначенні значень дискретного компонента втрати дорівнюють одиниці, а при правильному прийнятті рішення втрати містять член, пропорційний сумі квадратів помилок оцінки неперервного компонента.

В [51] показано, що вирішальне правило оцінювання неперервного $u(k)$ і дискретного $a_j(k)$ компонентів можна записати у виді

$$\hat{a}_i^B(k), \text{ якщо } g_i W_i(k) (1 - c_i sp(\hat{P}_i(k))) \geq g_j W_j(k) (1 - c_j sp(\hat{P}_j(k))), i \neq j, i, j = \overline{1, M} \quad (3.19)$$

$$\hat{u}^B(k) = \hat{u}_i(k). \quad (3.20)$$

З виразу (3.19) випливає, що вирішальне правило оцінювання дискретного компонента зводиться до максимізації зважених апостеріорних ймовірностей $W_i(k)$. При цьому ваги зменшуються зі збільшенням помилок оцінки неперервного компонента. В результаті при великих помилках може прийматися не та гіпотеза, апостеріорна ймовірність якої більше, а якась інша з меншою апостеріорною ймовірністю, але і з меншими помилками. Оцінка неперервного компонента дорівнює умовному апостеріорному математичному очікуванню $\hat{u}_i(k)$ (3.20).

Оцінки неперервного $u(k)$ і дискретного $a_j(k)$ компонентів за правилом (3.19), (3.20) обчислюються у вирішальному пристрої рис. 3.1.

Надалі в роботі використовується окремий випадок вирішального правила (3.19), (3.20), при якому в якості оцінки дискретного компонента вибирається гіпотеза, апостеріорна ймовірність якої максимальна, а неперервного – відповідне умовне апостеріорне математичне очікування $\hat{u}_i(k)$.

3.2 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань

Аналіз ефективності розробленого квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА (3.7), (3.10)...(3.15) проведено за допомогою статистичного моделювання.

Точностні характеристики синтезованих алгоритмів залежать від конфігурації системи та місцеположення цілі, тому їх аналіз і порівняння з відомими алгоритмами в третьому розділі виконані на площині.

Моделювання алгоритмів проведено для конфігурації сенсорної мережі на площині (рис. 3.3), яка складається з дев'яти датчиків для визначення місцеположення БПЛА з координатами: $D_0(0;0)$, $D_1(0;100)$, $D_2(70.71; 70.71)$,

$D_3 (100;0)$, $D_4 (70.71; -70.71)$, $D_5 (0;-100)$, $D_6 (-70.71; -70.71)$, $D_7 (-100;0)$, $D_8 (-70.71; 70.71)$.

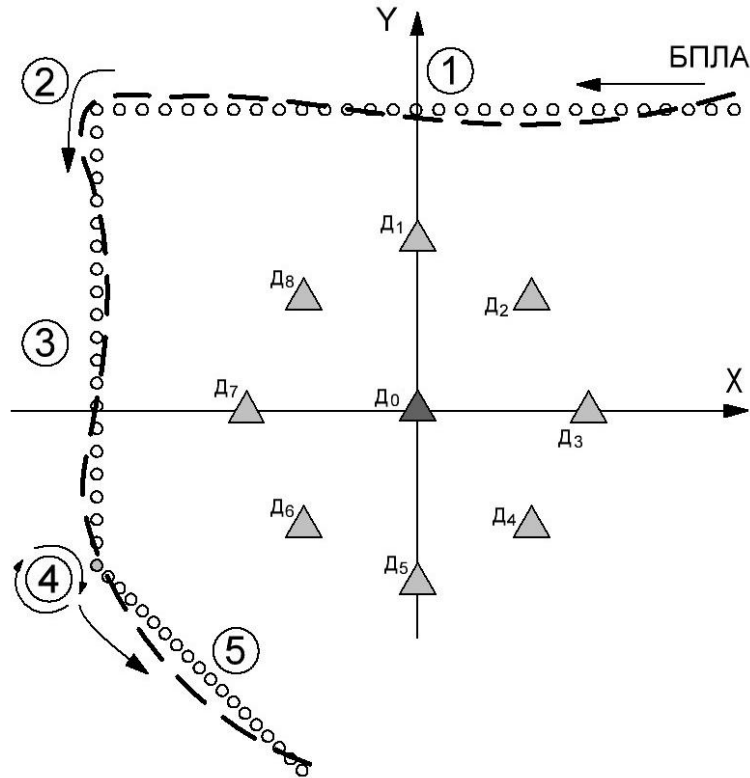


Рис. 3.3. Конфігурація сенсорної мережі з 9 датчиків і траєкторія руху БПЛА.

Для формування руху цілі використовувалася модель (3.1), (3.2). Для аналізу роботи алгоритму була сформована тестова траєкторія руху БПЛА (рис. 3.3). Траєкторія включає п'ять ділянок: перший $1 \leq k \leq 42$ – рівномірний рух, другий $43 \leq k \leq 45$ – маневр, третій $46 \leq k \leq 84$ – рівномірний рух, четвертий $85 \leq k \leq 114$ – зависання, п'ятий $115 \leq k \leq 130$ – рівномірний рух. СКВ помилки вимірювання $\sigma_{\Delta} = 2.1\text{м}$, темп надходження інформації $T=1\text{с}$. Випробування проводилися по ста реалізаціях.

Для опису руху БПЛА використовувалася модель з випадковою структурою (3.2), яка враховує три основних види руху $M=3$: зависання $j=1$, майже рівномірний рух $j=2$, рух з маневром $j=3$. Вектор стану $u^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), v^0(k))$ включає координати положення, швидкості і прискорення по осях X, Y . Матриці, що входять в модель руху (3.2), мають вид

$$F_j(k, k-1) = \begin{bmatrix} F_j^b & 0 & 0 \\ 0 & F_j^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, G_j(k) = \begin{bmatrix} G_j^b & 0 & 0 \\ 0 & G_j^b & 0 \\ 0 & 0 & \sigma \end{bmatrix},$$

де $F_j^b, G_j^b, j = \overline{1,3}$ мають вид

$$F_1^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_2^b = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_3^b = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.21)$$

$$G_1^b = \begin{bmatrix} a_1 \cdot T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, G_2^b = \begin{bmatrix} \frac{a_2 \cdot T^2}{2} \\ a_2 \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}, G_3^b = \begin{bmatrix} \frac{a_3 \cdot T^3}{6} \\ \frac{a_3 \cdot T^2}{2} \\ a_3 \cdot T \end{bmatrix}; \quad (3.22)$$

a_1, a_2, a_3 – СКВ випадкових флуктуацій швидкості, прискорення і швидкості зміни прискорення БПЛА, відповідно. При моделюванні вважалося: $a_1 = 0.05 \text{ м/с}$; $a_2 = 0.1 \text{ м/с}^2$; $a_3 = 6 \text{ м/с}^3$.

Частинні похідні $\frac{\partial h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$, що входять в рівняння (3.13)...(3.16),

мають вид

$$\frac{\partial h^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} = \left[\frac{\hat{x}^{l-1}(k-1) - x_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1}(k-1) - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1}(k-1) - y_s)^2}} - \frac{\hat{x}^{l-1}(k-1)}{\sqrt{\hat{x}^{l-1}(k-1)^2 + \hat{y}^{l-1}(k-1)^2}}; 0; 0; \right. \\ \left. \frac{\hat{y}^{l-1}(k-1) - y_s}{\sqrt{(\hat{x}^{l-1}(k-1) - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1}(k-1) - y_s)^2}} - \frac{\hat{y}^{l-1}(k-1)}{\sqrt{\hat{x}^{l-1}(k-1)^2 + \hat{y}^{l-1}(k-1)^2}}; 0; 0; -1 \right].$$

Початкові умови $\hat{u}_j(0), \hat{P}_j(0), j = \overline{1,3}$ для першої гіпотези $j=1$ формувалися за поточними вимірам, а для $j = \overline{2,3}$ – за спостереженням на двох сусідніх тактах. В якості оцінки вектора стану параметру руху береться $\hat{u}_j(k)$, апостеріорна ймовірність якого максимальна.

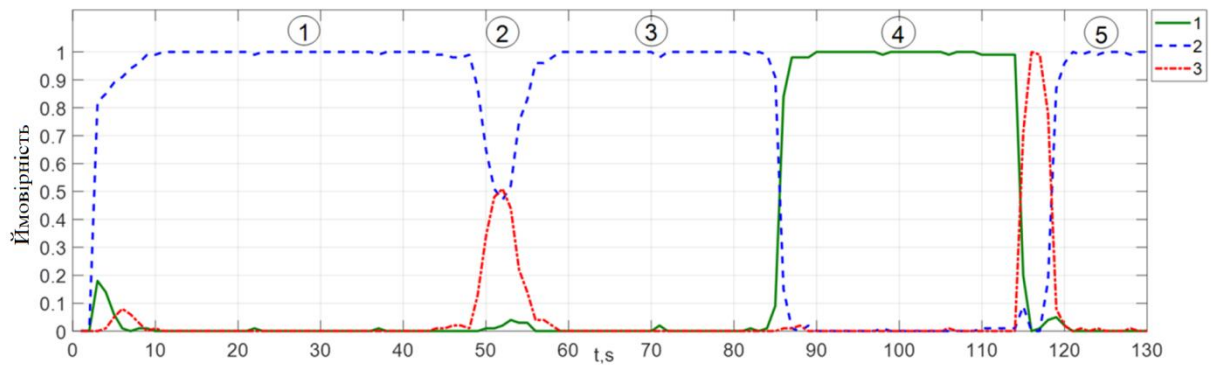


Рис. 3.4. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтра

На рис. 3.4 показані залежності ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло. Даний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнавання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

На рис. 3.5 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатам X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром.

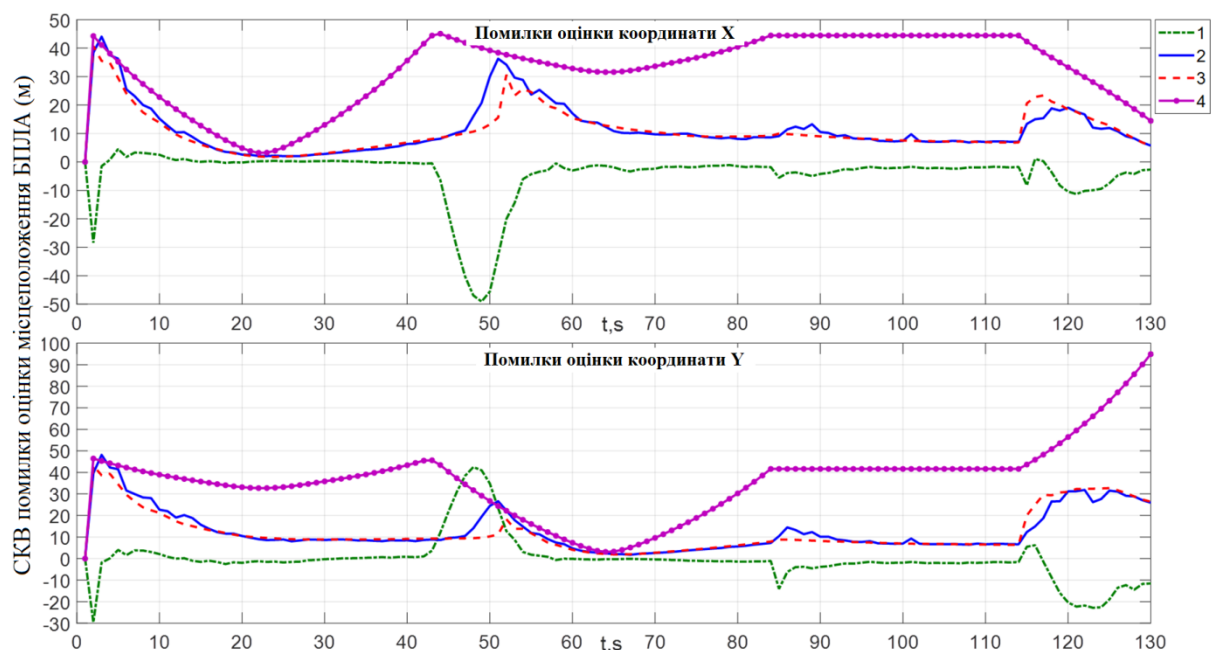


Рис. 3.5. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра

Також на рис. 3.5 показані залежності СКВ помилки визначення місцезнаходження БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4), яка характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з СКВ помилки визначення місцеположення на основі TDOA-вимірювань в 2 – 4 рази.

З метою порівняльної оцінки були також досліджені алгоритми траєкторної фільтрації БПЛА з використанням фільтрів Калмана, отриманих на основі моделей майже рівномірного руху $j = 2$ (рис. 3.6) і руху з маневром $j = 3$ (рис. 3.7).

При використанні фільтра Калмана на основі моделі $j = 2$ СКВ помилки оцінки положення БПЛА містять систематичні складові, які більш ніж на порядок перевищують СКВ помилки оцінки місцеположення, що обумовлено наявністю маневрів. У порівнянні з фільтром Калмана на основі моделі $j = 3$, розроблений адаптивний алгоритм дозволяє підвищити точність оцінювання параметрів руху БПЛА на ділянках зависання і руху без маневру більш, ніж в 2 – 3 рази і уникнути появи систематичних помилок оцінок.

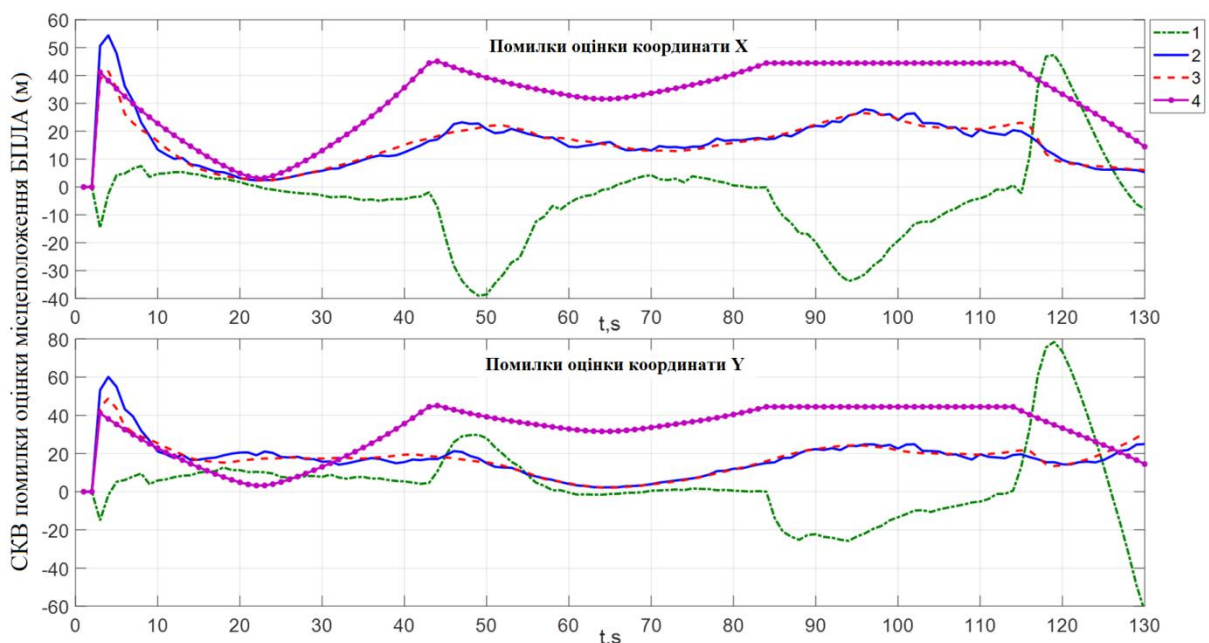


Рис. 3.6. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні точного фільтра

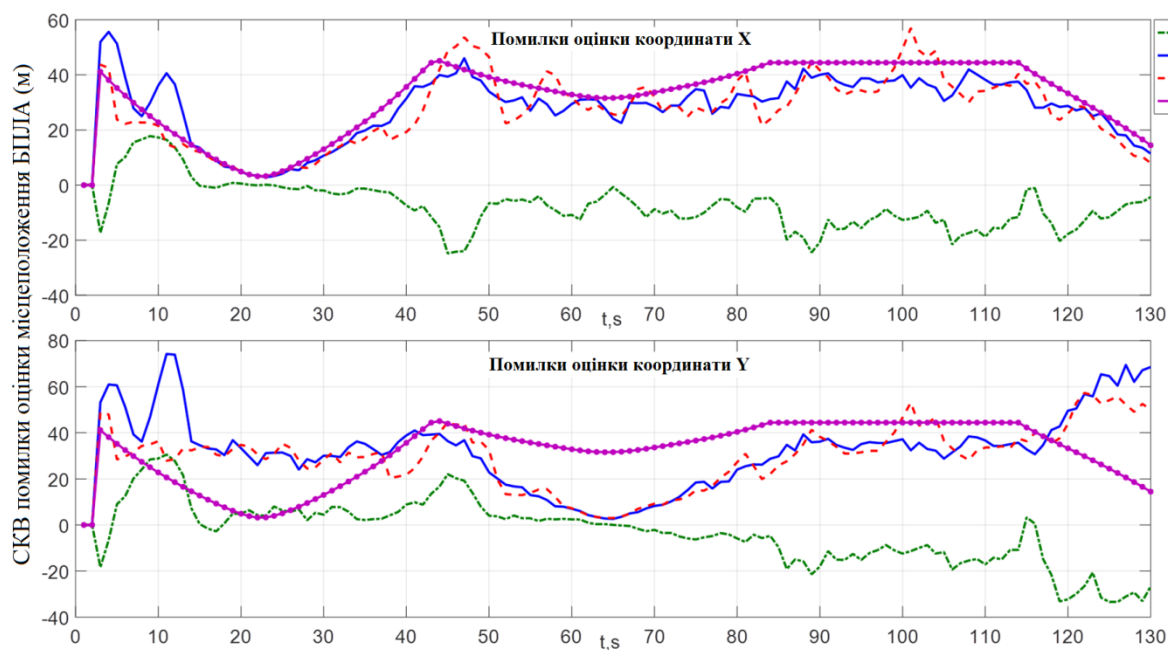


Рис. 3.7. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні грубого фільтру

3.3 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при невідомій потужності передавача

При використанні RSS-вимірювань враховується залежність потужності прийнятого сигналу від відстані між датчиком і БПЛА. Широке застосування знаходить модель прямого поширення сигналу, яка враховує тільки його загасання [24], яка описується виразом (1.8).

Необхідно на основі моделі руху БПЛА (3.1) і рівняння RSS-вимірювань сенсорної мережі (1.8) синтезувати алгоритм фільтрації параметрів руху БПЛА, в якому поряд з вирішенням основної задачі визначення параметрів його руху, також рекурентно оцінюється невідома потужність його передавача.

Для вирішення сформульованої задачі застосуємо баєсівський метод адаптивного оцінювання [77], основна ідея якого полягає у включенні невідомих параметрів в вектор стану фільтруючого процесу. Дотримуючись даного методу, вектор стану процесу, що підлягає фільтрації в розглянутій

задачі, можна представити у виді $u^T(k) = (u^{trT}(k), p_0(k))$. Він включає вектор параметрів руху БПЛА $u^{tr}(k)$, а також потужність передавача БПЛА $p_0(k)$. При цьому модель динамічної системи, яка описує процес, який підлягає фільтрації, має вид

$$u(k) = F_j u(k-1) + G_j \omega(k), \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.23)$$

в якому матриці F_j і G_j перетворюються до виду

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_j = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Включення $p_0(k)$ в вектор стану $u(k)$, дозволяє одночасно з вирішенням основної задачі оцінювання параметрів руху БПЛА, також оцінювати потужність його передавача, яка є невідомою [78].

При використанні моделі (3.23), рівняння спостереження (1.8), що описує формування RSS-вимірювань сенсорною мережею має вид

$$p^s(k) = h^s(u(k)) + v^s(k), \quad s = \overline{1, S}, \quad (3.24)$$

де $p^s(k)$ – виміряна s -м датчиком потужність сигналу БПЛА в k -й момент часу, $s = \overline{1, S}$; $v^s(k)$ – некорельована гаусівська помилка вимірювання потужності прийнятого сигналу s -м датчиком з нульовим математичним очікуванням і дисперсією σ_p^2 ; $h^s(u(k))$ – нелінійна функція, яка при вимірюванні в просторі описується виразом

$$h^s(u(k)) = p^0 - 10 \cdot \alpha \cdot \lg \left(\frac{\sqrt{(x(k) - x_s)^2 + (y(k) - y_s)^2 + (z(k) - z_s)^2}}{r^0} \right), \quad (3.25)$$

p^0 – невідома потужність сигналу на заданій відстані r^0 ; α – коефіцієнт загасання сигналу (близький до 2); $x(k), y(k), z(k)$ – координати положення БПЛА; x_s, y_s, z_s – координати положення s -го датчика. Помилки вимірювання $v^s(k)$, $s = \overline{1, S}$ є некорельованими між собою. Виміри, отримані

від всіх датчиків на k -му кроці, позначимо у вигляді вектора $\xi(k) = (p^1(k), \dots, p^S(k))^T$.

Рівняння (3.23) описує процес, який підлягає оцінюванню, а (3.24) – процес формування даних, доступних спостереженню і в загальному вигляді збігаються з аналогічними рівняннями (3.2), (3.3), що описують постановку задачі адаптивного оцінювання при наявності TDOA-вимірювань. Дотримуючись методики синтезу, розглянутої в підрозділі 1.1, можна показати, що, розширений процес, що включає неперервний компонент $u(k)$ і дискретний компонент $a_j(k)$, відноситься до класу змішаних марківських процесів в дискретному часі, а оптимальний алгоритм фільтрації процесу $(u(k), a_j(k))$ описується виразами (3.7)...(3.10).

Проте в даному випадку $P(\xi(k) / u(k)) = \prod_{s=1}^S P(p^s(k) / u(k))$ – однокрокова функція правдоподібності, що визначається на основі вимірів $\xi(k) = (p^1(k), \dots, p^S(k))^T$, отриманих від всіх датчиків на k -му кроці; $P(p^s(k) / u(k))$ – функція правдоподібності, що визначається на основі вимірювання s -го датчика на k -му кроці $p^s(k)$ з використанням рівняння (3.24). Оптимальний алгоритм має властивості, які описані в підрозділі 3.1.

Недоліком оптимального алгоритму є великі обчислювальні витрати, пов'язані з необхідністю інтегрування багатовимірних щільностей ймовірності.

Для синтезу квазіоптимального алгоритму будемо також використовувати послідовний спосіб обробки даних, що надходять. Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання може бути отриманий шляхом розкладання нелінійних функцій в рівняннях (3.24) в ряд Тейлора в колі отриманих оцінок вектора $u(k)$ і обмежених лінійними членами розкладання, а також застосуванням на кожному кроці гаусівської апроксимації умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$. При цьому рівняння

обчислення першого $u_j^*(k)$ і другого $P_j^*(k)$ моментів умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$ виконується за формулами (3.11), (3.12).

