

УДК 355.4:621.396.967

канд. техн. наук Каптур В. А. ORCID: 0000-0003-4200-1151 (ОСЦЕП СВ ЗСУ)

МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ МІСЦЕЗНАХОДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА РАДІОВИПРОМІНЮВАННЯ ЗА ОДНИМ ПЕЛЕНГОМ

Вступ. Вирішення задач локалізації та відображення районів ймовірного місцезнаходження джерел радіовипромінювання в зоні бойових дій є сьогодні ключовими функціями будь-якої системи ситуаційної обізнаності та електронної підтримки. Ситуація за якої значний обсяг інформації, що реєструється відповідними засобами виявлення, просто не використовується і призводить до різкого погіршення якості та достовірності роботи відповідних систем.

Проблематика. Відсутність механізмів ефективної утилізації інформації від засобів виявлення за умов наявності обмеженої кількості даних про виявлене джерело радіовипромінювання.

Мета. Розробка підходу до визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання в умовах відсутності достатньої для здійснення триангуляції або трилатерації обсягу інформації від засобів виявлення.

Матеріали й методи. В роботі проведено аналіз сучасних методів та підходів до виявлення руху та положення джерел радіовипромінювання в основу яких покладено принцип пасивного радіочастотного спостереження на базі прийому та аналізу існуючих електромагнітних сигналів у навколишньому середовищі. Для оцінки ймовірного значення потужності випромінювання використано загальновідому модель розповсюдження радіохвиль у вільному просторі, а також підхід, що базується на застосуванні накопичення статистичних даних про стріангульовані джерела радіовипромінювання.

Результати. Уперше поєднано підхід пеленгаційного спостереження з оцінкою ймовірного значення потужності випромінювання, що базується на моделі поширення сигналу у вільному просторі та накопиченні статистичних даних про раніше локалізовані джерела. На основі запропонованого підходу розроблено методику визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання за одним пеленгом.

Висновки. Представлена методика може бути використана для реалізації окремих компонентів систем ситуаційної обізнаності, які базуються на застосуванні даних, що надходять від різноманітних засобів електронної підтримки.

Ключові слова: електронна підтримка, ситуаційна обізнаність, радіоелектронна розвідка, джерело радіовипромінювання, пеленг, втрати, локалізація.

V. Kaptur. Method for determining the location of a source of radio radiation by a single bearing

Introduction. Solving the problems of localization and mapping the areas of probable location of radio emission sources in the combat zone are today the key functions of any situational awareness and electronic support system. A situation in which a significant amount of information recorded by the appropriate detection sources is simply not used leads to a quick deterioration in the quality and reliability of the operation of the relevant systems.

Problem. The absence of mechanisms for effective utilization of information from detection sources in the presence of a limited amount of data on the detected radio emission source.

Purpose. Development of an approach to determining the location of a radio emission source in the absence of sufficient information for triangulation or trilateration from detection sources.

Materials and methods. The paper analyzes modern methods and approaches to detecting the movement and position of radio emission sources, which are based on the principle of passive radio frequency surveillance based on the reception and analysis of existing electromagnetic signals in the environment. To estimate the probable value of the radio emission power, a well-known model of radio wave propagation in free space was used, as well as an approach based on the application of the accumulation of statistical data on triangulated radio emission sources.

Results. For the first time, the direction-finding approach is combined with an estimate of the probable value of the radio emission power, based on a model of signal propagation in free space and the accumulation of statistical data on previously localized sources. Based on the proposed approach, a method for determining the location of a radio emission source by a single bearing is developed.

Conclusions. The presented method can be used to implement individual components of situational awareness systems that are based on the application of data coming from various sources of electronic support.

Keywords: electronic support, situational awareness, electronic intelligence, radio emission source, bearing, losses, localization.

Постановка проблеми. Однією з найважливіших задач будь-якої системи електронної підтримки є локалізація та відображення районів ймовірного місцезнаходження джерел радіовипромінювання (ДРВ) (наприклад, безпілотних літальних апаратів, БпЛА). В якості безпосереднього джерела інформації при цьому можуть використовуватись засоби виявлення (сенсори, пеленгатори тощо) різних виробників. Залежно від типу засобу виявлення реалізація зазначеного функціоналу здійснюється різними способами, що включають: розбір інформаційних повідомлень каналів керування, фіксацію сигнатур випромінювання на певних частотах тощо.