Рівняння обчислення умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$ (3.9) при послідовній обробці вимірювань, що надходять $p^s(k), s = \overline{1, S}$ зводиться до обчислення її першого $\hat{u}_j(k)$ і другого $\hat{P}_j(k)$ моментів з використанням рекурентної процедури [74, 78]

$$K_j^s(k) = \hat{P}_j^{s-1}(k) \frac{\partial h^{sT}(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} (D_j^s(k))^{-1}, \quad (3.26)$$

$$\hat{u}_j^s(k) = \hat{u}_j^{s-1}(k) + K_j^s(k)(p^s(k) - h^s(\hat{u}_j^{s-1}(k))), \quad (3.27)$$

$$\hat{P}_j^s(k) = \hat{P}_j^{s-1}(k) - K_j^s(k) \frac{\partial h^s(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} \hat{P}_j^{s-1}(k), \quad (3.28)$$

де $\hat{u}_j^s(k)$, $\hat{P}_j^s(k)$ – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$, уточненої за вимірюванням $p^s(k), s = \overline{1, S}$. При цьому початкові умови для процедури (3.26)...(3.28) при $s=0$ мають вид $\hat{u}_j^0(k) = u_j^*(k)$, $\hat{P}_j^0(k) = P_j^*(k)$, $j = \overline{1, M}$, а $\hat{u}_j(k) = \hat{u}_j^S(k)$, $\hat{P}_j(k) = \hat{P}_j^S(k)$, $j = \overline{1, M}$. Перевагою методу є відсутність необхідності обернення матриці великої розмірності, оскільки $D_j^l(k)$ є скалярною величиною.

Алгоритм фільтрації дискретних компонентів не змінюється і описується рівняннями (3.7), (3.10). При цьому умовна ЩЙ $P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1)) = N(H(u_j^*(k)), D_j(k))$ є гаусівською, а величина $D_j(k)$ визначається за допомогою виразу

$$D_j^s(k) = \frac{\partial h^s(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} \hat{P}_j^{s-1}(k) \frac{\partial h^{sT}(\hat{u}_j^{s-1}(k))}{\partial u^s(k)} + \sigma_p^s(k). \quad (3.29)$$

Квазіоптимальний пристрій, що реалізує алгоритм (3.7), (3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28), також є багатоканальним з числом каналів M і в основному зберігає структуру і всі зворотні зв'язки, властиві оптимальному пристрою. Їх відмінність полягає в тому, що в квазіоптимальному пристрої обчислюються тільки перший і другий моменти умовних ЩЙ $W_j^*(u(k))$ і $W_j(u(k))$. При цьому квазіоптимальний алгоритм дозволяє зберегти уявлення апостеріорної ЩЙ $W(u(k))$ у вигляді суми M гаусівських щільностей.

Структурна схема j -го каналу такого квазіоптимального фільтра показана на рис. 3.8.

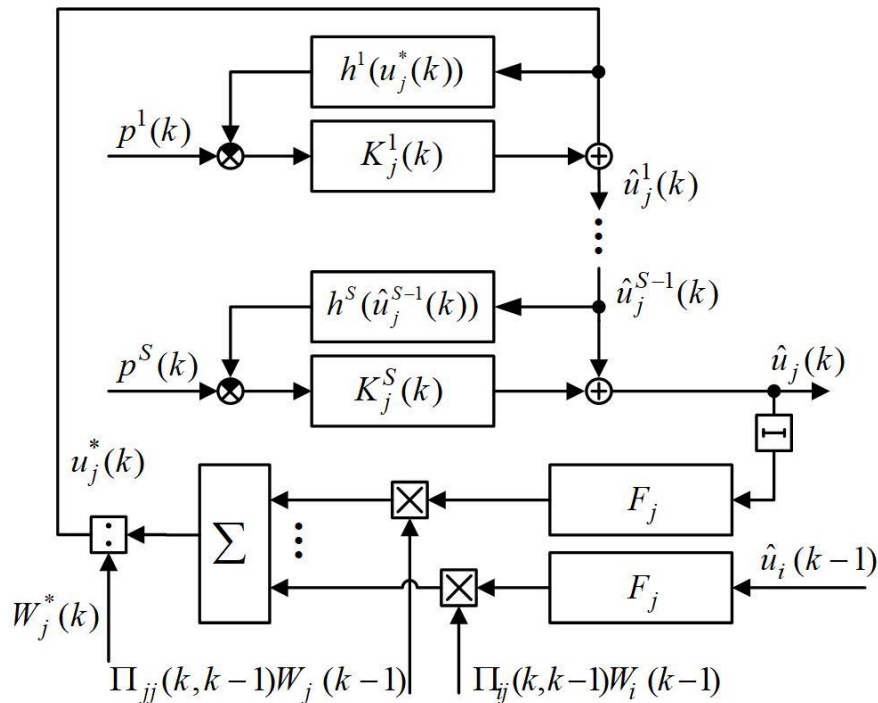


Рис. 3.8. Структурна схема одного каналу квазіоптимального фільтра при послідовній реалізації обчислень

При рішенні деяких завдань, потужність передавача БПЛА може бути відома. У цьому випадку значення потужність сигналу p^0 на заданій відстані r^0 в виразі (3.25) покладається відомою. При цьому в моделі процесу, що підлягає фільтрації (3.23), матриці мають вид $F_j = F_j^{tr}$, $G_j = G_j^{tr}$ і вона збігається з моделлю (3.1). Дотримуючись розглянутій вище методиці, можна показати, що квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при відомій

потужності передавача також описується рівняннями (3.7), (3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28) [79].

3.4 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при невідомій потужності передавача

Аналіз ефективності розробленого квазіоптимального алгоритму адаптивного фільтрації оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА (3.7), (3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28) проведено за допомогою статистичного моделювання. Сенсорна мережа (рис. 3.9) складається з восьми датчиків з координатами: $D_1 (0;100)$, $D_2 (70.71; 70.71)$, $D_3 (100;0)$, $D_4 (70.71;-70.71)$, $D_5 (0;-100)$, $D_6 (-70.71;-70.71)$, $D_7 (-100;0)$, $D_8 (-70.71; 70.71)$.

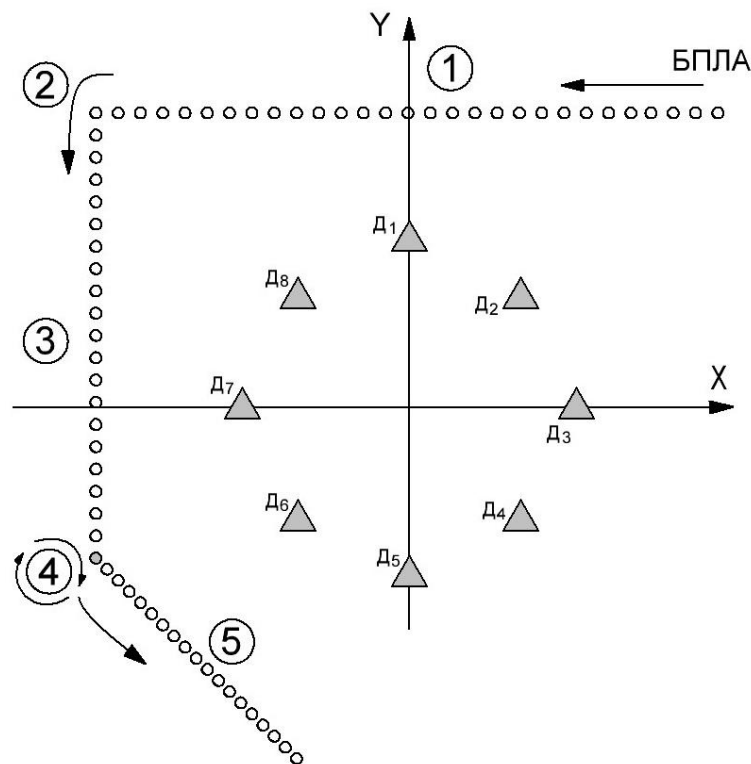


Рис. 3.9. Конфігурація сенсорної мережі з 8 датчиків і траєкторія руху БПЛА.

Для опису руху БПЛА по осях прямокутної системи координат використовувалася модель у вигляді стохастичної ДС третього прядка. При цьому вектор стану $u^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), p_0(k))$ включає

координати положення, швидкості і прискорення по осях X , Y , а також потужність передавача БПЛА $p_0(k)$, а матриці, що входять в модель руху (3.23) мають вид

$$F_j(k, k-1) = \begin{bmatrix} F_j^b & 0 & 0 \\ 0 & F_j^b & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, G_j(k) = \begin{bmatrix} G_j^b & 0 & 0 \\ 0 & G_j^b & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

де $F_j^b, G_j^b, j = \overline{1,3}$, описуються матрицями (3.21), (3.22).

Частинні похідні $\frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$, що входять в рівняння (3.26)...(3.28),

мають вид

$$\begin{aligned} \frac{\partial h^l(\hat{u}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} = & \left[\frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \frac{\hat{x}(k-1) - x^l}{(\hat{x}(k-1) - x^l)^2 + (\hat{y}(k-1) - y^l)^2}; 0; 0; \right. \\ & \left. \frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \frac{\hat{y}(k-1) - y^l}{(\hat{x}(k-1) - x^l)^2 + (\hat{y}(k-1) - y^l)^2}; 0; 0; 1 \right]. \end{aligned}$$

Для аналізу роботи алгоритму була використана тестова траєкторія руху БПЛА (рис. 3.2), розглянута в підрозділі 1.1. СКВ помилки вимірювань при використанні RSS-вимірювань – $\sigma_p = 1$ дБ. Темп надходження інформації $T=1$ с. Випробування проводилися по ста реалізаціях. При формуванні початкових умов алгоритму фільтрації $\hat{u}(0), \hat{P}(0)$ вважалось, що СКВ помилки місцеположення БПЛА по координатах X, Y дорівнює 70 м.

На рис. 3.10 показані залежності ймовірностей розпізнання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло. Даний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

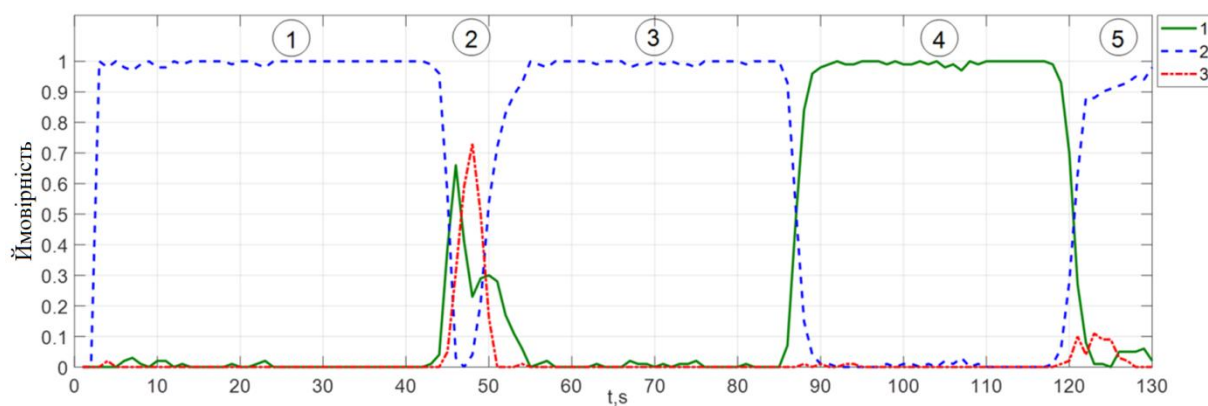


Рис. 3.10. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтра

На рис. 3.11 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичних очікувань (криві 1) та СКВ (криві 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (криві 3) помилки оцінки, розрахованих розробленим фільтром при невідомій потужності передавача.

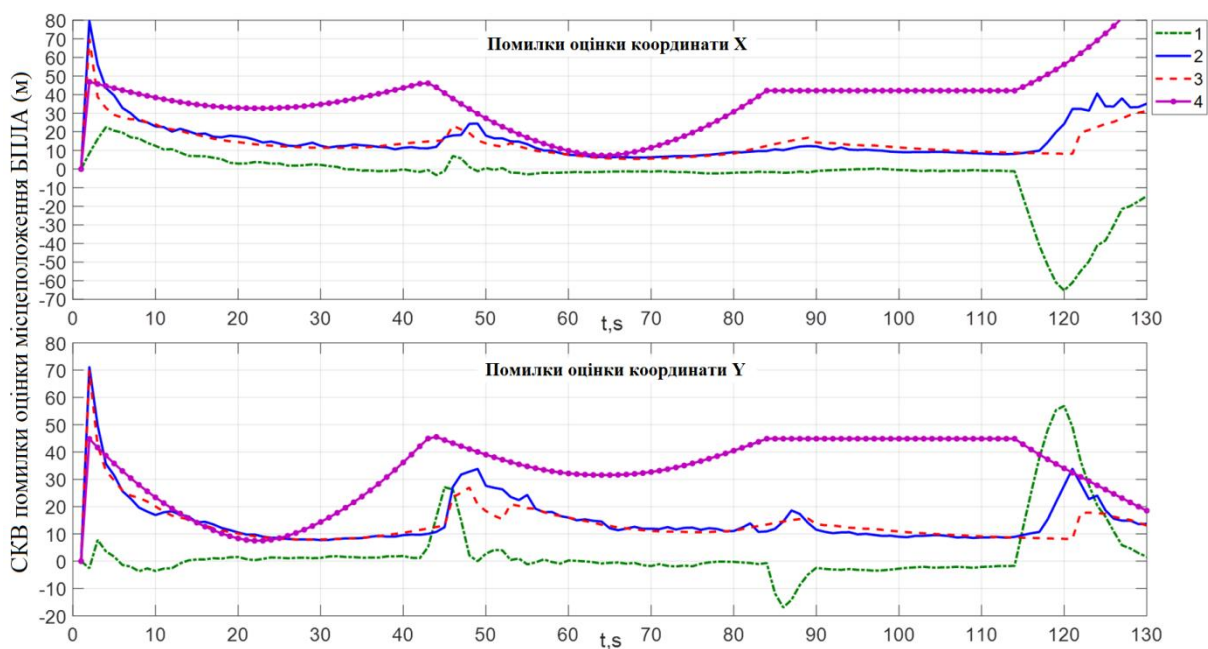


Рис. 3.11. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра

Також на рис. 3.11 показані залежності СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА розробленим раніше фільтром при відомій потужності передавача (криві 4). Також на рис. 3.11 показані залежність СКВ помилки визначення місцезнаходження БПЛА, яка відповідає нижній межі Рао-Крамера (крива 5), яка характеризує потенційну можливу точність

визначення координат БПЛА. Розроблений фільтр при невідомій потужності після завершення перехідного процесу дозволяє визначити місцеположення БПЛА з такими ж точностними характеристиками, як і фільтр в якому використовується відома потужність передавача.

На рис. 3.12 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичних очікувань (криві 1) та СКВ (криві 2) помилки оцінки потужності передавача БПЛА, а також СКВ (криві 3) помилки оцінки, розрахованих розробленим фільтром. Розроблений фільтр дозволяє зменшити СКВ помилки оцінки потужності передавача БПЛА з 2.5 дБ до 0.3 дБ.

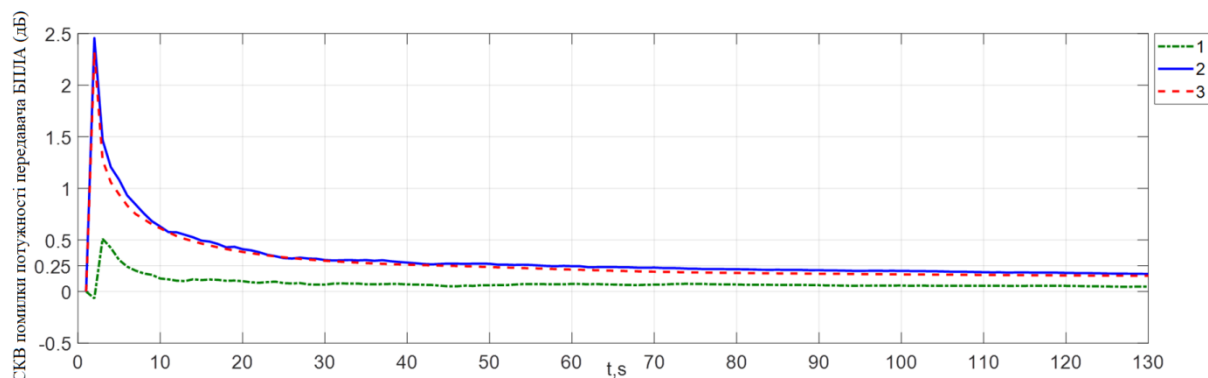


Рис. 3.12. СКВ помилки потужності передавача БПЛА

Як випливає з результатів моделювання, після завершення процесу адаптації розроблений адаптивний фільтр дозволяє визначити місцеположення БПЛА з точностними характеристиками, близькими до алгоритму, в якому використовується відома потужність передавача. При цьому СКВ помилки оцінки потужності передавача БПЛА в сталому режимі складає 0.3 дБ.

3.5 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань з відомою потужністю передавача

Аналіз ефективності розробленого квазіоптимального алгоритму адаптивної фільтрації оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА з

відомою потужністю передавача (3.7), (3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28) також проведено за допомогою статистичного моделювання на прикладі сенсорної мережі (рис. 3.9) і з тими ж параметрами, що і для невідомої потужності передавача БПЛА. При цьому модель процесу, що підлягає фільтрації, при відомій потужності описується рівнянням (3.1), де матриці F_j і G_j мають вид

$$F_j(k, k-1) = \begin{bmatrix} F_j^b & 0 \\ 0 & F_j^b \end{bmatrix}, G_j(k) = \begin{bmatrix} G_j^b & 0 \\ 0 & G_j^b \end{bmatrix},$$

Також частинні похідні $\frac{\partial h^l(u_j^*(k))}{\partial u(k)}$, що входять в рівняння (3.22), (3.24),

мають вид

$$\frac{\partial h^l(u_j^*(k))}{\partial u(k)} = \frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \cdot \left[\frac{\hat{x}(k-1) - x^l}{(\hat{x}(k-1) - x^l)^2 + (\hat{y}(k-1) - y^l)^2}; 0; 0; \right. \\ \left. \frac{\hat{y}(k-1) - y^l}{(\hat{x}(k-1) - x^l)^2 + (\hat{y}(k-1) - y^l)^2}; 0; 0 \right].$$

На рис. 3.13 показані залежності ймовірностей розпізнання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло. Даний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

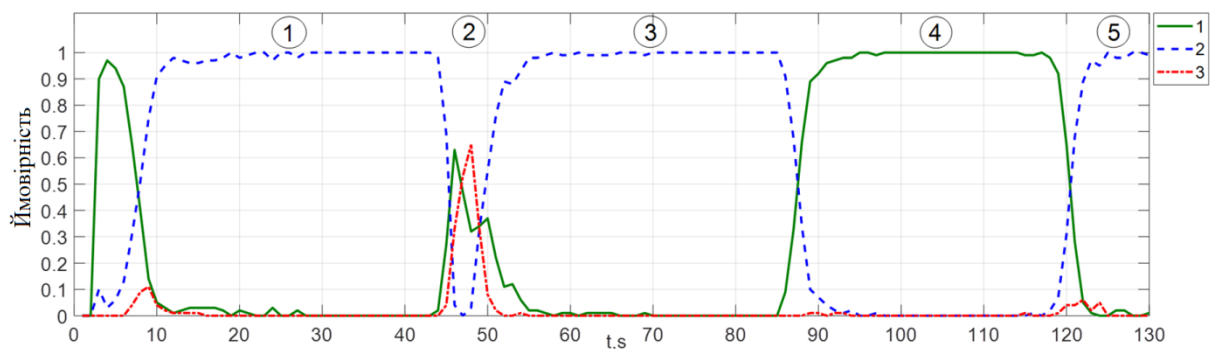


Рис. 3.13. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтра

На рис. 3.13 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром.

Також на рис. 3.14 показані залежність СКВ помилки визначення місцезнаходження БПЛА, яка відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4), яка характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з СКВ помилки визначення місцеположення на основі RSS-вимірювань в 2 – 4 рази.

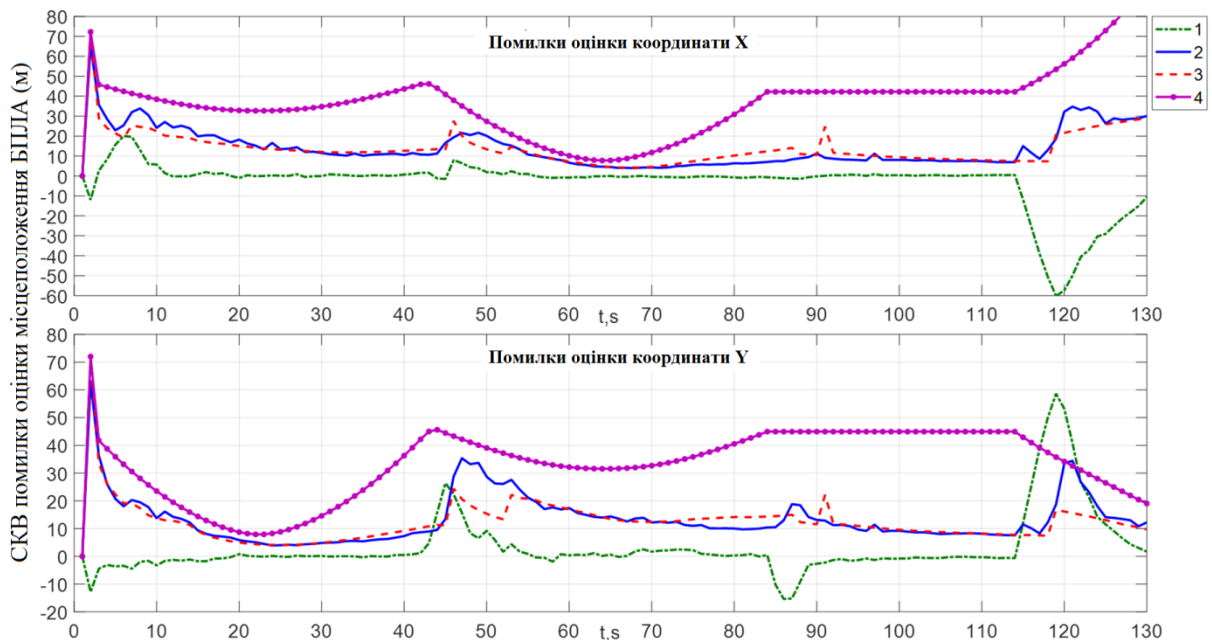


Рис. 3.14 СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра

З метою порівняльної оцінки були також досліджені алгоритми траєкторної фільтрації БПЛА з використанням фільтрів Калмана, отриманих на основі моделей майже рівномірного руху $j=2$ (рис. 3.15) і руху з маневром $j=3$ (рис. 3.16) [80].

При використанні фільтра Калмана на основі моделі $j=2$, помилки оцінки положення БПЛА містять систематичні складові, які більш ніж на порядок перевищують СКВ помилки оцінки місцеположення, що обумовлено наявністю маневрів. У порівнянні з фільтром Калмана на основі моделі $j=3$,

розроблений адаптивний алгоритм дозволяє підвищити точність оцінювання параметрів руху БПЛА на ділянках зависання і руху без маневру в 2 – 3 рази і уникнути появи систематичних помилок оцінок.

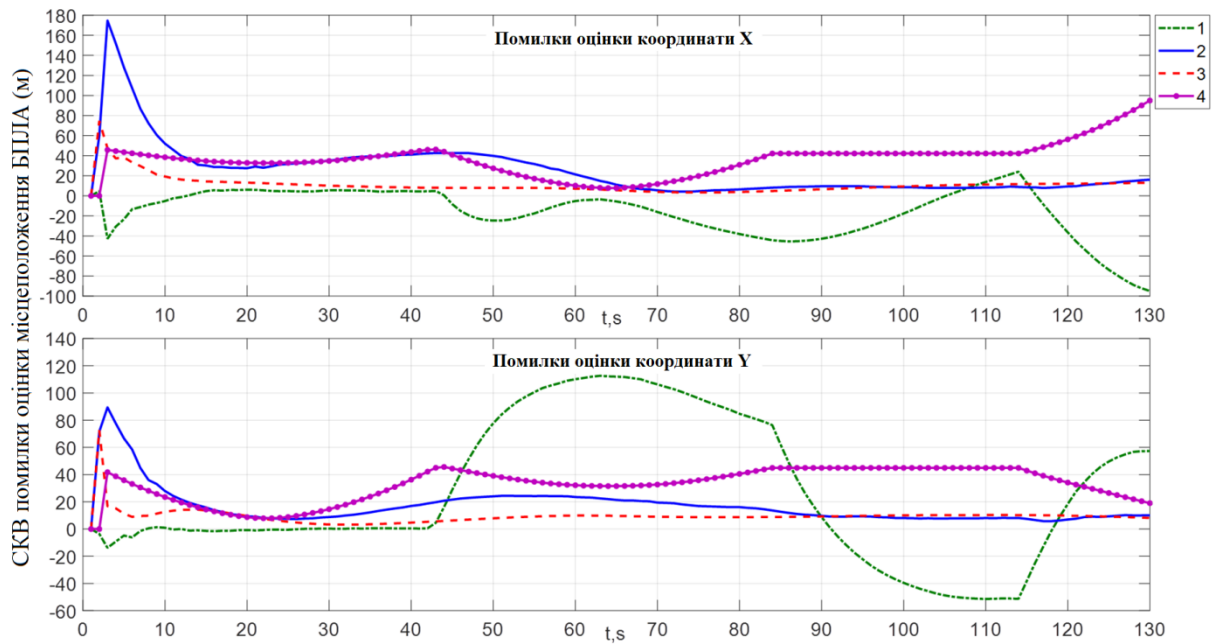


Рис. 3.15. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні точного фільтра

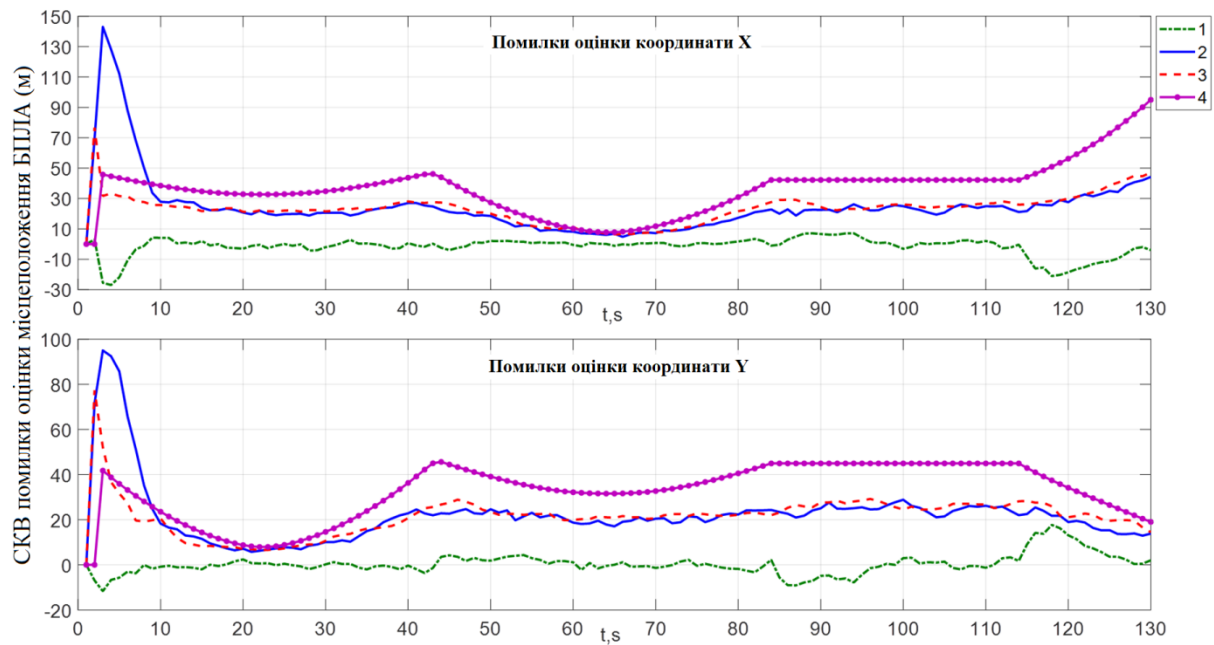


Рис. 3.16. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні грубого фільтра

3.6 Синтез оптимального і квазіоптимального алгоритмів адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань

Підвищення точності оцінювання параметрів руху БПЛА може бути досягнуто шляхом комплексної обробки даних [81, 82]. Для цього введемо об'єднаний вектор вимірювань $\xi^{sT}(k) = (\Delta^s(k), p^s(k))$, отриманих на основі TDOA- і RSS- вимірювань від s -го датчика в k -й момент часу. Вектор, що включає всі отримані в k -й момент часу вимірювання $\xi^s(k)$, $s = \overline{1, S}$, позначимо $\xi(k)$.

Необхідно на основі моделі руху БПЛА (3.1) і рівнянь спостереження (3.3), (3.24), які формують вимірювання $\xi^s(k)$, $s = \overline{1, S}$, синтезувати оптимальний і квазіоптимальний алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА за даними сенсорної мережі, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху. Дотримуючись методики розширення вектора стану, використаної в підрозділах 3.1 і 3.3, модель процесу, що підлягає фільтрації, описується виразом

$$u(k) = F_j u(k-1) + G_j \omega(k), \quad j = \overline{1, M}, \quad (3.30)$$

в якому матриці F_j і G_j перетворюються до виду

$$F_j = \begin{bmatrix} F_j^{tr} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad G_j = \begin{bmatrix} G_j^{tr} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma^0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Задача синтезу оптимального алгоритму також, як і в підрозділах 3.1, 3.3, зводиться до вичислення апостеріорної ЩЙ розширеного процесу $W(u(k), a_j(k)) = P(u(k), a_j(k) / \Xi(k))$, де $\Xi(k) = \xi(1), \dots, \xi(k)$ — отримана послідовність вимірювань до k -го моменту включно. Можна показати, що

оптимальний алгоритм фільтрації процесу $(u(k), a_j(k))$ описується виразами (3.7)...(3.10).

Проте в даному випадку $P(\xi(k) / u(k)) = \prod_{s=1}^S P(\xi^s(k) / u(k))$ – однокрокова функція правдоподібності, що визначається на основі вимірів $\xi(k) = (\xi^1(k), \dots, \xi^S(k))^T$, отриманих від всіх датчиків на k -му кроці; $P(\xi^s(k) / u(k)) = P(\Delta^s(k) / u(k))P(p^s(k) / u(k))$ – функція правдоподібності, що визначається на основі вимірювання s -го датчика на k -му кроці $\xi^s(k)$ з використанням рівнянь (3.3), (3.24). Оптимальний алгоритм має властивості, описані в підрозділі 3.1.

Недоліком оптимального алгоритму є великі обчислювальні витрати, пов'язані з необхідністю інтегрування багатовимірних ЩЙ. При синтезі квазіоптимального алгоритму будемо використовувати послідовний спосіб обробки даних, що надходять. Введемо індекс l , який характеризує послідовність надходжень вимірювань від відповідних датчиків мережі, $l = \overline{1, S}$. Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання може бути отриманий шляхом розкладання нелінійних функцій $h_{\Delta}^l(u(k))$ і $h_p^l(u(k))$ в рівняннях (3.3), (3.24) в ряд Тейлора в колі отриманих оцінок вектора $u(k)$ і обмеженням лінійними членами розкладання, а також застосуванням на кожному кроці гаусівської апроксимації умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$ [74]. При цьому рівняння обчислення першого $u_j^*(k)$ і другого $P_j^*(k)$ моментів умовної екстрапольованої ЩЙ $W_j^*(u(k))$ виконується за формулами (3.11), (3.12).

Рівняння обчислення умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$ (3.9) при послідовній обробці вимірювань, що надходять $\Delta^l(k), p^l(k), l = \overline{1, S}$ зводиться до обчислення її першого $\hat{u}_j(k)$ і другого $\hat{P}_j(k)$ моментів з використанням рекурентної процедури [74, 83]

$$K_{\Delta j}^l(k) = \hat{P}_{pj}^{l-1}(k) \frac{\partial h_{\Delta}^{lT}(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \left(D_{\Delta j}^l(k) \right)^{-1}; \quad (3.31)$$

$$\hat{u}_j^l(k) = \hat{u}_j^{l-1}(k) + K_j^l(k)(\Delta^l(k) - h_{\Delta}^l(\hat{u}_j^{l-1}(k))); \quad (3.32)$$

$$\hat{P}_{\Delta j}^l(k) = \hat{P}_{pj}^{l-1}(k) - K_{\Delta j}^l(k) \frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_{pj}^{l-1}(k); \quad (3.33)$$

$$K_{pj}^l(k) = \hat{P}_{\Delta j}^l(k) \frac{\partial h_p^{lT}(\hat{u}_{\Delta j}^l(k))}{\partial u^l(k)} \left(D_{pj}^l(k) \right)^{-1}; \quad (3.34)$$

$$\hat{u}_j^l(k) = \hat{u}_j^l(k) + K_j^l(k)(p^l(k) - h_p^l(\hat{u}_j^l(k))); \quad (3.35)$$

$$\hat{P}_{pj}^l(k) = \hat{P}_{\Delta j}^l(k) - K_{pj}^l(k) \frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^l(k))}{\partial u^l(k)} \hat{P}_{\Delta j}^l(k), \quad (3.36)$$

де $\hat{u}_{\Delta j}^l(k)$, $\hat{P}_{\Delta j}^l(k)$ – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$, уточненої за вимірюванням $\Delta^l(k)$, $l = \overline{1, S}$; $\hat{u}_{pj}^l(k)$, $\hat{P}_{pj}^l(k)$ – математичне очікування і кореляційна матриця умовної апостеріорної ЩЙ $W_j(u(k))$, уточненої за вимірюванням $p^l(k)$, $l = \overline{1, S}$. При цьому початкові умови для процедури (3.31)...(3.36) при $l=0$ мають вид $\hat{u}_{\Delta j}^0(k) = u_j^*(k)$, $\hat{P}_{\Delta j}^0(k) = P_j^*(k)$, $j = \overline{1, M}$. Перевагою методу є відсутність необхідності обернення матриць великої розмірності, оскільки $D_j^l(k)$ є скалярною величиною.

Алгоритм фільтрації дискретних компонентів не змінюється і описується рівняннями (3.7), (3.10). При цьому умовна ЩЙ визначається за формулою

$$P(\xi(k) / a_j(k), \Xi(k-1)) = \prod_{l=1}^S P(\Delta^l(k) / a_j(k), \xi^{l-1}(k) \dots \xi^1(k), \Xi(k-1)) \times \\ \times P(p^l(k) / a_j(k), \Delta^l(k), \xi^{l-1}(k) \dots \xi^1(k), \Xi(k-1)), \quad (3.37)$$

де $P(\Delta^l(k) / a_j(k), \xi^{l-1}(k) \dots \xi^1(k), \Xi(k-1)) = N(H(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k)), D_{\Delta_j}^l(k))$ – умовна ЩЙ, яка є гаусівською, а величина $D_{\Delta_j}^l(k)$ визначається за допомогою виразу

$$D_{\Delta_j}^l(k) = \frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} \hat{P}_{pj}^{l-1}(k) \frac{\partial h_{\Delta}^{lT}(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} + \sigma_{\Delta}^l(k);$$

$P(p^l(k) / a_j(k), \Delta^l(k), u_c^{l-1}(k) \dots u_c^1(k), U_c(k-1)) = N(H(\hat{u}_{\Delta_j}^l(k)), D_{pj}^l(k))$ – умовна ЩЙ, яка є гаусівською, а величина $D_{pj}^l(k)$ визначається за допомогою виразу

$$D_{pj}^l(k) = \frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta_j}^l(k))}{\partial u(k)} \hat{P}_{\Delta_j}^l(k) \frac{\partial h_p^{lT}(\hat{u}_{\Delta_j}^l(k))}{\partial u(k)} + \sigma_p^l(k).$$

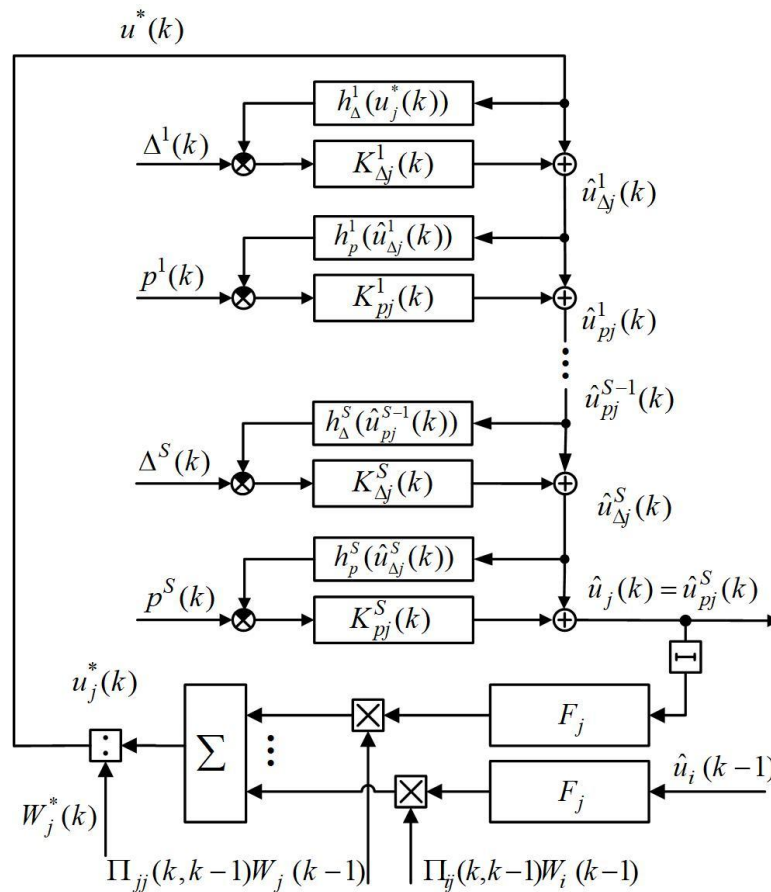


Рис. 3.17. Структурна схема частини j -го каналу квазіоптимального фільтра

Квазіоптимальний пристрій, що реалізує алгоритм (3.7), (3.10), (3.31) ... (3.36), також є багатоканальним з числом каналів M і в основному зберігає структуру і зворотні зв'язки, властиві оптимальному пристрою. Їх відмінність полягає в тому, що в квазіоптимальному пристрої обчислюються тільки

перший і другий моменти умовних ЩЙ $W_j^*(u(k))$ и $W_j(u(k))$. При цьому квазіоптимальний алгоритм дозволяє зберегти уявлення апостеріорної ЩЙ $W(u(k))$ у вигляді суми M гаусівських щільностей.

Структурна схема частини j -го каналу квазіоптимального фільтра, в якій виконується оцінювання неперервного компонента $u(k)$ при послідовній реалізації обчислень показана на рис. 3.17.

3.7 Аналіз ефективності квазіоптимального алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань

Аналіз ефективності розробленого квазіоптимального алгоритму адаптивної фільтрації оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА (3.7), (3.10), (3.31)...(3.36) проведено за допомогою статистичного моделювання на прикладі оцінювання параметрів руху БПЛА, що випромінює радіосигнал. Бездротова сенсорна мережа складається з дев'яти датчиків рис. 3.2, представлена в підрозділі 1.2. СКВ помилки вимірювань при використанні TDOA- і RSS- вимірювань $\sigma_{\Delta} = 2.4$ м і $\sigma_p = 1$ дБ, відповідно. Темп надходження інформації $T=1$ с.

Для аналізу роботи алгоритму була використана тестова траєкторія руху БПЛА (рис. 3.2), розглянута в підрозділі 1.1.

Для опису руху БПЛА використовувалася модель з випадковою структурою (3.30), яка враховує три основних види руху $M=3$: зависання $j=1$, майже рівномірний рух $j=2$, рух з маневром $j=3$. Вектор стану $u^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), v_0(k), p_0(k))$ включає координати положення, швидкості і прискорення по осях X, Y . Матриці, що входять в модель руху (3.30) мають вид

$$F_j(k, k-1) = \begin{bmatrix} F_j^b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_j^b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad G_j(k) = \begin{bmatrix} G_j^b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & G_j^b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

де $F_j^b, G_j^b, j = \overline{1,3}$, описуються матрицями (3.21), (3.22).

Вектори $\frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$ і $\frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$, що входять в рівняння (3.31) ...

(3.36), мають вигляд

$$\frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u^l(k)} = \left[\frac{\hat{x}^{l-1}(k-1) - x_s}{\hat{R}^l} - \frac{\hat{x}^{l-1}(k-1)}{\hat{R}^0}; 0; 0; \frac{\hat{y}^{l-1}(k-1) - y_s}{\hat{R}^l} - \frac{\hat{y}^{l-1}(k-1)}{\hat{R}^0}; 0; 0; -1; 0 \right],$$

$$\frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} = \left[\frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \frac{\hat{x}^l(k-1) - x_s}{\hat{R}^{l2}}; 0; 0; \frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \frac{\hat{y}^l(k-1) - y_s}{\hat{R}^{l2}}; 0; 0; 0; 1 \right],$$

де $\hat{R}^l = \sqrt{(\hat{x}^{l-1}(k-1) - x_s)^2 + (\hat{y}^{l-1}(k-1) - y_s)^2}$ – оцінка відстані між l -м датчиком і БПЛА, $l = \overline{1, L}$ $\hat{R}^0 = \sqrt{\hat{x}^{l-1}(k-1)^2 + \hat{y}^{l-1}(k-1)^2}$ – оцінка відстані між опорним датчиком і БПЛА.

Початкові умови $\hat{u}_j(0), \hat{P}_j(0), j = \overline{1,3}$ для першої гіпотези $j=1$ формувалися за поточними вимірами, а для $j = \overline{2,3}$ – за спостереженнями на двох сусідніх тактах.

На рис. 3.18 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА за координатами X, Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром.

Також на рис. 3.18 показані залежності СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X, Y адаптивних фільтрів при незалежній обробці даних, з використанням методів на основі TDOA-вимірювань (криві 4) [49] і RSS-вимірювань (криві 5) [48]. Комплексне

використання даних дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА за координатами X, Y в 2 – 5 рази.

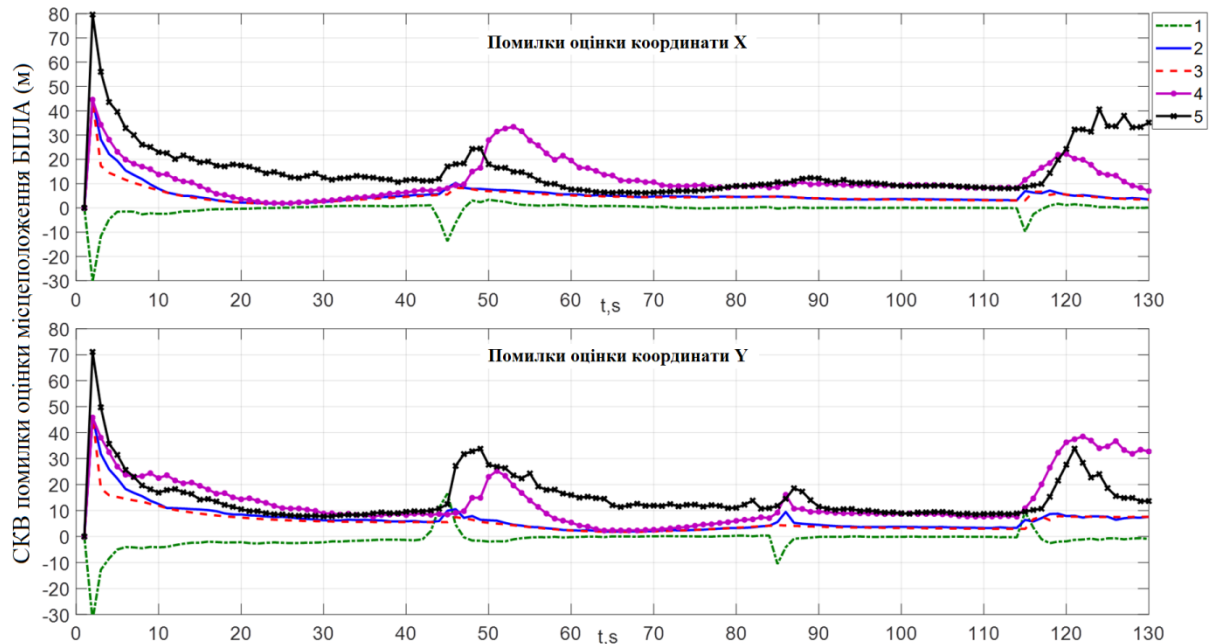


Рис. 3.18. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра

На рис. 3.19 показані залежності ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло. Даний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. А також забезпечити більш високу ймовірність розпізнавання маневру, в порівнянні з випадками використання даних тільки на основі TDOA-вимірювань [73] або RSS-вимірювань [79].