Одним із найбільш розповсюджених та очевидних способів детектування точного місцезнаходження ДРВ є триангуляція радіосигналу двома чи більшою кількістю засобів одного типу. Досягається це завдяки тому, що такі засоби виявлення, як пеленгатори, які мають відповідну антенну решітку, не тільки визначають рівень прийнятого сигналу, але й напрямок, з якого він надійшов (пеленг).

Але доволі часто ДРВ може бути виявлено лише одним засобом. При цьому в результаті можна отримати пеленг, рівень сигналу на приймачі засобу, частотні характеристики ДРВ, однак встановити точне місцеположення за одним пеленгом неможливо. Зазвичай це призводить до того, що значний обсяг інформації, яка реєструється відповідними засобами, просто не використовується системами ситуаційної обізнаності і ніяким чином не бере участі в оцінці стану електромагнітного спектра в тому чи іншому районі ведення бойових дій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Методи та підходи до виявлення руху і положення ДРВ, а також їх класифікація сьогодні є одним з найбільш досліджуваних напрямків в радіоінженерії. В його основу покладені методи пасивного радіочастотного спостереження, які, в свою чергу, спираються на прийом та аналіз існуючих електромагнітних сигналів у навколишньому середовищі [1]. Такі системи фіксуючи та аналізуючи зміни характеристик сигналу (сили сигналу, частоти, фази та інших параметрів), можуть виявляти рух, присутність та моделі поведінки ДРВ. Основою процедур визначення місцезнаходження ДРВ при цьому складають так звані методи локалізації [2], такі як ToA (time of arrival), TDoA (time difference of arrival), AoA (angle of arrival) та RSS (received signal strength). Характерною спільною ознакою всіх цих методів є застосування методів триангуляції або трилатерації, що базуються на наявності більш ніж одного приймача. В свою чергу задача визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання в умовах наявності лише одного приймача зазвичай вирішується шляхом переміщення цього приймача в просторі відносно положення ДРВ. Так, наприклад, в [3] запропоновано метод, у якому один приймач на борту БпЛА виконує обертальний рух, щоб отримати послідовні “псевдопеленги” (pseudo-bearing measurements), що дозволяє в подальшому визначати положення радіоджерел без необхідності встановлення кількох статичних приймачів. В іншій роботі [4] досліджено систему, яка переміщує одну всеспрямовану антену у просторі (наприклад, по сферичній поверхні), щоб накопичити кутові вимірювання, а потім оцінити напрям на джерело за рахунок руху. Таким чином, питання розробки нових методів та підходів, щодо визначення місцезнаходження джерела радіовипромінювання за одним пеленгом при застосуванні мереж стаціонарних приймачів залишається актуальним.

Метою статті є розробка методики визначення місцезнаходження ДРВ за одним пеленгом.

Виклад основного матеріалу дослідження. В основу методики визначення місцезнаходження ДРВ за одним пеленгом пропонується покласти принцип визначення ймовірного для кожного засобу виявлення значення потужності випромінювання типового ДРВ, що є характерним для відповідного району ведення бойових дій у відповідному проміжку часу та відповідному частотному діапазоні. Визначення ймовірного значення потужності при цьому має відбуватись або за рахунок співставлення сигнатури зафіксованого сигналу ДРВ із відомими шаблонами сигналів, або ж шляхом розрахунку спираючись при цьому на значення

рівня зареєстрованого сигналу, його частоти та відстані до ДРВ, що були отримані в результаті повноцінних тріангуляцій, в яких брав участь той засіб виявлення, для якого здійснюється визначення ймовірного значення потужності випромінювання типового ДРВ (рис. 1).