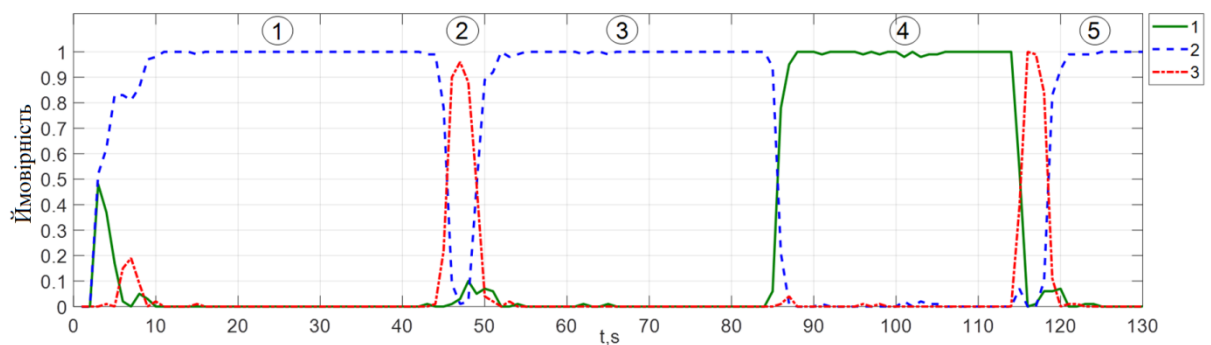


Рис. 3.19. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтра

Висновки по третьому розділу

1. Оптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань, RSS-вимірювань, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань виду (3.7)...(3.10) є рекурентними і описують еволюцію апостеріорної ЩЙ розширених змішаних марківських процесів, що включають непереривнозначні вектори параметрів руху БПЛА і дискретозначні змінні перемикавання, що описують тип його руху. Оптимальні пристрої, які реалізують дані алгоритми, є багатоканальними з числом каналів M і відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами. Наявність зворотного зв'язку між каналами обумовлено марківською властивістю дискретних компонентів.

2. В отриманому шляхом лінеаризації рівняння вимірювання (3.3) квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань (3.7), (3.10)...(3.15) виконується оцінювання помилки вимірювання опорного датчика, що дозволяє реалізувати послідовну процедуру виконання обчислень при надходженні даних від датчиків сенсорної мережі. Він дозволяє зберегти уявлення апостеріорної ЩЙ неперервного компонента у вигляді суми M гаусівських ЩЙ, а квазіоптимальний пристрій рис.3.2, є багатоканальним з числом каналів M і відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

3. Як впливає з результатів моделювання, застосування адаптивної траєкторної фільтрації на основі TDOA-вимірювань дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з рекурентними методами на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі в 2 – 4 рази. У порівнянні з фільтром Калмана, розроблений адаптивний алгоритм дозволяє підвищити точність визначення місцеположення на ділянках зависання і руху без маневру більш, ніж в 2 – 3 рази і уникнути появи систематичних помилок

оцінок. При цьому адаптивний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці.

4. В отриманому шляхом лінеаризації рівняння вимірювання (3.24) квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань (3.7), (3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28) виконується оцінювання невідомої потужності передавача і реалізована послідовна процедура обробки вимірювань, що надходять. Він забезпечує полігаусівську апроксимацію апостеріорної ЩЙ неперервного компонента, а квазіоптимальний пристрій рис. 3.8, є багатоканальним з числом каналів M і відносяться до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

Квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при відомій потужності передавача впливає з більш загального шляхом збереження в векторі стану фільтруючого процесу тільки параметрів руху БПЛА і також описується рівняннями (3.7),(3.10)...(3.12), (3.26)...(3.28).

5. Як впливає з результатів моделювання квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань з відомою потужністю передавача, дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з потенційно досяжними характеристиками рекурентного методу на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі в 2 – 4 рази. У порівнянні з фільтром Калмана, розроблений адаптивний алгоритм дозволяє підвищити точність визначення місцеположення на ділянках зависання і руху без маневру в 2 – 3 рази і уникнути появи систематичних помилок оцінок. При цьому він також дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці.

6. Як впливає з результатів моделювання квазіоптимальний алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань з невідомою потужністю передавача після завершення

процесу адаптації володіє точностними характеристиками, близькими з адаптивним алгоритмом з відомою потужністю передавача. При цьому СКВ помилки оцінки потужність передавача БПЛА в сталому режимі складає 0.3 дБ. Також адаптивний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці.

7. В отриманому шляхом лінеаризації рівнянь вимірювання (3.3), (3.24) квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань (3.7), (3.10)...(3.12), (3.31)...(3.36) реалізована послідовна процедура виконання обчислень при надходженні вимірювань і він забезпечує полігаусівську апроксимацію апостеріорної ЩЙ неперервного компонента. Квазіоптимальний пристрій рис. 3.17, також є багатоканальним з числом каналів M і відноситься до класу пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

8. Як впливає з результатів моделювання, комплексне використання TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з їх роздільним використанням в 2 – 5 рази. При цьому адаптивний фільтр дозволяє розпізнати всі види рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці.

РОЗДІЛ 4. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ І МОЖЛИВОСТІ ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ РОЗРОБЛЕНИХ АЛГОРИТМІВ

У розділах 2 і 3 аналіз розроблених алгоритмів визначення місцеположення БПЛА і адаптивної фільтрація параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі виконаний на площині за допомогою статистичного моделювання на ЕОМ з метою виявлення їх основних характеристик і порівняння з відомими алгоритмами. У розділі 4 виконаний аналіз ефективності розроблених в розділах 2 і 3 алгоритмів в просторі, що відповідає реальній ситуації оцінювання параметрів руху БПЛА, що випромінює радіосигнал.

Крім того, проведено порівняльний аналіз обчислювальних витрат, необхідних при реалізації синтезованих алгоритмів, а також можливостей їх реалізації на базі сучасних обчислювальних систем.

4.1 Аналіз ефективності визначення місцеположення БПЛА в просторі з використанням розроблених алгоритмів

Аналіз ефективності визначення місцеположення БПЛА в просторі з використанням розроблених в розділі 2 алгоритмів проведено за допомогою статистичного моделювання. Конфігурація сенсорної мережі показана на рис. 4.1. Вона складається з одинадцяти датчиків для визначення місцеположення БПЛА з координатами: Д0 (0; 0; 0), Д1 (100; 0; 41), Д2 (80.9; 58.77; 9), Д3 (30.9; 95.1; 47), Д4 (-30.9; 95.1; 15), Д5 (-80.9; 58.77; 53), Д6 (-100; 0; 21), Д7 (-80.9; -58.77; 59), Д8 (-30.9; -95.1; 27), Д9 (30.9; 95.1; 65), Д10 (80.9; -58.77; 33). Також на рис. 4.1 показані датчики сенсорної мережі для формування початкових умов адаптивного оцінювання с координатами: Д0 (0; 0; 0), Д1 (100; 0; 41), Д3 (30.9; 95.1; 37), Д5 (-80.9; 58.77; 53), Д7 (-80.9; -58.77; 59), Д9 (30.9; 95.1; 65). При визначенні точносних характеристик в горизонтальній площині по координатах X , Y , БПЛА знаходився на колі з радіусом 300 м відносно опорного датчика Д₀, на висоті 100 м. При визначенні точносних

характеристик по висоті Z , координати БПЛА в горизонтальній площині не змінюються і рівні $X = 150$; $Y = 260$, а по висоті змінюються від 0 до 200 м. СКВ помилок TDOA- і RSS- вимірювань $\sigma_{\Delta} = 1.35$ м і $\sigma_p = 0.5$ дБ, відповідно.

Як показник ефективності використовувалося кругове СКВ $\sigma = \sqrt{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2}$.

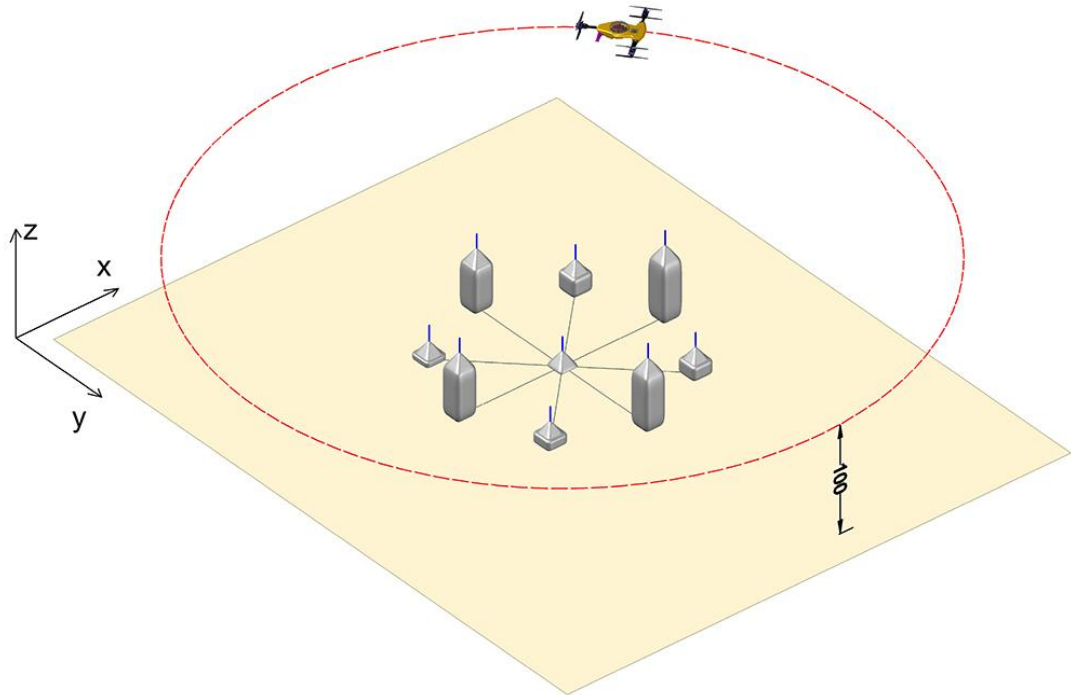


Рис. 4.1. Конфігурація сенсорної мережі з 11 датчиків.

На рис. 4.2 показана залежність фактичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині по шести датчикам рис. 4.1, отримана методом Монте-Карло з використанням виразу (2.7), яка відповідає початковим умовам роботи адаптивного фільтра на основі TDOA-вимірювань. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ коливається в межах від 21 до 75 м.

На рис. 4.2 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{ФК}^{МК}$ (крива 3) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині по одинадцяти датчикам рис. 4.1, для рекурентного алгоритму на основі TDOA-вимірювань, отриманого в підрозділі 2.1. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{ФК}^{МК}$ коливається в межах від 17 до 27 м. Як випливає з рис. 4.2 застосування рекурентного

адаптивного алгоритму дозволяє зменшити круговий СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в 4 рази в порівнянні з початковими умовами.

Також на рис. 4.2 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (крива 4) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині для алгоритму квадратичної корекції.

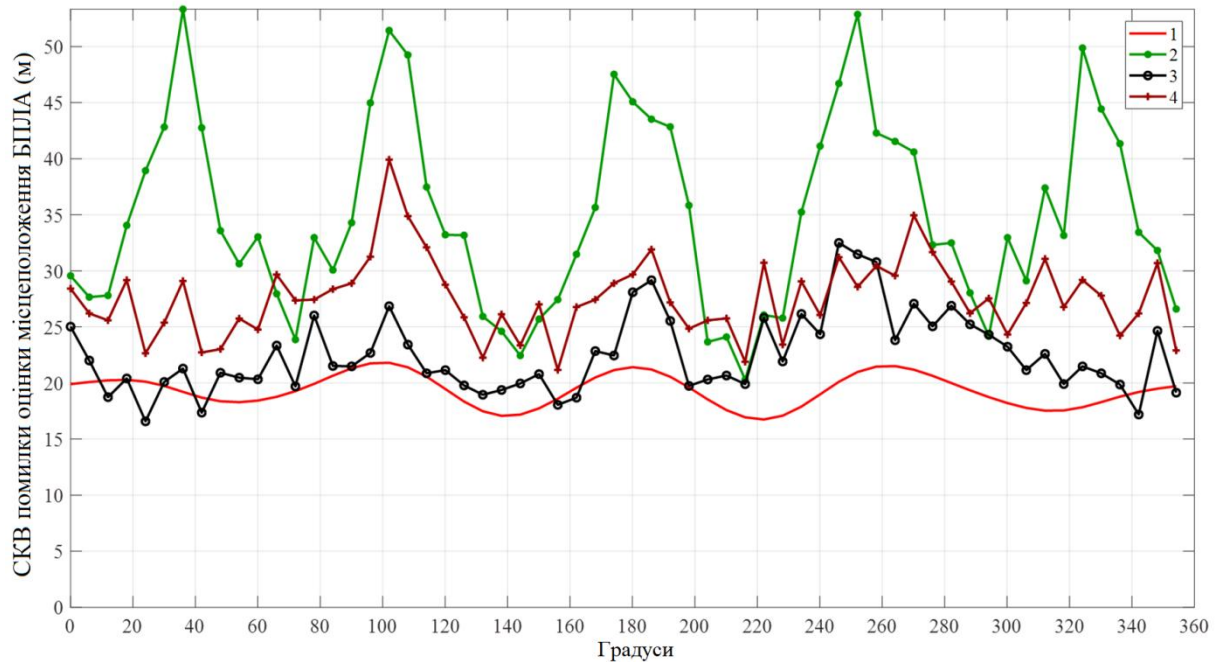


Рис. 4.2 Кругові СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань

На рис. 4.2 показано кругове СКВ помилок оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1), і характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА рекурентного адаптивного алгоритму і алгоритму квадратичної корекції близькі до відповідних значень кругових СКВ нижній границі Рао-Крамера, що свідчить про їх високу ефективність.

На рис. 4.3 показана залежність фактичного СКВ $\hat{\sigma}_{MНK}^{MK}$ (крива 2) помилки оцінки висоти БПЛА по шести датчикам рис. 4.1, отримана методом Монте-Карло з використанням виразу (2.7), яка відповідає початковим умовам роботи адаптивного фільтра на основі TDOA-вимірювань. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{MНK}^{MK}$ росте від 17 до 30 м зі збільшенням висоти.

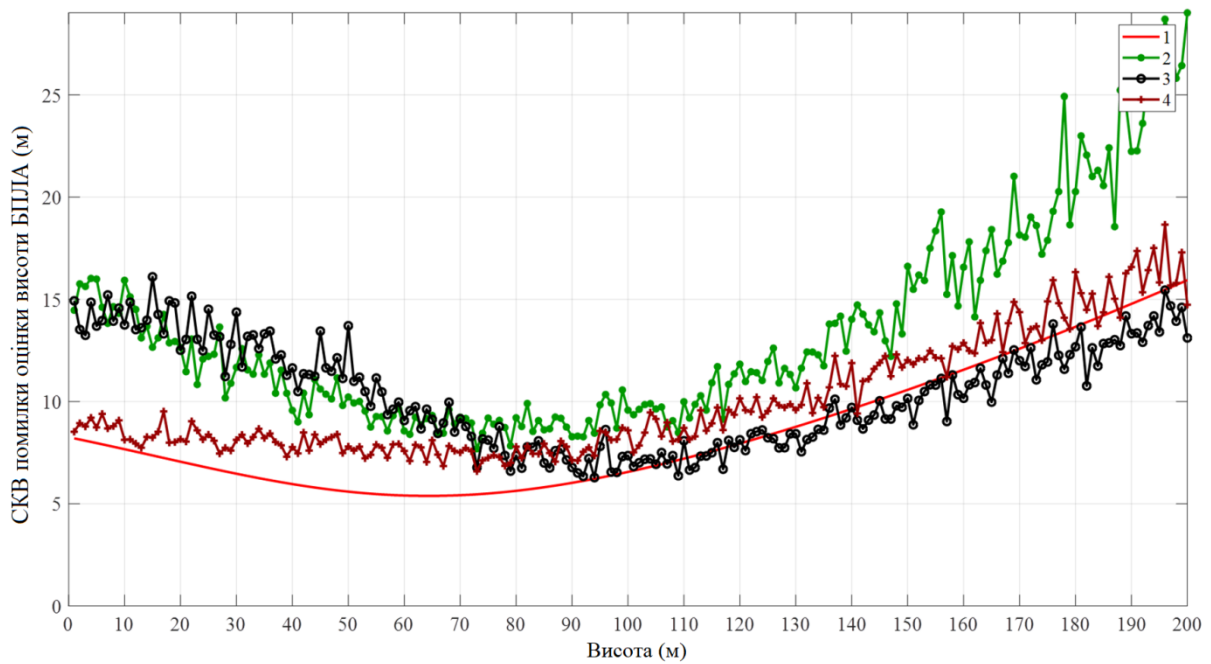


Рис. 4.3 СКВ помилки оцінки висоти БПЛА на основі TDOA-вимірювань.

На рис. 4.3 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ (кривая 3) СКВ помилки оцінки висоти БПЛА по одинадцяти датчикам рис. 4.1, для рекурентного алгоритму на основі TDOA-вимірювань. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ зменшується від 20 до 9 м з ростом висоти до 80 м, після чого починає збільшуватися до 20 м.

На рис. 4.3 показані залежність фактичного (крива 4) СКВ помилки оцінки висоти БПЛА для алгоритму квадратичної корекції.

На рис. 4.3 показано СКВ помилки оцінки висоти БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1). Значення СКВ помилки визначення висоти БПЛА рекурентного адаптивного алгоритму і алгоритму квадратичної корекції близькі до відповідних значень кругових СКВ нижньої границі Рао-Крамера, що свідчить про їх високу ефективність.

На рис. 4.4 показана залежність фактичного кругового СКВ $\hat{\sigma}_{MHK}^{MK}$ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині по шести датчикам рис. 4.1, отриманого методом Монте-Карло з використанням виразу (2.15), яка характеризує початкові умови роботи фільтра (2.12)...(2.14) на основі RSS-вимірювань. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{MHK}^{MK}$ коливається в межах від 30 до 40 м.

На рис. 4.4 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ (крива 3) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині, що визначається отриманим в підрозділі 2.3 алгоритмом (2.12)...(2.14) на основі RSS-вимірювань по одинадцяти датчикам рис. 4.1. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ коливається в межах від 15 до 25 м. Як впливає з рис. 4.4 застосування рекурентного алгоритму дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в 1.7 рази в порівнянні з початковими умовами.

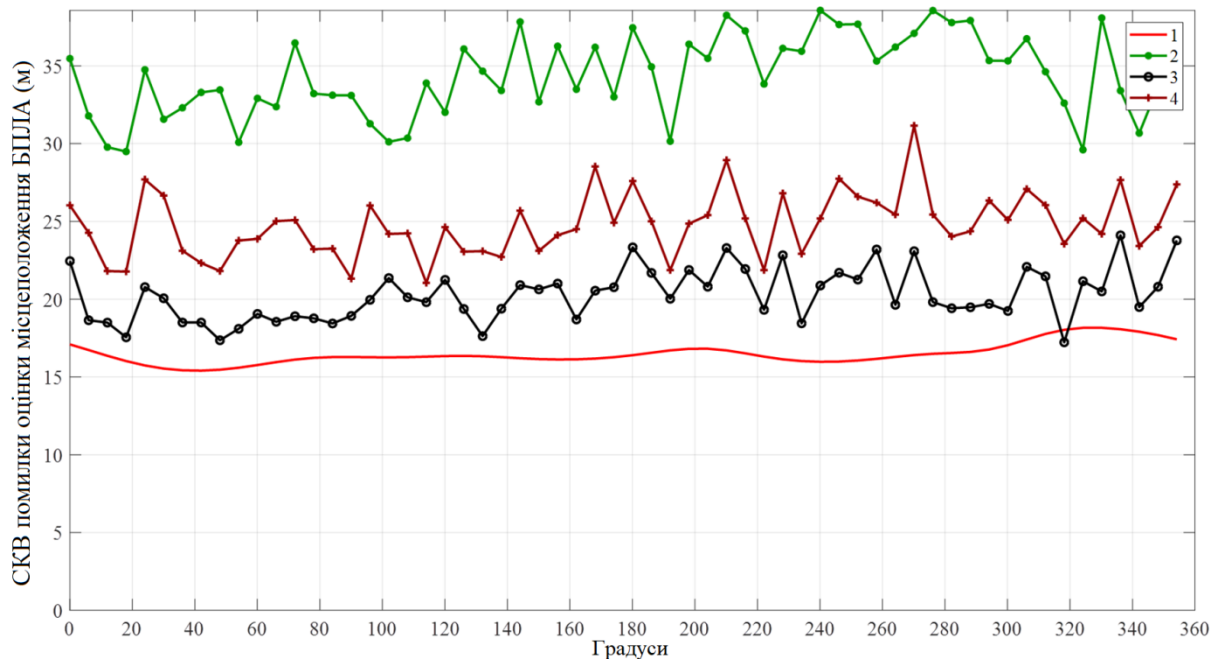


Рис. 4.4 Кругові СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА

На рис. 4.4 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (крива 4) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині для алгоритму квадратичної корекції [30]. Значення СКВ $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ коливається в межах від 23 до 30 м.

На рис. 4.4 показано кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1). Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА рекурентного алгоритму близькі до відповідних значень кругових СКВ нижньої границі Рао-Крамера, що свідчить про високу ефективність алгоритму. Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення

БПЛА розробленим алгоритмом менше ніж СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА відомими алгоритмами [37,38] на 30%.

На рис. 4.5 показана залежність фактичного СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ (Крива 2) помилки оцінки висоти БПЛА по шести датчикам рис. 4.1, отриманого методом Монте-Карло, яка відповідає початковим умовам адаптивного фільтра на основі RSS-вимірювань. Також на рис. 4.5 показані залежності фактичного СКВ $\hat{\sigma}_{ФК}^{МК}$ (крива 3) помилки оцінки висоти БПЛА, що визначається алгоритмом (2.12)...(2.14) на основі RSS-вимірювань по одинадцяти датчикам рис. 4.1. Також на рис. 4.5 показані залежності фактичного СКВ $\hat{\sigma}_{МНК}^{МК}$ (крива 4) помилки оцінки висоти БПЛА для алгоритму квадратичної корекції, а також нижня границя Рао-Крамера (крива 1). Розроблений рекурентний алгоритм і алгоритм квадратичної корекції мають близькі точності характеристики, які при цьому не досягають нижньої границі Рао-Крамера. СКВ помилки оцінки висоти БПЛА на основі RSS-вимірювань більше, ніж на основі TDOA-вимірювань в 3 рази, що обумовлене розстановкою датчиків по висоті.

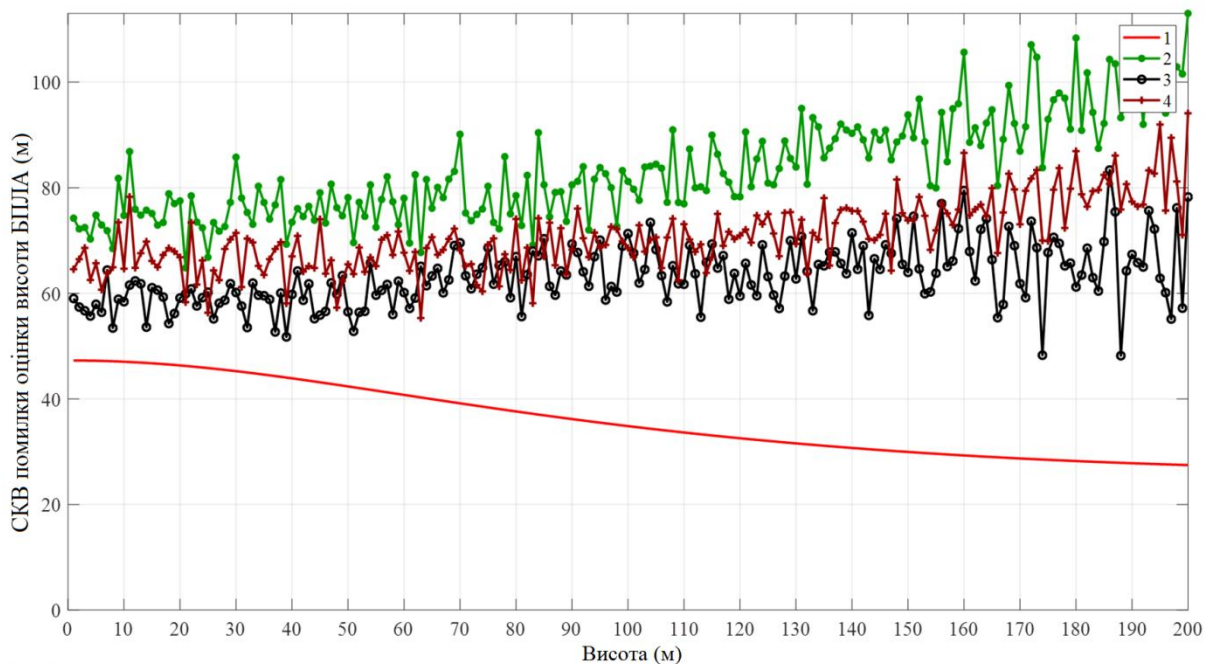


Рис. 4.5 СКВ помилки оцінки висоти БПЛА

Також був проведений аналіз для випадку, коли датчики розташовуються на висотах від 0 до 450 м. На рис. 4.6 наведені залежності

аналогічні показаним на рис. 5. Розширення діапазону висот розстановки датчиків дозволило підвищити точність визначення висоти БПЛА синтезованим алгоритмом в 3 рази. При цьому він забезпечує точносні характеристики близькі з нижньою границею Рао-Крамера, а також забезпечує виграш в порівнянні з алгоритмом квадратичної корекції в 2 рази.

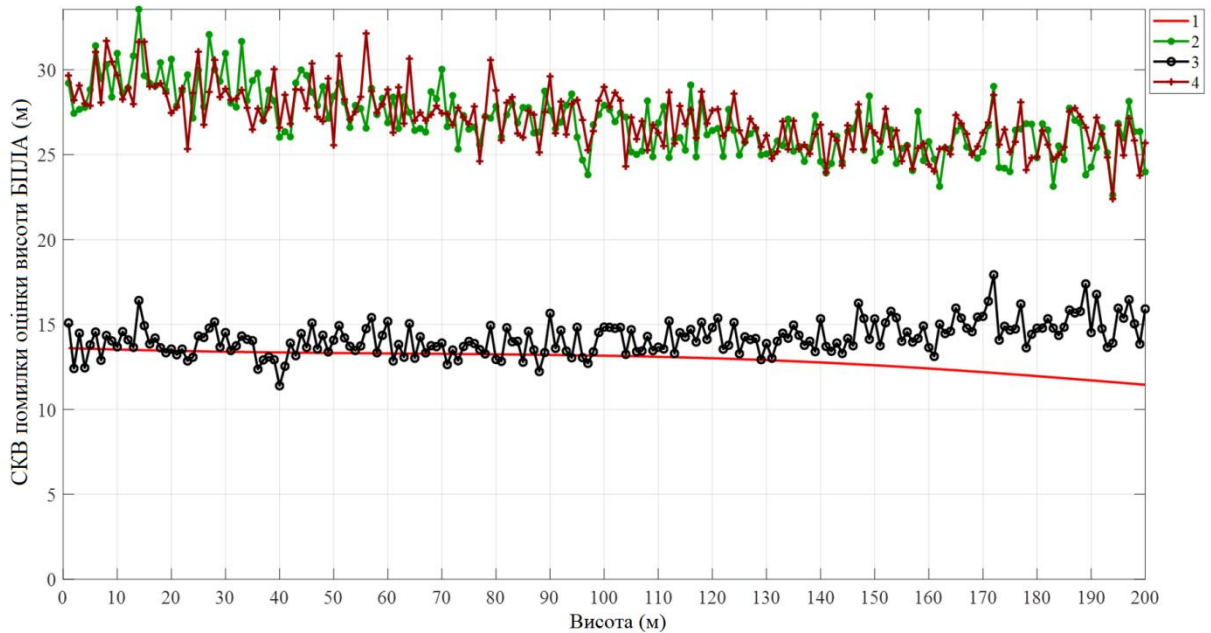


Рис. 4.6 СКВ помилки оцінки висоти БПЛА

На рис. 4.7 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (криві 2,3) кругового СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в горизонтальній площині на основі розробленого в підрозділі 2.5 алгоритму при комплексній обробці TDOA- і RSS- вимірювань. Також на рис. 4.7 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{\Phi K}^{MK}$ (крива 4) кругового СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань.

На рис. 4.7 показано кругове СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА в горизонтальній площині, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1). Значення кругових СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині рекурентного алгоритму близькі до відповідних значень кругових СКВ нижній границі Рао-Крамера, що свідчить про високу ефективність алгоритму. Значення кругових СКВ помилки

визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині при комплексній обробці TDOA- і RSS-вимірювань менше ніж при їх роздільній обробці в 3 рази.

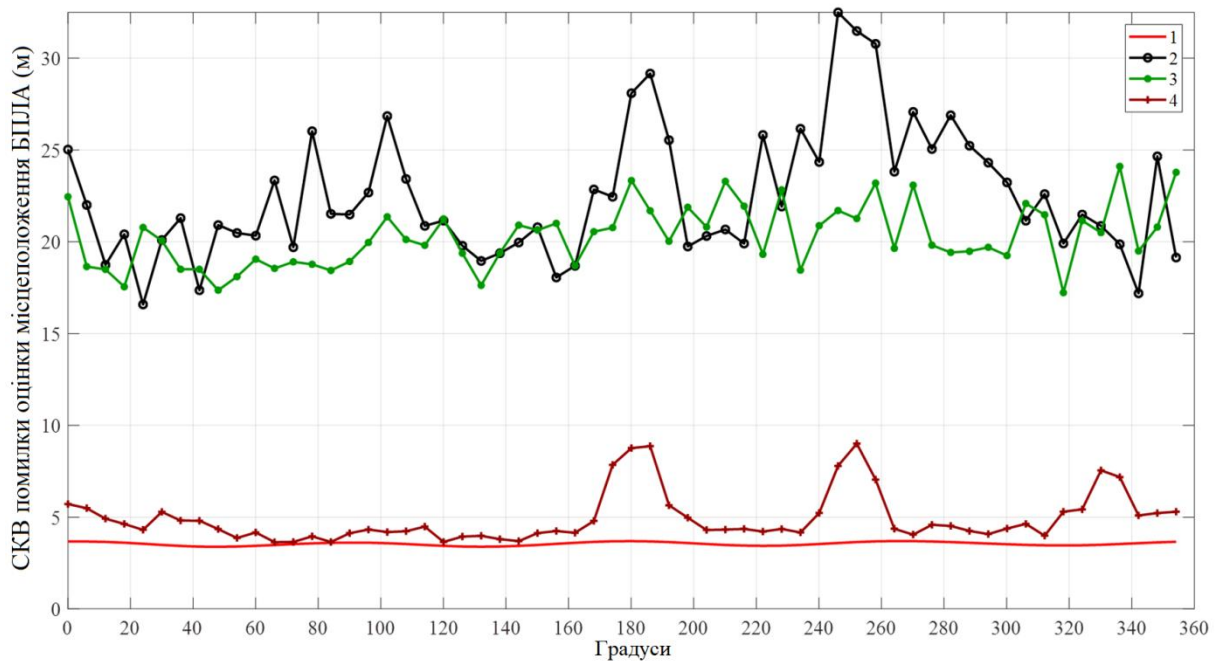


Рис. 4.7 Кругові СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА

На рис. 4.8 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{KK}^{MK}$ (криві 2,3) СКВ помилки оцінки висоти БПЛА для розроблених в підрозділах 2.1 та 2.3 алгоритмів на основі TDOA- і RSS- вимірювань.

Також на рис. 4.8 показані залежності фактичного $\hat{\sigma}_{FK}^{MK}$ (крива 4) СКВ помилки оцінки висоти БПЛА, для розробленого алгоритму в підрозділі 2.5 на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань.

На рис. 4.8 показано СКВ помилки оцінки висоти БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 1). Значення СКВ помилки визначення висоти БПЛА рекурентного алгоритму близькі до відповідних значень кругових СКВ нижньої границі Рао-Крамера, що свідчить про високу ефективність алгоритму. Значення СКВ помилки визначення висоти БПЛА розробленим алгоритмом на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань є близьким до значень, отриманих на основі TDOA-вимірювань.

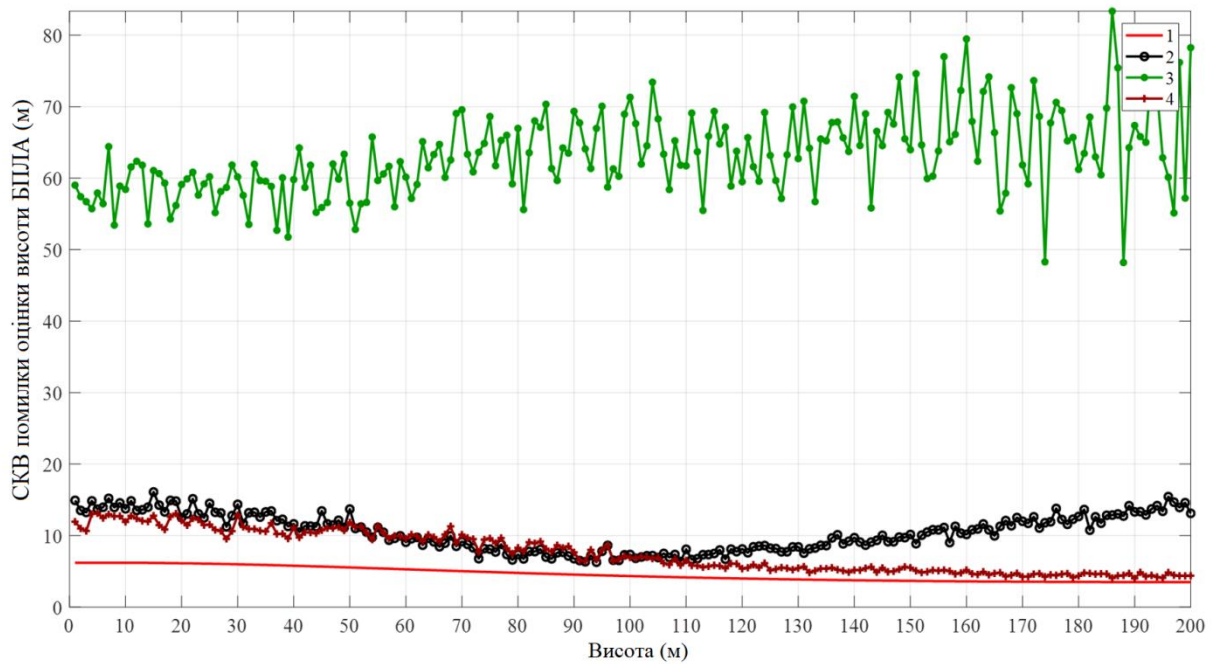


Рис. 4.8 СКВ помилки оцінки висоти БПЛА

4.2 Аналіз ефективності визначення параметрів руху маневруючого БПЛА в просторі з використанням розроблених алгоритмів

Аналіз ефективності визначення місцеположення параметрів руху маневруючого БПЛА в просторі з використанням розроблених в розділі 3 алгоритмів проведено за допомогою статистичного моделювання. Конфігурація бездротової сенсорної мережі складається з дев'яти датчиків рис. 4.9 з координатами: D_0 (0;0;0), D_1 (0;100;44), D_2 (70.71; 70.71;6), D_3 (100;0;48), D_4 (70.71;- 70.71;10), D_5 (0;-100;52), D_6 (-70.71;-70.71;14), D_7 (-100;0;56), D_8 (-70.71; 70.71; 18). СКВ помилок TDOA-вимірювань – $\sigma_{\Delta} = 2.4$ м, RSS-вимірювань – $\sigma_p = 1$ дБ. Темп надходження інформації $T=1$ с.

Для наочності роботи алгоритму була сформована тестова траєкторія руху БПЛА (рис. 4.9). Траєкторія включає вісім ділянок: перший $1 \leq k \leq 19$ – рівномірний рух, другий $20 \leq k \leq 27$ – маневр, зниження висоти, третій $28 \leq k \leq 42$ – рівномірний рух, четвертий $43 \leq k \leq 45$ – маневр, п'ятий $46 \leq k \leq 59$ – рівномірний рух, шостий $60 \leq k \leq 67$ – маневр, підйом на висоту, сьомий

$68 \leq k \leq 85$ – рівномірний рух, восьмий $85 \leq k \leq 114$ – зависання на місці, дев'ятий $115 \leq k \leq 130$ – рівномірний рух. Випробування проводилися по ста реалізаціях.

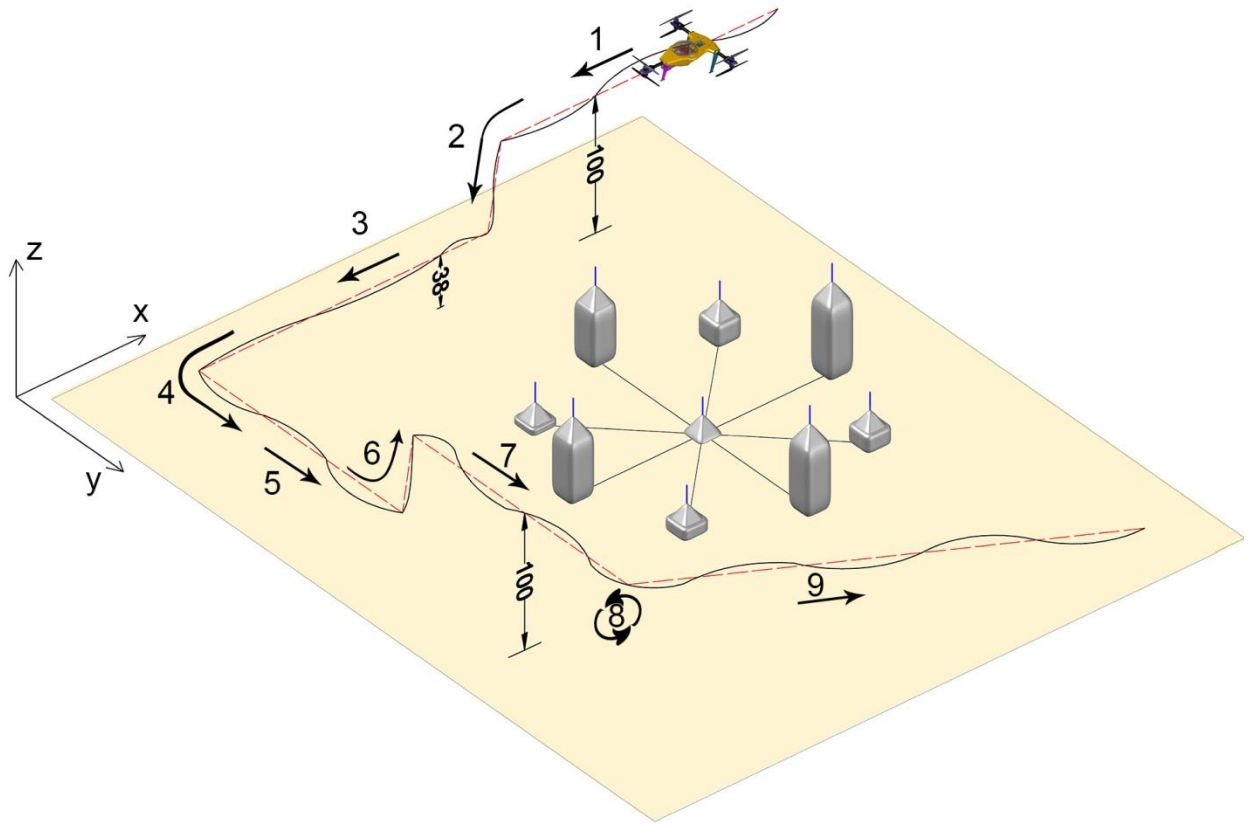


Рис. 4.9. Конфігурація сенсорної мережі з 9 датчиків і траєкторія руху БПЛА.

Для опису руху БПЛА використовувалася модель з випадковою структурою (1), яка враховує три основних види руху $M = 3$: зависання $j = 1$, майже рівномірний рух $j = 2$, рух з маневром $j = 3$. Вектор стану $u^T(k) = (x(k), \dot{x}(k), \ddot{x}(k), y(k), \dot{y}(k), \ddot{y}(k), z(k), \dot{z}(k), \ddot{z}(k))$ включає координати положення, швидкості і прискорення по осях X, Y, Z . Матриці, що входять в модель руху (3.1) мають вид

$$F_j^{tr}(k, k-1) = \begin{bmatrix} F_j^b & 0 & 0 \\ 0 & F_j^b & 0 \\ 0 & 0 & F_j^b \end{bmatrix}, \quad G_j(k) = \begin{bmatrix} G_j^b & 0 & 0 \\ 0 & G_j^b & 0 \\ 0 & 0 & G_j^b \end{bmatrix},$$

де $F_j^b, G_j^b, j = \overline{1,3}$ мають вид

$$F_1^b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_2^b = \begin{bmatrix} 1 & T & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, F_3^b = \begin{bmatrix} 1 & T & \frac{T^2}{2} \\ 0 & 1 & T \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$G_1^b = \begin{bmatrix} a_1 \cdot T \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, G_2^b = \begin{bmatrix} \frac{a_2 \cdot T^2}{2} \\ a_2 \cdot T \\ 0 \end{bmatrix}, G_3^b = \begin{bmatrix} \frac{a_3 \cdot T^3}{6} \\ \frac{a_3 \cdot T^2}{2} \\ a_3 \cdot T \end{bmatrix};$$

a_1, a_2, a_3 — СКВ випадкових флуктуацій швидкості, прискорення і швидкості зміни прискорення БПЛА для першого, другого і третього типів руху, відповідно. При моделюванні покладалося: $a_1 = 0.05 \text{ м/с}$; $a_2 = 0.1 \text{ м/с}^2$; $a_3 = 6 \text{ м/с}^3$.

Вектор початкової оцінки для алгоритму адаптивного оцінювання (3.7), (3.10)...(3.15), має вид:

$$\hat{u}_j^T(0) = (\hat{x}_{LS}; 0; 0; \hat{y}_{LS}; 0; 0; \hat{z}_{LS}; 0; 0; 0), \quad j = \overline{1, 3}, \quad (4.1)$$

де $\hat{x}_{LS}, \hat{y}_{LS}, \hat{z}_{LS}$ — визначаються з використанням методу найменших квадратів за вимірюваннями на основі TDOA-вимірювань [27].

Кореляційні матриці помилки початкової оцінки описуються виразом

$$\hat{P}_j(0) = \text{diag}\{P_j^x, P_j^y, P_j^z, \sigma_v^2\}, \quad j = \overline{1, 3}, \quad (4.2)$$

де $P_j^x, j = \overline{1, 3}$ — діагональні матриці

$$P_1^x = \text{diag}\{\sigma_{xLS}^2, 0, 0\},$$

$$P_2^x = \text{diag}\{\sigma_{xLS}^2, \frac{(2V_{\max})^2}{12}, 0\}, P_3^x = \text{diag}\{\sigma_{xLS}^2, \frac{(2V_{\max})^2}{12}, \frac{(2a_{\max})^2}{12}\};$$

V_{\max}, a_{\max} — максимальні швидкість і прискорення БПЛА; σ_{xLS}^2 — дисперсія помилки оцінки \hat{x}_{LS} . Матриці $P_j^y, P_j^z, j = \overline{1, 3}$ визначаються аналогічно.

Вектори $\frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$ і $\frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^{l-1}(k))}{\partial u(k)}$, що входять в рівняння (3.13)...(3.15),

мають вид

$$\frac{\partial h_{\Delta}^l(\hat{u}_{pj}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} = \left[\frac{\hat{x}(k-1) - x^l}{\hat{R}^l} - \frac{\hat{x}(k-1)}{\hat{R}^0}; 0; 0; \frac{\hat{y}(k-1) - y^l}{\hat{R}^l} - \frac{\hat{y}(k-1)}{\hat{R}^0}; 0; 0; \frac{\hat{z}(k-1) - z^l}{\hat{R}^l} - \frac{\hat{z}(k-1)}{\hat{R}^0}; 0; 0; -1 \right],$$

$$\frac{\partial h_p^l(\hat{u}_{\Delta j}^{l-1}(k))}{\partial u(k)} = \frac{-10 \cdot \alpha}{\ln(10)} \cdot \left[\frac{\hat{x}(k-1) - x^l}{\hat{R}^{l/2}}; 0; 0; \frac{\hat{y}(k-1) - y^l}{\hat{R}^{l/2}}; 0; 0; \frac{\hat{z}(k-1) - z^l}{\hat{R}^{l/2}}; 0; 0 \right],$$

де $\hat{R}^l = \sqrt{(\hat{x}(k-1) - x^l)^2 + (\hat{y}(k-1) - y^l)^2 + (\hat{z}(k-1) - z^l)^2}$ – оцінка відстані між l -м датчиком і БПЛА, $l = \overline{1, L}$ $\hat{R}^0 = \sqrt{\hat{x}(k-1)^2 + \hat{y}(k-1)^2 + \hat{z}(k-1)^2}$ – оцінка відстані між опорним датчиком і БПЛА.

На рис. 4.10 показані залежності ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло при використанні алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань. Даний адаптивний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнавання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

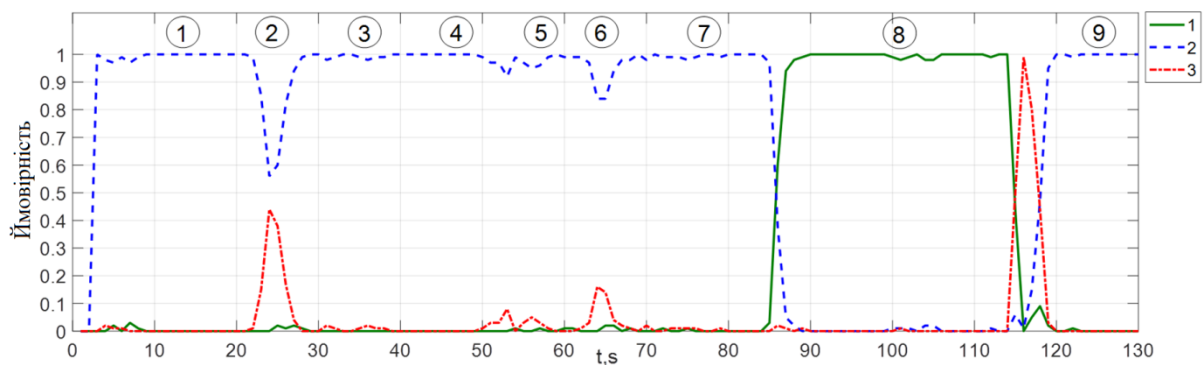


Рис. 4.10. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.11 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром на основі TDOA-вимірювань. Також на рис. 4.11 показані залежності СКВ помилки визначення місцезнаходження БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4), яка характеризує потенційну можливу точність визначення координат БПЛА. Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з СКВ помилки визначення місцеположення на основі TDOA-вимірювань в 2 – 4 рази.