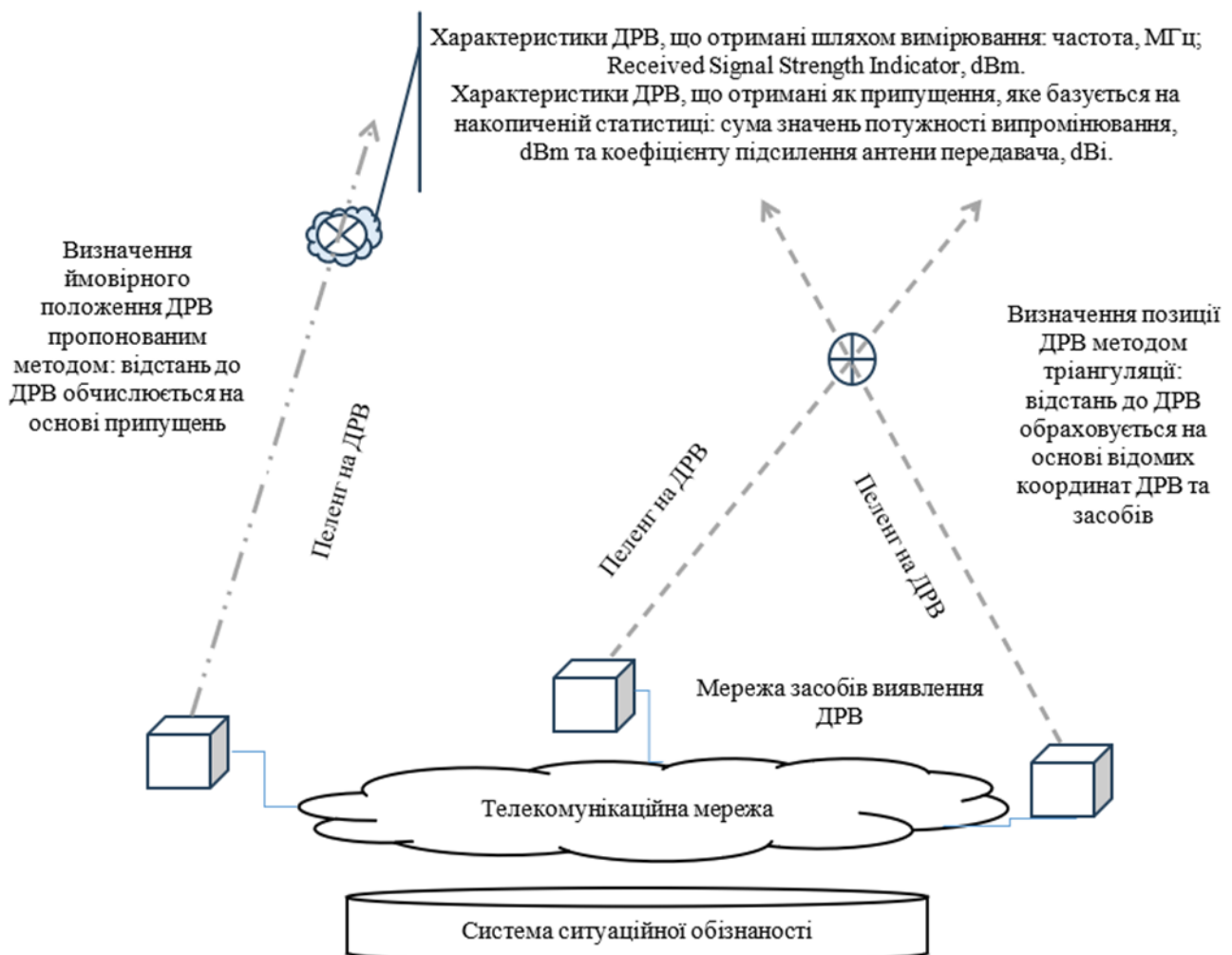


Рис. 1. Загальний принцип визначення місцезнаходження ДРВ за одним пеленгом

Обмеження та припущення. Передбачається наявність інформації про тактико-технічні характеристики засобів електронної підтримки, що використовуються для збору інформації про ДРВ. Однак в межах цієї статті ці застереження будуть проігноровані з метою формування первинної моделі.

На рисунку 2 зображено алгоритм визначення місцезнаходження ДРВ за одним пеленгом.

Вихідними даними для роботи алгоритму (рис. 2) є географічні координати та характеристики засобу виявлення (наприклад, коефіцієнт підсилення приймальної антени), множина сигнатур ДРВ з відомими характеристиками потужності випромінювання та множина повноцінних тріангуляцій з відомими координатами виявлених ДРВ, а також потік подій типу “пеленг” від засобу виявлення.

Під подією типу “пеленг” в межах цієї роботи будемо розуміти дані, що отримані від засобу виявлення (безпосередньо або від сервера чи центральної ноди (вузла) того чи іншого виробника), що містять кут між напрямом від засобу детектування юстованого на північ (магнітну або істинну, залежно від системи координат, що використовується в системі

електронної підтримки) до виявленого джерела радіовипромінювання з врахуванням похибки визначення позиції (відхилення від значення пеленгу).

Ядром алгоритму (рис. 2) є безперервний цикл обробки подій від засобів виявлення. Вихід з циклу (та алгоритму в цілому) відбувається лише за умов примусового або позапланового завершення роботи системи, в межах якої реалізовано цей алгоритм.