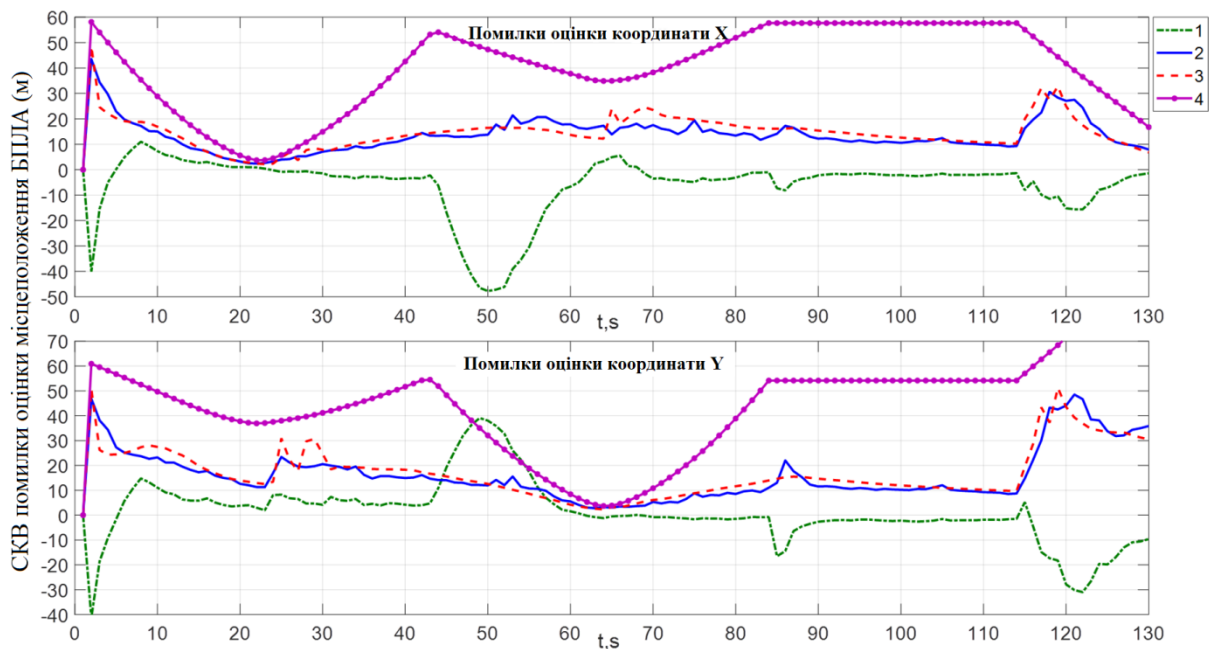


Рис. 4.11. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.12 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки висоти БПЛА по координаті Z , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром на основі TDOA-вимірювань. Також на рис. 4.12 показані залежності СКВ помилки вимірювання висоти БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4). Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення висоти БПЛА в

порівнянні з СКВ помилки визначення висоти на основі TDOA-вимірювань в 2 – 4 рази.

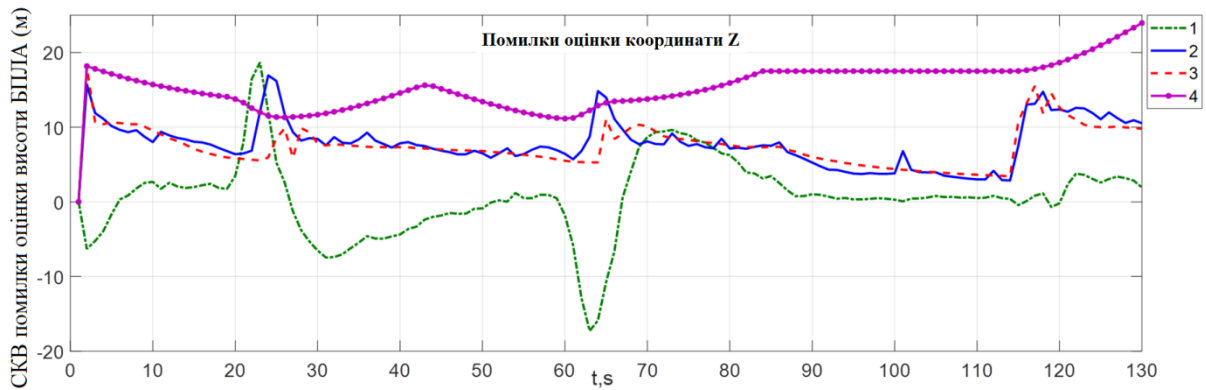


Рис. 4.12. СКВ помилки оцінки висоти БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.13 показані залежності ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло при використанні алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань при невідомій потужності передавача. Даний адаптивний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнавання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

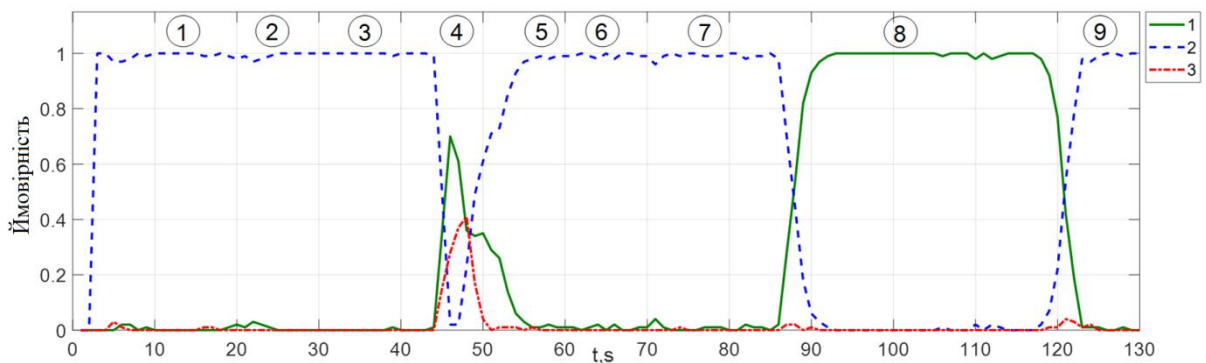


Рис. 4.13. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.14 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром на основі RSS-вимірювань.

Також на рис. 4.14 показані залежності СКВ помилки визначення місцезнаходження БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4). Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в порівнянні з СКВ помилки визначення місцеположення на основі RSS-вимірювань в 2 – 4 рази.

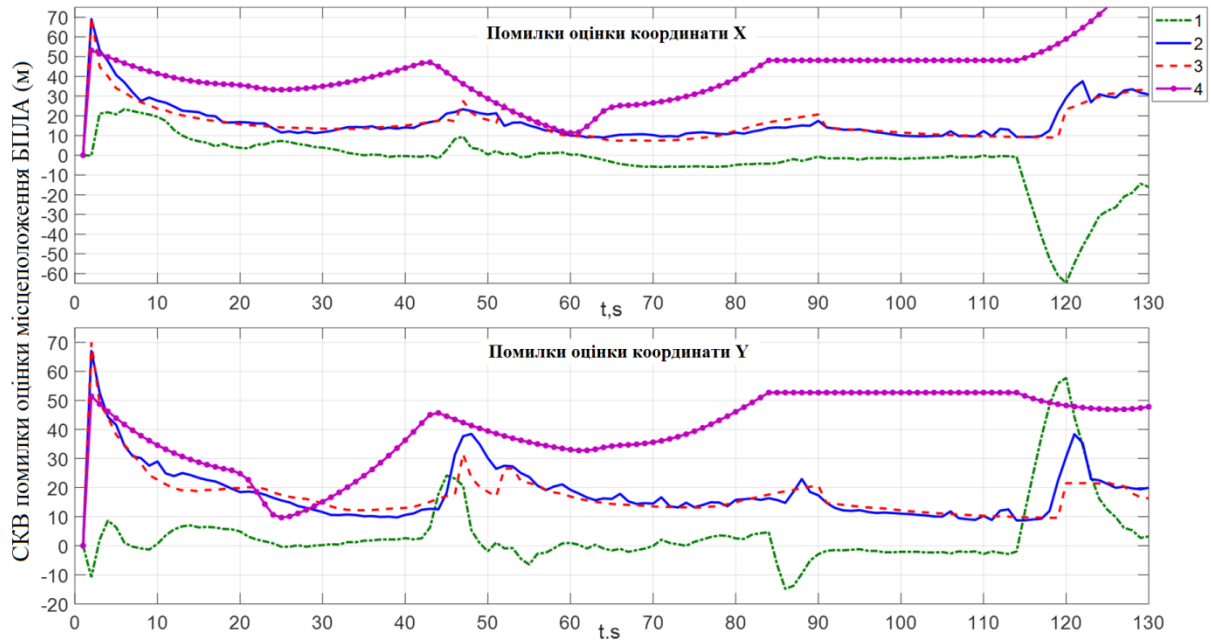


Рис. 4.14. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.15 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки висоти БПЛА по координаті Z , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром на основі RSS-вимірювань.

Також на рис. 4.15 показані залежності СКВ помилки вимірювання висоти БПЛА, яке відповідає нижній границі Рао-Крамера (крива 4). Застосування траєкторної фільтрації дозволяє зменшити СКВ помилки визначення висоти БПЛА в порівнянні з СКВ помилки визначення висоти на основі RSS-вимірювань в 2 – 4 рази.

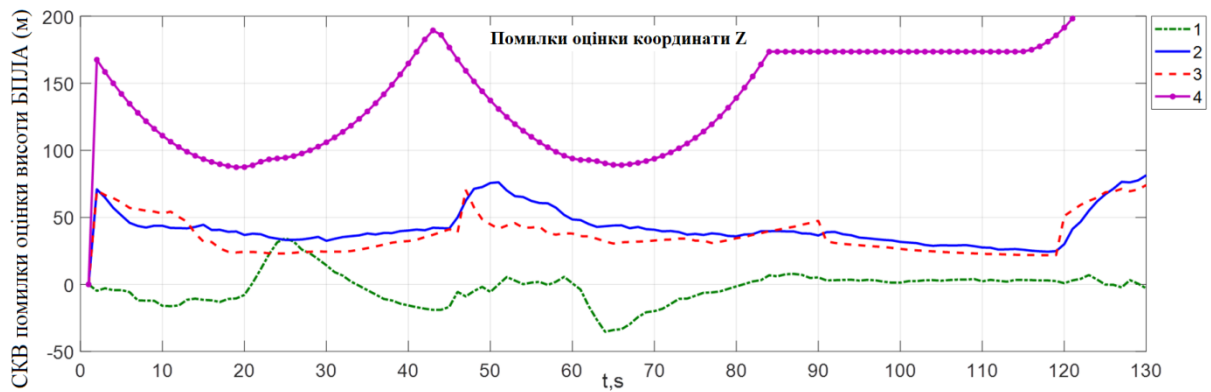


Рис. 4.15. СКВ помилки оцінки висоти БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 3.16 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (криві 1) та СКВ (криві 2) помилки оцінки потужності передавача БПЛА, а також СКВ (криві 3) помилки оцінки, розрахованих розробленим фільтром. Розроблений фільтр дозволяє зменшити СКВ помилки потужності передавача БПЛА з 2.5 дБ до 0.3 дБ.

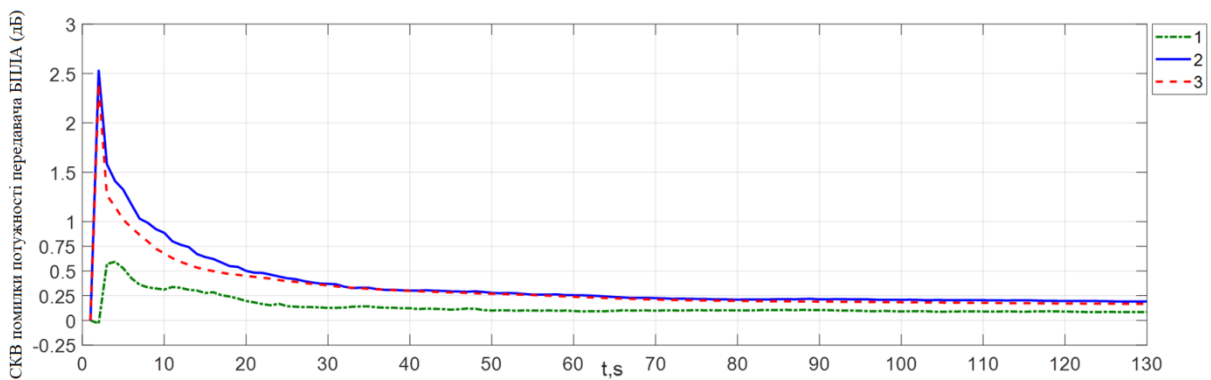


Рис. 3.16. СКВ помилки потужності передавача БПЛА

На рис. 4.17 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром при комплексній обробці TDOA- і RSS- вимірювань. Також на рис. 4.17 показані залежності СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y адаптивних фільтрів при незалежній обробці TDOA- (криві 4) і RSS- (криві 5) вимірювань. Комплексне використання даних дозволяє зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА по координатах X , Y в 2–5 рази.

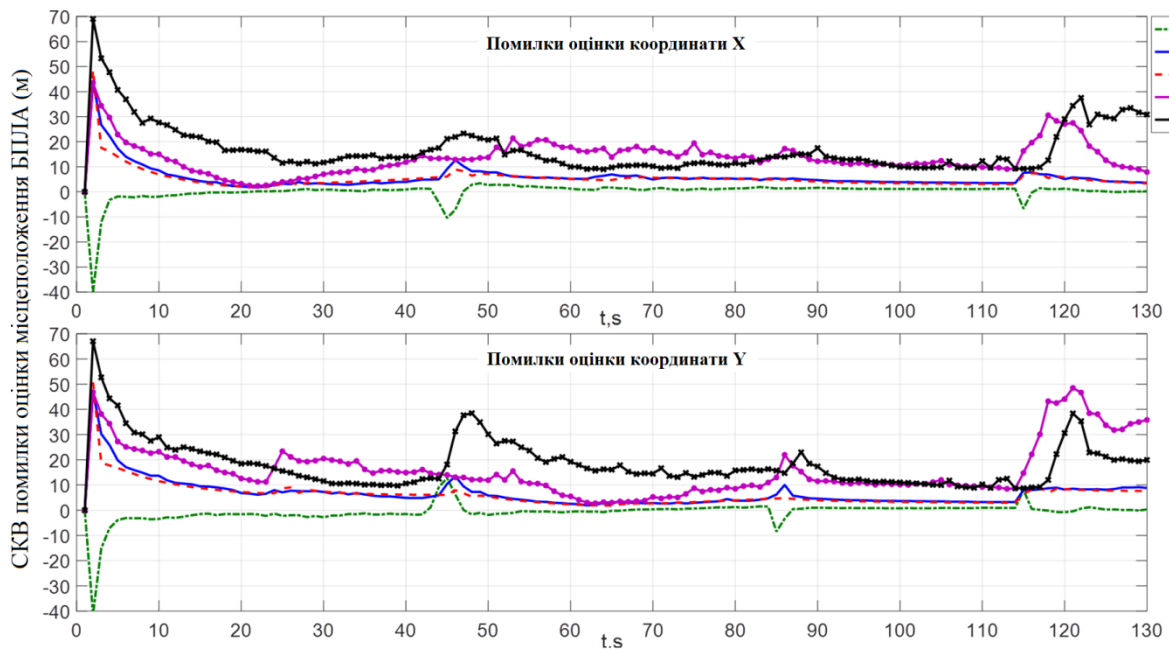


Рис. 4.17. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.18 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки висоти БПЛА, а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром при комплексній обробці TDOA- і RSS- вимірювань. При цьому точнісні характеристики по висоті при комплексній обробці збігаються з точносних характеристиками методу на основі TDOA-вимірювань.

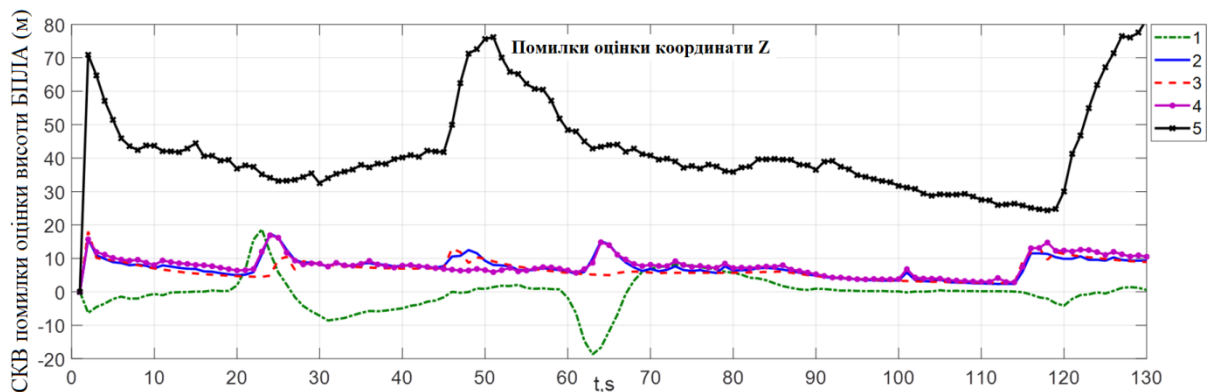


Рис. 4.18. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.19 показані залежності ймовірностей розпізнавання руху першого (крива 1, неперервна лінія), другого (крива 2, штрихова лінія) і третього (крива 3, штрих-пунктирна лінія) видів, отримані методом Монте-Карло з використанням адаптивного фільтру при комплексній обробці

TDOA- і RSS- вимірювань. Даний фільтр дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Ймовірність розпізнавання маневру нижче, що обумовлено його короткочасністю.

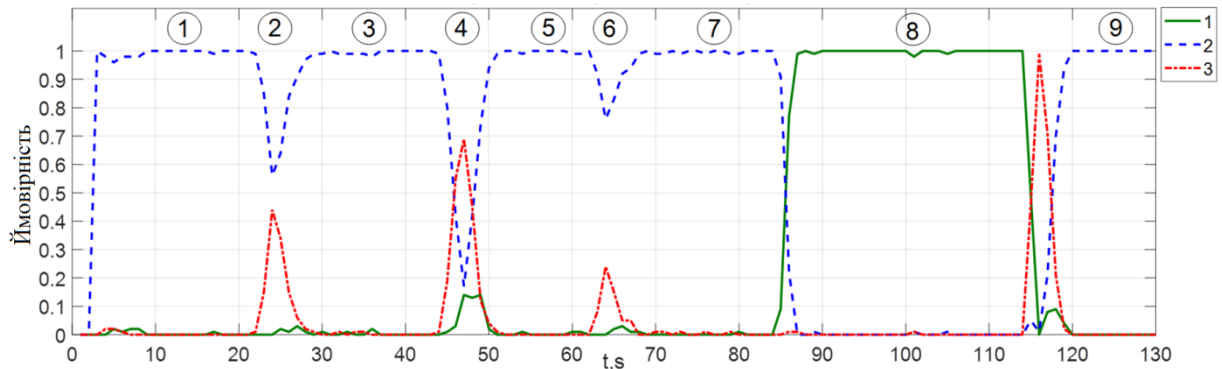


Рис. 4.19. Ймовірності визначення типу руху при використанні адаптивного фільтру

На рис. 4.20 показані отримані методом Монте-Карло залежності математичного очікування (криві 1) та СКВ (криві 2) помилки оцінки потужності передавача БПЛА, а також СКВ (криві 3) помилки оцінки, розрахованих розробленим фільтром. Розроблений фільтр дозволяє зменшити СКВ помилки потужності передавача БПЛА з 2.5дБ до 0.2дБ.

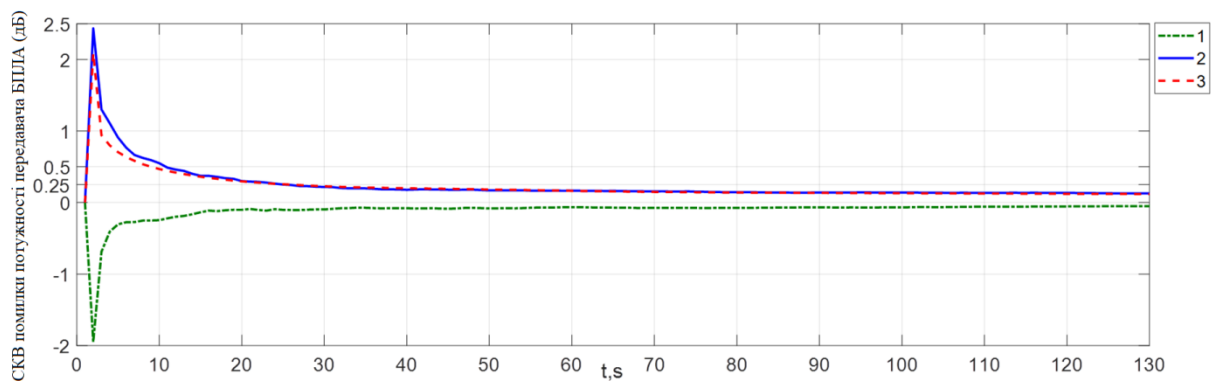


Рис. 4.20. СКВ помилки потужності передавача БПЛА

Також був проведений аналіз розробленого алгоритму адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань з використанням точностних характеристик високочастотного сенсора N6841A. СКВ помилки вимірювань при використанні TDOA-вимірювань $\sigma_{\Delta} = 7.5\text{ м}$ і RSS-

вимірювань $\sigma_p = 3$ дБ. На рис. 4.21 показані отримані при цьому методом Монте-Карло залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого адаптивним фільтром. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА знаходяться в діапазоні 7 – 20 м.

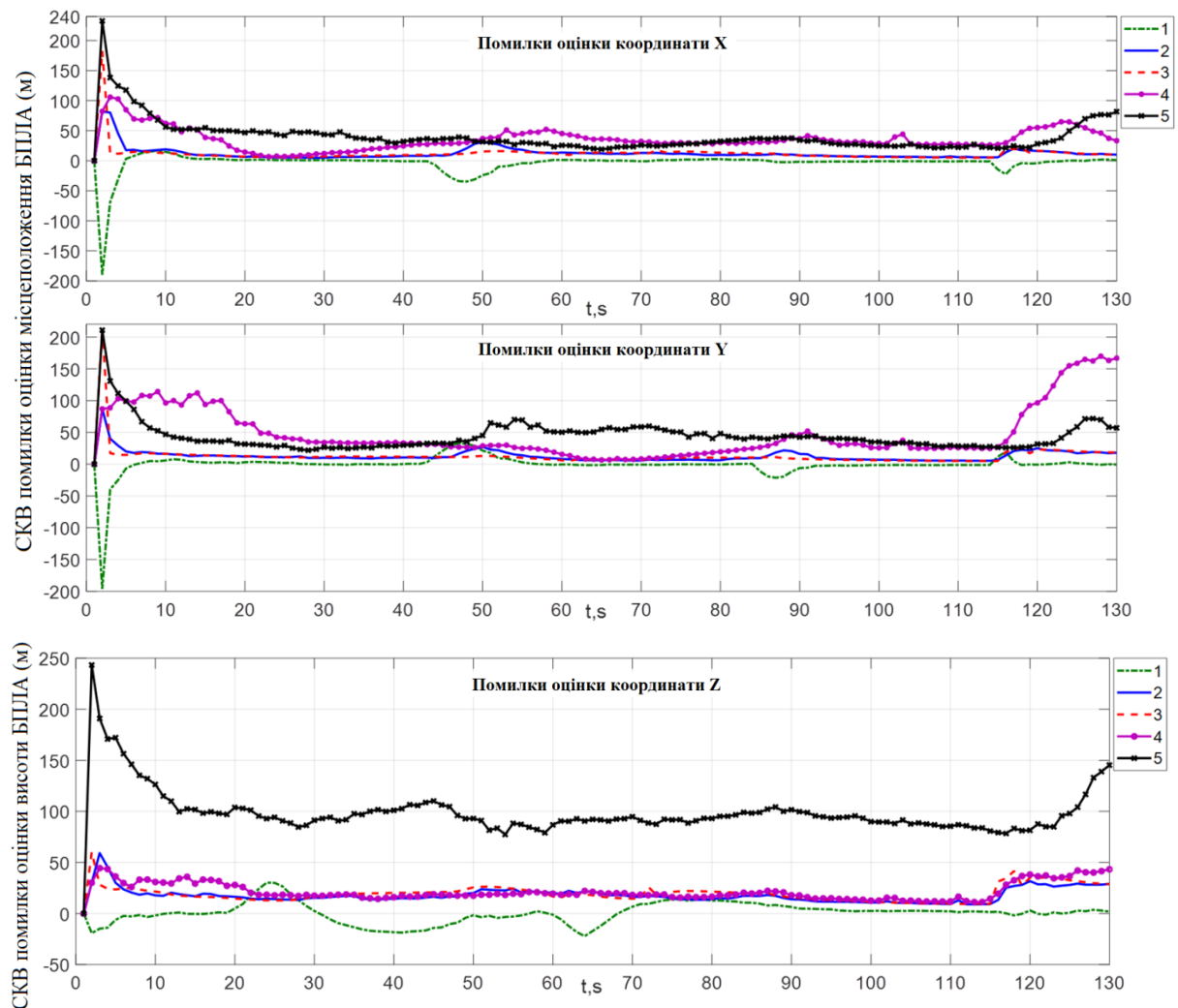


Рис. 4.21. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні адаптивного фільтра

Також було виконано аналіз відомого алгоритму фільтрації параметрів руху БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі, в якому спочатку визначається місце розташування БПЛА за допомогою методу найменших квадратів, по всіх вимірах, що надійшли. Отримані вимірювання використовуються в алгоритмі траєкторної фільтрації на основі фільтру Калмана.

На рис. 4.22 показані отримані методом Монте-Карло з використанням даного алгоритму залежності математичного очікування (крива 1) і СКВ (крива 2) помилки оцінки місцеположення БПЛА по координатах X , Y , а також СКВ (крива 3) помилки оцінки, розрахованого фільтром Калмана. Як випливає з рис. 4.37 помилки оцінки положення БПЛА містять систематичні складові, які більш ніж на порядок перевищує СКВ помилки оцінки місцеположення, що свідчить про непрацездатність даного алгоритму.

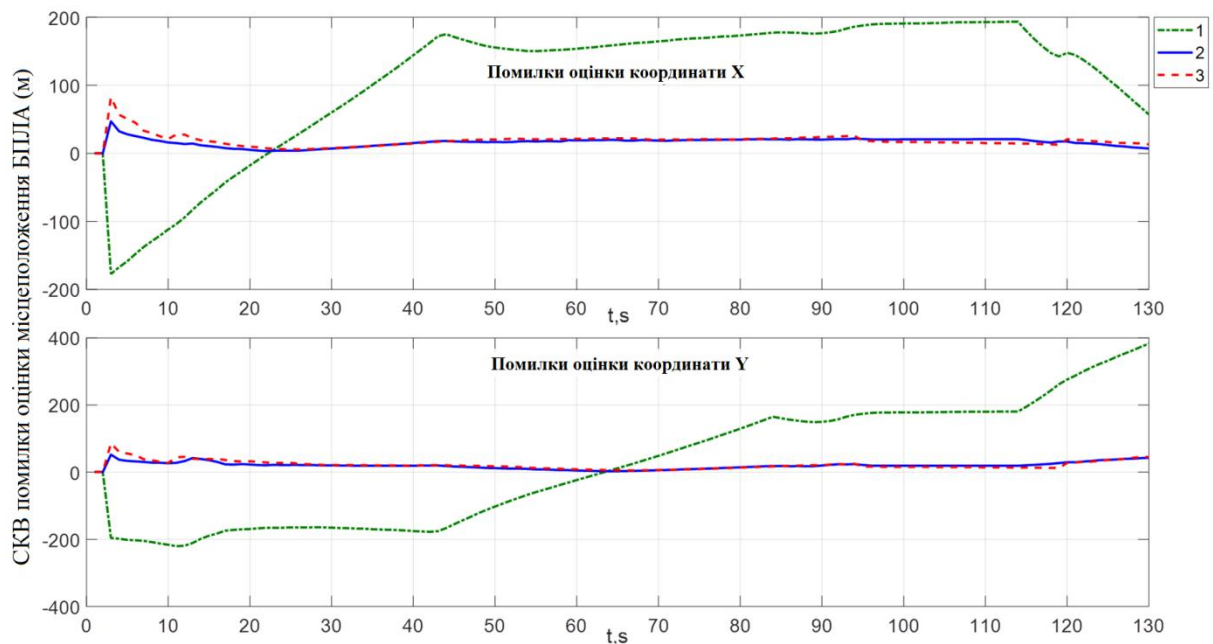


Рис. 4.22. СКВ помилки оцінки місцеположення БПЛА при використанні фільтра Калмана

Для наочності на рис. 4.23 показана справжня траєкторія руху маневруючого БПЛА (крива 1), траєкторія, розрахована розробленим адаптивним фільтром (крива 2) і також траєкторія, отримана фільтром Калмана (крива 3). Як видно з рис. 4.23, алгоритм калмановської фільтрації, який використовує оцінки місцеположення БПЛА на основі методу найменших квадратів є непрацездатним. Тому аналіз алгоритму калмановської фільтрації на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірів не розглядався.

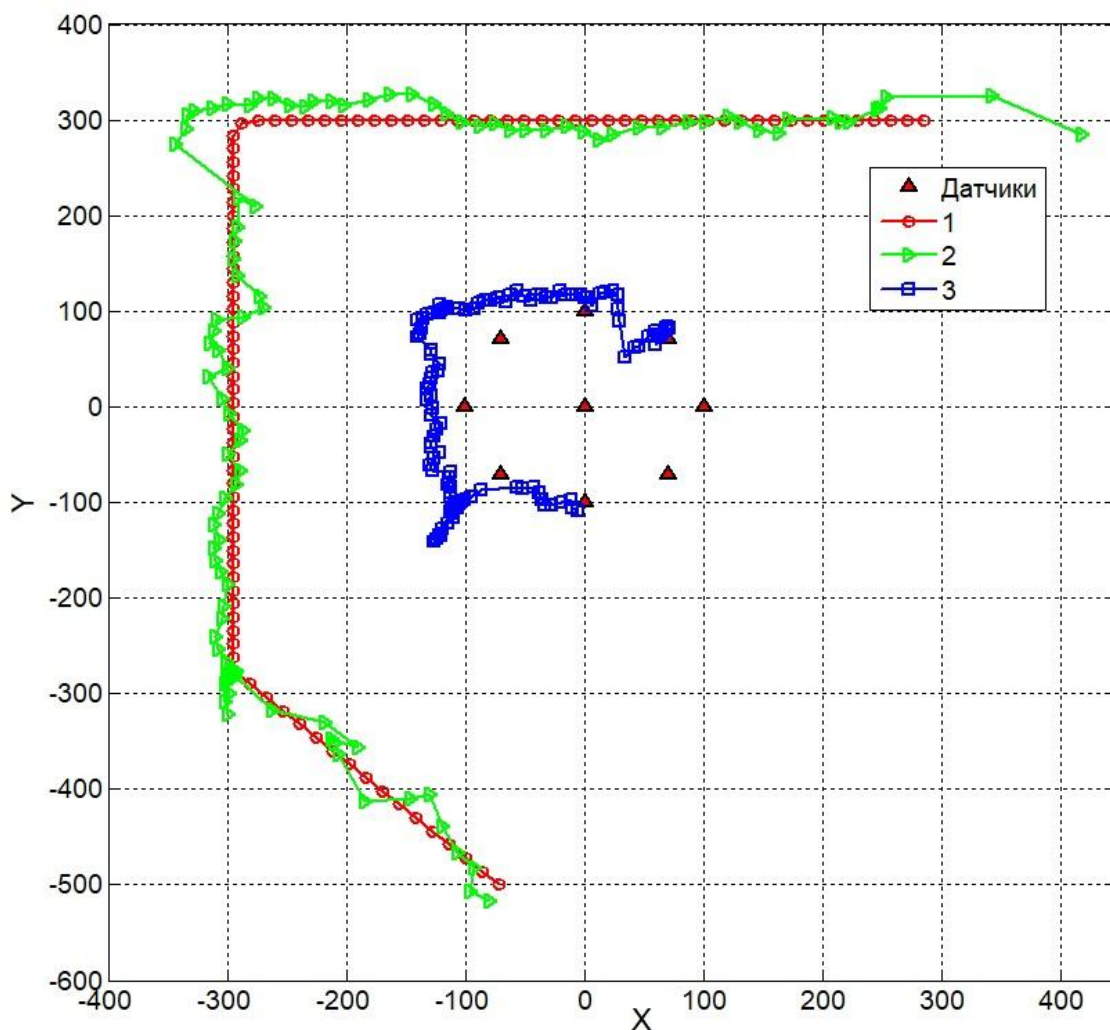


Рис. 4.23. Траєкторія руху маневруючого БПЛА

4.3. Аналіз можливості практичної реалізації розроблених алгоритмів

При реалізації розроблених алгоритмів виникає завдання визначення вимог до ЦОМ по швидкодії арифметичного пристрою [51,84]. Тому, виконаємо аналіз обчислювальних витрат, які потрібні для реалізації:

- алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань (підрозділ 3.1);
- алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань (підрозділ 3.3);

– алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань (підрозділ 3.6);

У таблиці. 4.1 приведено число операцій, які потрібні для реалізації однієї ітерації алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань та RSS-вимірювань.

Таблиця 4.1

Величина, яка обчислюється	Число операцій множення	Число операцій ділення	Число операцій додавання
1	2	3	4
$W_j^*(k)$	M^2	0	$M(M-1)$
$W_j(k)$	$M(L+4)$	$M(2L)$	$2M(L-1)$
$u_j^*(k)$	$M^2(N^2+N+1)$	M^2N	$M(N-1)N(N-1)$
$P_j^*(k)$	$M^2(2L^3+L^2+1)$	$M^2(L^2)$	$M(M-1) \cdot$ $\cdot(2L(L^2-1)+1)$
$K_j^l(k)$	LMN^2	LMN	$LMN(N-1)$
$\hat{u}_j^l(k)$	LMN	0	$LM(N+1)$
$\hat{P}_j^l(k)$	$LM(2N^2)$	0	$LM(N^2+N(N-1))$
$D_j^l(k)$	$LM(N^2+N)$	0	$LM(N(N-1)+$ $+(N-1)+1)$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт	$2L^3M^2+L^2M^2+4LMN$ $+2LMN+LM+M^2N^2$ $+M^2N+3M^2+4M$	L^2M^2+2LM $+M^2N+LMN$	$2L^3M^2-2L^3M-2LM^2+$ $+4LMN^2-LMN+5LM$ $+2M^2+MN^3-2MN^2+$ $+MN-4M$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт при $L=8,$ $M=3, N=10$	20925	954	17916

У таблиці 4.2 наведено число операцій, які потрібні для реалізації однієї ітерації алгоритму адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань.

Таблиця 4.2

Величина, яка обчислюється	Число операцій множення	Число операцій ділення	Число операцій додавання
1	2	3	4
$W_j^*(k)$	M^2	0	$M(M-1)$
$W_j(k)$	$2M(L+4)$	$4ML$	$4M(L-1)$
$u_j^*(k)$	$M^2(N^2+N+1)$	M^2N	$M(N-1)N(N-1)$
$P_j^*(k)$	$M^2(2L^3+L^2+1)$	$M^2(L^2)$	$M(M-1) \cdot$ $\cdot(2L(L^2-1)+1)$
$K_{\Delta j}^l(k)+$ $K_{pj}^l(k)$	$2LMN^2$	$2LMN$	$2LMN(N-1)$
$\hat{u}_{\Delta j}^l(k)+\hat{u}_{pj}^l(k)$	$2LMN$	0	$2LM(N+1)$
$\hat{P}_{\Delta j}^l(k)+\hat{P}_{pj}^l(k)$	$2LM(2N^2)$	0	$2LM(N^2+N(N-1))$
$D_{\Delta j}^l(k)+$ $D_{pj}^l(k)$	$2LM(N^2+N)$	0	$2LM(N(N-1)+$ $+(N-1)+1)$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт	$2L^3M^2+L^2M^2+8LMN$ $+4LMN+2LM+M^2N^2$ $+M^2N+3M^2+8M$	L^2M^2+4LM $+M^2N+2LM$	$2L^3M^2-2L^3M-2LM^2+$ $+8LMN^2-2LMN+8LM$ $+2M^2+MN^3-2MN^2+$ $+MN-6M$
Всього операцій для всіх гіпотез на один такт при $L=8,$ $M=3, N=10$	31041	1242	27342

Оснoву сучасних ЦОМ становлять мікропроцесори, яких існує велика кількість різновидів, що розрізняються призначенням і функціональними можливостями: мікропроцесори для універсальної обробки даних, для цифрової обробки сигналів, мікроконтролери. Широке поширення знаходять мікропроцесори DSP (Digital Signal Processing), які розраховані на обробку великих об'ємів даних в реальному часі. Їх особливостями є наявність операцій множення зі складанням, апаратного помножувача, що дозволяє виконувати множення двох чисел за один такт, обробки даних в форматі з плаваючою комою, різноманітних бітових операцій. Варто зазначити, що рішення задач обробки сигналів на універсальних процесорах с RISC-, CISC-архітектурою на рівних тактових частотах може займати в кілька разів більше часу в порівнянні з процесорами DSP. Тому рішення задачі виявлення траєкторії цілі може виконуватися на їх основі. Серед сучасних DSP процесорів для обробки чисел з плаваючою точкою можна виділити моделі компаній Analog Devices [85] і Texas Instruments [86].

Для реалізації квазіоптимальних алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі TDOA-, RSS- вимірювань і комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань може бути використаний сигнальний процесор DSP TMS320C6747 виробництва компанії Texas Instruments з тактовою частотою 456 МГц, час виконання однієї інструкції 2.2 нс [87]. Операції додавання і множення відпрацьовуються інструкціями ADDSP.L2X, MPYSP.M2X, і при використанні типу даних «double», потрібно 14 тактів для додавання і множення. Тому для алгоритму адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі необхідно 1.22 мс, на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі – 1.22 мс, на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань – 1.83 мс.

Висновки по четвертому розділу

1. Розроблений рекурентний алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-вимірювань сенсорної мережі дозволяє отримати характеристики близькі до потенційно досяжних, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера, за всіма трьома просторовими координатам і в порівнянні з початковими умовами зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в 1.5 – 4.2 рази.

2. Розроблений рекурентний алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі RSS-вимірювань сенсорної мережі дозволяє отримати характеристики близькі до потенційно досяжних в горизонтальній площині і в порівнянні з початковими умовами зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в 2 рази. Однак СКВ помилки оцінки висоти більше, ніж при використанні алгоритму на основі TDOA-вимірювань на порядок, що обумовлено видом використовуваної конфігурації сенсорної мережі.

3. Розроблений рекурентний алгоритм визначення місцеположення БПЛА на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань дозволяє зменшити кругове СКВ помилки оцінки місцезнаходження БПЛА в порівнянні з роздільною обробкою в 4 рази. При цьому СКВ помилки оцінки висоти є близьким до значень, отриманих на основі TDOA-вимірювань.

4. Розроблені квазіоптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення в горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2 – 4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі, дозволяє зменшити СКВ цієї помилки додатково в 2 – 5 рази. СКВ помилки оцінки висоти адаптивним алгоритмом на основі TDOA- і RSS- вимірювань є близьким до значень, отриманих адаптивним алгоритмом на основі TDOA-вимірювань.

5. Адаптивний фільтр на основі TDOA-вимірювань дозволяє розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короткочасних маневрів БПЛА на 10 – 30 %.

6. При використанні точностних характеристик високочастотного сенсора N6841A розроблений алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань забезпечує прийнятні точностні характеристики, а алгоритм калмановської фільтрації, що використовує оцінки місцеположення БПЛА на основі методу найменших квадратів є непрацездатним.

7. При використанні DSP мікропроцесорів швидкість вирішення завдань істотно вище, ніж при використанні універсальних процесорів. На сучасному процесорі DSP TMS320C6747 для реалізації алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- вимірювань сенсорної мережі необхідно 1.22 мс, на основі RSS- вимірювань сенсорної мережі – 1.22 мс, на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань – 1.831 мс і вони можуть бути реалізовані в реальному масштабі часу.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ І ВИСНОВКИ

У дисертації вирішена наукова задача, яка полягає в розробці методів адаптивного оцінювання параметрів руху БПЛА на основі TDOA- і RSS-вимірювань сенсорної мережі і при їх комплексному використанні, в яких виконується розпізнавання різних видів його руху.

Основні наукові і практичні результати роботи полягають в наступному:

1. Синтезовані на основі математичного апарату ЗМП в дискретному часі оптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань, RSS-вимірювань, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань є рекурентними і описують еволюцію спільних апостеріорних розподілів параметрів руху БПЛА і дискретного компонента, що описує тип його руху. Оптимальні пристрої є багатоканальними і відносяться до класу пристроїв із зворотніми зв'язками між каналами.

2. В отриманому з використанням полігаусівської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA-вимірювань виконується оцінювання помилки вимірювання опорного датчика, що дозволяє реалізувати послідовну обробку даних, а квазіоптимальний пристрій відноситься до класу багатоканальних пристроїв із зворотніми зв'язками між каналами.

3. В отриманому з використанням полігаусівської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі RSS-вимірювань також виконується оцінювання невідомої потужності, а квазіоптимальний пристрій відноситься до класу багатоканальних пристроїв із зворотними зв'язками між каналами.

4. В отриманому з використанням полігаусівської апроксимації апостеріорних розподілів квазіоптимальному алгоритмі адаптивного

оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА при комплексній обробці TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі з невідомою потужністю передавача реалізована послідовна процедура обробки вимірювань, що надходять, і він дозволяє підвищити точність визначення його місцеположення в порівнянні з їх роздільною обробкою.

5. Розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА на основі TDOA-, RSS -, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань сенсорної мережі є нелінійними і відносяться до класу квазіоптимальних алгоритмів з гаусівською апроксимацією апостеріорної ЩЙ. Після формування початкових умов на основі відповідних вимірювань від мінімально необхідного числа датчиків, вони дозволяють рекурентно уточнювати місцеположення БПЛА по мірі надходження вимірювань від інших датчиків.

6. Конфігурація з дев'яти датчиків, вісім з яких розташовані рівномірно на колі, забезпечують вид ізоліній, що обмежують область в яких кругове СКВ не перевищує задане значення, також у вигляді кіл в горизонтальній площині. При подальшому збільшенні числа датчиків, істотного приросту в точності визначення місцеположення БПЛА не відбувається і вона може бути рекомендована, якщо напрямок появи цілі невідомий.

7. Для розглянутої кругової конфігурації сенсорної мережі розроблені рекурентні алгоритми визначення місцеположення БПЛА в горизонтальній площині на основі TDOA-, RSS-, а також комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань, дозволяють отримати характеристики в горизонтальній площині близькі до потенційно досяжних, що визначаються нижньою границею Рао-Крамера. При цьому помилки оцінки висоти алгоритмом на основі RSS- вимірювань на порядок більше, ніж при використанні алгоритму на основі TDOA-вимірювань.

8. Розроблені квазіоптимальні алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- і RSS- вимірювань, дозволяють зменшити СКВ помилки визначення місцеположення БПЛА в

горизонтальній площині в порівнянні з рекурентними алгоритмами визначення місцеположення в 2 – 4 рази, а застосування комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє зменшити СКВ цієї помилки додатково в 2 – 5 разів. При цьому СКВ помилки оцінки потужність передавача БПЛА в сталому режимі складає 0.3 дБ.

9. Адаптивні фільтри на основі TDOA- і RSS- вимірювань дозволяють розпізнати зависання і майже рівномірний рух БПЛА з ймовірністю близькою до одиниці. Адаптивний фільтр на основі комплексної обробки TDOA- і RSS-вимірювань дозволяє підвищити ймовірність розпізнавання короткочасних маневрів БПЛА на 15 – 40%.

10. При використанні точностних характеристик високочастотного сенсора N6841A розроблений алгоритм адаптивного оцінювання параметрів руху маневруючого БПЛА за даними сенсорної мережі на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань забезпечує прийнятні точностні характеристики, а алгоритм калмановської фільтрації, що використовує оцінки місцеположення БПЛА на основі методу найменших квадратів, є непрацездатним.

11. На сучасному процесорі DSP TMS320C6747 для реалізації алгоритмів адаптивної фільтрації параметрів руху маневруючого БПЛА на основі TDOA- вимірювань сенсорної мережі необхідно 1.22 мс, на основі RSS- вимірювань сенсорної мережі – 1.22 мс, на основі комплексної обробки TDOA- і RSS- вимірювань – 1.83 мс і вони можуть бути реалізовані в реальному масштабі часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бєловол С. СВІТОВИЙ ДОСВІД ПРАВОВОГО РЕГУЛЮВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИКІВ [Електронний ресурс] / Світлана Бєловол // Європейський інформаційно-дослідницький центр. – 2011. – Режим доступу до ресурсу: <http://euinfocenter.rada.gov.ua/uploads/documents/28880.pdf>.
2. Dinesh, S., Key defence R&D fields to develop the national defence industry: Focus on C4ISR in support of network centric operations and unmanned vehicles. Defence S&T Tech. Bull., 3: 43- 60, 2010.
3. Abs Plaza. Using Unmanned Aerial Vehicles [Електронний ресурс] / American Bureau of Shipping. –2011. –Режим доступу до ресурсу: http://www.martekuas.com/wp-content/uploads/2017/11/ABS_Guidelines.pdf.
4. Dinesh Sathyamoorthy. A Review of Security Threats of Unmanned Aerial Vehicles and Mitigation Steps, Science and Technology Research Institute for Defence, October 2015.
5. Solodov, A., Williams, A., Al Hanaei, S., & Goddard, B. (2017). Analyzing the threat of unmanned aerial vehicles (UAV) to nuclear facilities. Security Journal, 31(1), 305–324. <https://doi.org/10.1057/s41284-017-0102-5>
6. Larry Friese with N.R. Jenzen-Jones & Michael Smallwood. (2016). Emerging Unmanned Threats: The use of commercially-available UAVs by armed non-state actors Perth, Australia by Armament Research Services, February 2016 – p. 66.
7. Maj Bryan A. How the Commercial Unmanned Aerial Vehicle Revolution Threatens the US Threshold, Air & Space Power Journal, Spring 2018.
8. Wallace, R. J., & Loffi, J. M. (2015). Examining Unmanned Aerial System Threats & Defenses: A Conceptual Analysis. International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace, 2(4). <http://dx.doi.org/10.15394/ijaaa.2015.1084>
9. Защита от дронов – небесный рубеж вашей безопасности [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <http://dronebouncer.com/>.

10. Nonami K, Kendoul F, Suzuki S. Autonomous flying robots: unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles. 1st ed. New York: Springer, 2010.
11. Advanced Automatic RF Tracking and Observation Solution Aaronia AARTOS DDS [Электронный ресурс]. – 2015. – Режим доступа до ресурсу: <http://www.aaronia.com/Datasheets/Documents/Drone-Detection-System.pdf>.
12. Automatic Anti-Drone Security [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.dedrone.com>.
13. Drone Detector [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://dronedetector.com/>.
14. CERBAIR - Anti-Drone Solution [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.cerbair.com/2017/index.php>.
15. Black Sage [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.blacksagetechnology.com/>.
16. Drone Detector | Detect, Warn and Stop Drones&UAVs [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.drone-detector.com>.
17. Falcon Shield Counter-UAV System [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://www.us.selex-es.com/-/falconshield>.
18. Akyildiz, I. F., Su, W., Sankarasubramaniam, Y. and Cayirci, E. (2002). Wireless sensor networks: a survey, Computer networks 38 , 4, pp. 393–422, URL [http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286\(01\)00302-4](http://dx.doi.org/10.1016/S1389-1286(01)00302-4).
19. M.A. Matin and M.M. Islam (2012). Overview of Wireless Sensor Network, Wireless Sensor Networks - Technology and Protocols, Dr. Mohammad Matin (Ed.), InTech, DOI: 10.5772/49376. Available from: <https://www.intechopen.com/books/wireless-sensor-networks-technology-and-protocols/overview-of-wireless-sensor-network>
20. M. Emery, M. Denko (2007). IEEE 802.11 WLAN Based Real-Time Location Tracking in Indoor and Outdoor Environments, Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'07), pp. 1062-1065, April 2007. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2007.271>

21. E. Xu, Z. Ding, S. Dasgupta, "Target tracking and mobile sensor navigation in wireless sensor networks", *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 12, no. 1, pp. 177-186, Jan. 2013. <https://doi.org/10.1109/TMC.2011.262>
22. A. J. Sinclair, T. A. Lovell, J. Darling (2015). RF localization solution using heterogeneous TDOA, *IEEE Aerospace Conference*, March 2015. <https://doi.org/10.1109/AERO.2015.7119256>
23. K. Sohraby, D. Minoli, T. Znati *Wireless Sensor Networks: Technology, Protocols, and Applications*, by Kazem Sohraby, Daniel Minoli, and Taieb Znati Copyright # 2007 John Wiley & Sons, Inc. <http://dx.doi.org/10.1002/047011276X>
24. N. Bulusu, "Introduction to wireless sensor networks," in *Wireless Sensor Networks: A Systems Perspective*, N. Bulusu and S. Jha, Eds. Artech House, 2005.
25. Roudy Dagher, Roberto Quilez. *Localization in Wireless Sensor Networks*. Nathalie Mitton and David Simplot-Ryl. *Wireless Sensor and Robot Networks From Topology Control to Communication Aspects*, Worldscientific, pp.203-247, 2014, http://doi.org/10.1142/9789814551342_0009
26. Jose L. Rullan-Lara, Guillaume Sanahuja, Rogelio Lozano, Sergio Salaza, Ramon Garcia-Hernandez, Jose A. Ruz-Hernandez . "Indoor Localization of a Quadrotor Based on WSN: A Real-Time Application", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, Vol. 10, 48:2013.
27. Симаков В.А. Построение адаптивных систем пассивной радиолокации на принципах разностно-дальномерной координатометрии / В.А. Симаков // *Научные ведомости Белгородский государственный университет* . — 2005. — №2. — С. 221.
28. Alon Amar, Geert Leus. "A reference-free time difference of arrival source localization using a passive sensor array", *IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop*, 2010, pp. 157-160.
29. "Сравнение методов определения географического местоположения источника сигнала, основанных на разнице во времени прихода и угле прихода сигнала" Отчет МСЭ-R SM.2211-1 Женева, 2015 г.

30. Бузуверов Г.В. Алгоритмы пассивной локации в распределенной сети датчиков по разностно-дальномерному методу / Г.В.Бузуверов, О.И. Герасимов. — М. : Информационно-измерительные и управляющие системы №5, 2008. — 12 с.

31. R. Kaune, J. Horst, and W. Koch, "Accuracy Analysis for TDOA Localization in Sensor Networks," in Information Fusion (FUSION), 2011 Proceedings of the 14th International Conference on. IEEE, 2011, pp. 1-8.

32. Поникар А.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ЛОКАЛЬНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ В БЕСПРОВОДНЫХ СЕТЯХ IEEE 802.15.4 / А.В. Поникар, О.В. Евсеев, В.Е. Анциперов, Г.К. Мансуров // IV Всероссийская конференция «Радиолокация и радиосвязь» – ИРЭ РАН. – 2010. – с. 914-918.

33. Zhu, X., & Feng, Y. (2013). RSSI-based Algorithm for Indoor Localization. Communications and Network, 5(2), 37–42. <https://doi.org/10.4236/cn.2013.52b007>

34. Lei Wang, Aiqun Hu, Guangwei Bai, & Yi Huang. (2011). Enhanced constrained total least squares estimator in TDOA localization for WSNs. In 2011 International Conference on Computer Science and Service System (CSSS). IEEE. <https://doi.org/10.1109/csss.2011.5974564>

35. Timothy J. Black, Pubudu N. Pathirana, Saeid Nahavandi “Position Estimation and Tracking of an Autonomous Mobile Sensor using Received Signal Strength”, IEEE Intelligent Sensors, Sensor Networks and Information Processing, 2008, pp. 19-24.

36. Liping Zhang, Cheng-Chew Lim, Yiping Chen, and Hamid Reza Karimi “Tracking Mobile Robot in Indoor Wireless Sensor Networks”, Hindawi Publishing Corporation, Mathematical Problems in Engineering, Volume 2014, Article ID 837050, 8 pages.

37. A. Masieroa, F. Fissorea, A. Guarnieria, F. Pirottia, A. Vettorea “UAV positioning and collision avoidance based on RSS measurements”, The

International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W4, 2015, pp. 219-225.

38. Paula Tarrno, Ana M. Bernardos, Jos R. Casar “An RSS Localization Method Based on Parametric Channel Models”, IEEE, International Conference on Sensor Technologies and Applications, 2007, pp. 265-270.

39. DC to 6 GHz Daughterboards for USRP SDRs - Ettus Research [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <https://www.ettus.com/product/category/Daughterboards>.

40. Keysight Technologies N6841A RF Sensor for Signal Monitoring Networks | Data Sheet [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5990-3839EN.pdf>.

41. An Introduction to Wi-Fi [Электронный ресурс] // Digi International Inc. – 2008. – Режим доступа до ресурсу: http://ftp1.digi.com/support/documentation/0190170_b.pdf.

42. Smith, J. O. and Abel, J. S., The spherical interpolation method of source localization. - IEEE Journal of Oceanic Engineering, 1987, vol. OE-12, no. 1.

43. Smith, J. O. and Abel, J. S., Closed-form least-squares source location estimation from range differences measurements. - IEEE Trans, on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1987, vol. ASSP-35, no. 12.

44. Chan, Y. T. and Ho, K. C., A simple and efficient estimator for hyperbolic location. - IEEE Trans, on Signal Processing, 1994, vol. 42, no. 8.

45. Huang, Y., Benesty, J., and Elko, G. W., Passive acoustic source localization for video camera steering, 2000, in Proc. IEEE ICASSP.

46. Huang, Y., Benesty, J., and Elko, G. W., An efficient Linear - correction least-squares approach to source localization. - IEEE Workshop on Application of Signal Processing to Audio and Acoustics, 2001.

47. Huang, Y., Benesty, J., Elko, G. W., and Mersereau, R. M., Real-time passive source localization: a practical linear-correction least-squares approach. - IEEE Trans. On Speech and Audio Processing, vol. 9, no. 8, November 2001.

48. Товкач І.О. Аналіз алгоритмів оцінювання місцезнаходження об'єкту за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 14 — 20 березня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016. — С. 50 — 52.

49. Товкач І.О. Алгоритми пасивної локації за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу при корельованих похибках вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // X науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». Київ, 12 — 13 травня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016.

50. IEEE Std 802.15.4™ - 2011 (Revision of IEEE Std 802.15.4-2006) [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://ecee.colorado.edu/~liue/teaching/comm_standards/2015S_zigbee/802.15.4-2011.pdf.

51. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации. -М.: Радио и связь, 1981. -416с.

52. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. -М.: Радио и связь, 1981. - 416с.

53. Э. Сейдж, Дж. Меле. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. -М.: Связь, 1976. -496с.

54. Тихонов В.И., Харисов В.Н. Статистический анализ и синтез радиотехнических устройств и систем. -М.: Радио и связь, 1991. -608с.

55. Тихонов В.И. Оптимальный прием сигналов. -М.: Радио и связь, 1983. -320с.

56. Жук С.Я. Методы оптимизации дискретных динамических систем со случайной структурой / Монография. К.: НТУУ «КПИ», 2008. -232с.

57. Хокс Р.М., Мор Дж.Б. Границы качественных показателей при адаптивном оценивании // ТИИЭР -1976.-т.64.-№6. -С.28-36.

58. Цифровая обработка радиолокационной информации при сопровождении целей / А.М. Бочкарев и др. // Зарубежная радиоэлектроника. – 1991. – № 3. – С. 3-22.

59. Гриценко Н.С., Логинов В.П., Севостьянов К.К. Адаптивное оценивание. Часть 2. // Зарубежная радиоэлектроника. -1985. -№3. -С.27-50.

60. Федосов Е.А., Инсаров В.В., Селивохин О.С. Системы управления конечным положением в условиях противодействия среды. -М.: Наука, 1989. -272с.

61. Клекис Э.А. Оптимальная фильтрация в системах со случайной структурой и дискретным временем. // Автоматика и телемеханика. -1987.- №11. -С.61-67.

62. Жук С.Я. Совместная фильтрация смешанных марковских процессов в дискретном времени // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. -1988.-т.31.-№1.-С.33-39.

63. Greg Welch, Gary Bishop. “An Introduction to the Kalman Filter”, Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, July 24, 2006. Available from https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf

64. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Recurrent Algorithm for TDOA Localization in Sensor Networks, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.9, №4, pp.489-494, Oct.-Dec., 2017. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727> (SCOPUS).

65. Товкач И.О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети по разностно-дальномерному методу при некоррелированных ошибках измерений / И.О. Товкач, С.Я Жук // X Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2016", 19.04-22.04.2016 р.: тези доп. — Київ, 2016. — С.432-434.

66. Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О.

Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55. (**WEB OF SCIENCE**).

67. Tiwari S., Darraji R., Bassam S. A., Kwan A., Rawat K., Rawat M., Fattouche M. and Ghannouchi F. M. «Practical result of wireless indoor position estimation by using hybrid TDOA/RSS algorithm», Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2010 23rd Canadian Conference on. <https://doi.org/10.1109/CCECE.2010.5575134>

68. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya., Tkachuk P.S. Methods of determining the location of the radio sources in sensor networks based on WLAN, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 43-46.

69. Товкач І.О. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі TDOA-вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 19 — 25 березня 2018 р.: матеріали конференції — Київ, 2018. — С. 38 — 40.

70. Товкач І.О. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення джерела радіовипромінювання при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018.

71. Neuimin O. S., Zhuk S. Ya. Sequential detection of target trajectory using the decision statistics of pips. Radioelectronics and Communications Sys-tems, 2014, vol. 57, no. 8, pp. 352- 361. <http://dx.doi.org/10.3103/S0735272714080032>

72. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of movement of the maneuvering UAV according to sensor networks, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 47-50.

73. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of the unmanned aerial vehicle movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 160-165. **(SCOPUS)**.

74. Евланов П.А., Жук С.Я. Комплексование измерителей с отказами // Известия вузов СССР. Радиоэлектроника. – 1990. – т.33. – №3. – С.15-21.

75. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. -М.: Радио и связь, 1981. - 416с.

76. Максимов М.В., Меркулов В.И. Радиоэлектронные следящие системы. (Синтез методами теории оптимального управления). -М.: Радио и связь, 1990. -256с.

77. Aoki M. Optimizatsiya stokhasticheskikh sistem. Per. s angl. / Pod red. YA.Z. Tsypkina. -М.: Nauka, 1971. -424s.

78. I.O. Tovkach, O. S. Neuimin, S.Ya. Zhuk (2018). Filtration of parameters of the UAV movement based on the RSS-measurement at the unknown power of the transmitter, Proceedings of 14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018, pp. 57-60. **(SCOPUS)**.

79. Товкач И. О. Адаптивная фильтрация параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2017. – № 69. – с. 41-48.

80. Товкач И.О. Анализ точностных характеристик алгоритма калмановской фильтрации параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе метода RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.

81. I. Tovkach, S. Zhuk (2017). Filtration of parameters of the UAV movement at complex use of data sensor networks, obtained based on the TDOA and RSS methods, Information and Telecommunication Sciences. 2017, №1, pp.31-36. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12017.31-36>

82. Товкач І.О. Фільтрація параметрів руху БПЛА при комплексному використанні даних сенсорної мережі, отриманих на основі методів TDOA і RSS /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 374 — 376.

83. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods, Radioelectronics and Communications Systems. Volume 60, Issue 12, 1 December 2017, Pages 528-537. **(SCOPUS)**.

84. Кузьмин С.З. Основы проектирования систем цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин.— М.: Радио и связь, 1986. — 352 с.

85. Analog Devices | Semiconductors and Signal Processing ICs [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://www.analog.com/ru/index.html> (30.05.18). — Загл. с экрана.

86. Analog, Embedded Processing, Semiconductor Company, Texas Instruments - TI.com [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ti.com/> (30.05.18). — Загл. с экрана.

87. TMS320C6745, TMS320C6747 Fixed- and Floating-Point Digital Signal Processor [Електронний ресурс]. — Режим доступа: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tms320c6747.pdf> (30.05.18). — Загл. с экрана.

ДОДАТОК А

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА
ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇСписок публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові
результати дисертації

1. Товкач И. О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2016. – № 66. – с. 46-55. (**WEB OF SCIENCE**).

2. Товкач И. О. Адаптивная фильтрация параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе измерения мощности принимаемого сигнала / И.О. Товкач, С.Я. Жук // Вестник НТУУ «КПИ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2017. – № 69. – с. 41-48. (**WEB OF SCIENCE**).

3. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Recurrent Algorithm for TDOA Localization in Sensor Networks, J. Aerosp. Technol. Manag., São José dos Campos, Vol.9, №4, pp.489-494, Oct.-Dec., 2017. <http://dx.doi.org/10.5028/jatm.v9i4.727> (**SCOPUS**).

4. I. Tovkach, S. Zhuk (2017). Filtration of parameters of the UAV movement at complex use of data sensor networks, obtained based on the TDOA and RSS methods, Information and Telecommunication Sciences. 2017, №1, pp.31-36. <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12017.31-36>

5. I.O. Tovkach, S.Ya. Zhuk (2017). Adaptive filtration of radio source movement parameters with complex use of sensor network data based on TDOA and RSS methods, Radioelectronics and Communications Systems. Volume 60, Issue 12, 1 December 2017, Pages 528-537. (**SCOPUS**).

Список публікацій здобувача, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

6. Товкач І.О. Аналіз алгоритмів оцінювання місцезнаходження об'єкту за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 14 — 20 березня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016. — С. 50 — 52.

7. Товкач И.О. Рекуррентный алгоритм пассивной локации в сенсорной сети по разностно-дальномерному методу при некоррелированных ошибках измерений / И.О. Товкач, С.Я. Жук // X Міжнародна Науково-технічна Конференція "ПРОБЛЕМИ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ 2016", 19.04-22.04.2016 р.: тези доп. — Київ, 2016. — С.432-434.

8. Товкач І.О. Алгоритми пасивної локації за даними сенсорної мережі на основі різницево-далекомірного методу при корельованих похибках вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // X науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Радіoeлектроніка в ХХІ столітті». Київ, 12 — 13 травня 2016 р.: матеріали конференції — Київ, 2016.

9. Товкач И.О. Анализ точностных характеристик алгоритма калмановской фильтрации параметров движения БПЛА по данным сенсорной сети на основе метода RSS /И.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 20 — 26 березня 2017 р.: матеріали конференції — Київ, 2017. — С. 47 — 49.

10. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya., Tkachuk P.S. Methods of determining the location of the radio sources in sensor networks based on WLAN, The International Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 43-46.

11. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of movement of the maneuvering UAV according to sensor networks, The International

Emergency Management Society, Special Edition, ISSUE 5 – April 2017, pp. 47-50.

12. Товкач І.О. Фільтрація параметрів руху БПЛА при комплексному використанні даних сенсорної мережі, отриманих на основі методів TDOA і RSS /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XI Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2017: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. — С. 374 — 376.

13. Tovkach I.O., Zhuk S.Ya. Adaptive filtration of parameters of the unmanned aerial vehicle movement on data from its location calculated on the basis the time difference of arrival method, 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), pp. 160-165. (SCOPUS).

14. I.O. Tovkach, O. S. Neuimin, S.Ya. Zhuk (2018). Filtration of parameters of the UAV movement based on the RSS-measurement at the unknown power of the transmitter, Proceedings of 14 th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, February 20 – 24, 2018, pp. 57-60. (SCOPUS).

15. Товкач І.О. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення джерела радіовипромінювання на основі TDOA-вимірювань / І.О.Товкач, С.Я.Жук // Міжнародна науково-технічна конференція «Радіотехнічні поля, сигнали та системи». Київ, 19 — 25 березня 2018 р.: матеріали конференції — Київ, 2018. — С. 38 — 40.

16. Товкач І.О. Аналіз впливу конфігурації сенсорної мережі на точність визначення місцеположення джерела радіовипромінювання при комплексному використанні TDOA- і RSS- вимірювань /І.О.Товкач, С.Я.Жук // XII Міжнародна науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій" ПТ-2018: Збірник матеріалів конференції. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. — С.323 — 325.

ДОДАТОК Б**АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ**

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Директор ДП НДІ
 радіолокаційних систем
 «Квант-Радіолокація»,
 Голова НТР, к.т.н., с.н.с.
В. І. Гузь
 29 05 2018 р



АКТ
 науково-технічної комісії
 про реалізацію результатів дисертаційних досліджень
 Товкача Ігоря Олеговича

Науково-технічна комісія у складі:

голови: Вчений секретар, головний науковий співробітник д.т.н., с.н.с.
 Нікітенко Ю. Г.
та членів комісії: Заступник директора з науки
 Цісарж В. В.
 Начальник науково-дослідного відділу
 Барінгольц Т. В.

встановила, що результати дисертаційної роботи Товкача І. О. були використані в розробках ДП НДІ РС «Квант-Радіолокація» для обґрунтування вимог до побудови перспективних інформаційно-технічних систем моніторингу навколишнього середовища, а також при розробці алгоритмів виявлення траєкторій повітряних об'єктів, що виконують рух з різними видами маневрів.

При цьому застосовувались наступні алгоритми, розроблені в дисертації Товкача І. О.:

- для визначення місцеположення цілі були застосовані рекурентні алгоритми на основі TDOA, RSS та комплексної обробки TDOA, RSS вимірювань сенсорної мережі;
- розроблені адаптивні алгоритми фільтрації параметрів руху маневрового БПЛА на основі TDOA, RSS, вимірювань сенсорної мережі та при застосуванні комплексної обробки з невідомою потужністю передавача.

Акт не є основою для виплати винагороди за впровадження та інших авторських нагород і призначений для пред'явлення в спеціалізовану вчену раду.

Голова комісії:

Вчений секретар, головний
 науковий співробітник
 д.т.н., с.н.с.

 Нікітенко Ю. Г.

Члени комісії:

Заступник директора з науки,
 к.т.н

 Цісарж В. В.

Начальник науково-дослідного відділу

 Барінгольц Т. В.



АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ

результатів дисертаційної роботи в навчальний процес Національного
технічного університету України «Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»

Ми, що нижче підписалися, начальник навчально-організаційного управління к.т.н., доц. Яблонський П.М., декан радіотехнічного факультету к.т.н., доц. Антипенко Р.В., завідувач кафедри радіотехнічних пристроїв та систем, д.т.н., проф. Жук С.Я., склали даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Товкача Ігоря Олеговича «Методи адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотної літальної апарату на основі вимірювань сенсорної мережі» використовується в навчальному процесі кафедри радіотехнічних пристроїв та систем радіотехнічного факультету Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», а саме для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка» в дисципліні «Методи оптимальної обробки сигналів». Методи та алгоритми адаптивного оцінювання параметрів руху безпілотної літальної апарату на основі TDOA-вимірювань, RSS-вимірювань сенсорної мережі та при їх комплексному використанні включено до теми «Методи адаптивного прийому сигналів».

Ефект від впровадження – підвищення якості навчання та інтенсифікація навчального процесу.

Начальник навчально-організаційного
управління

 П.М. Яблонський

Декан радіотехнічного факультету

 Р.В. Антипенко

Завідувач кафедри
радіотехнічних пристроїв та систем

 С.Я Жук