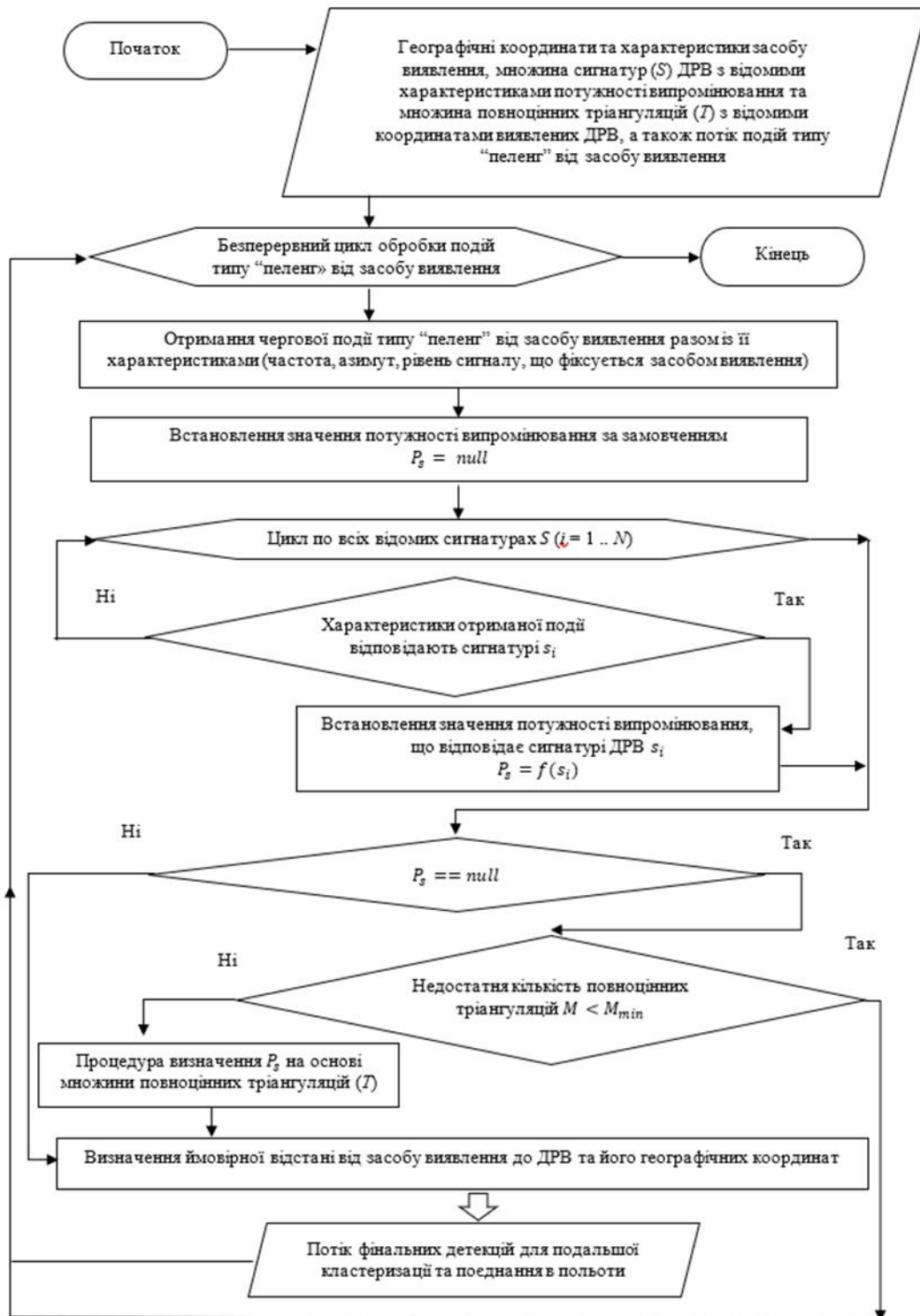


Рис. 2. Алгоритм визначення місцезнаходження ДРВ за одним пеленгом

На кожній черговій ітерації циклу здійснюється отримання чергової події типу “пеленг” від засобу виявлення разом із її характеристиками (частота, азимут, рівень сигналу, що фіксується засобом виявлення). Всі інші типи подій (наприклад, триангульована детекція, виявлення тощо) в межах цього алгоритму ігноруються.

Першою операцією після отримання чергової події є встановлення ймовірного значення потужності випромінювання за замовченням у невизначене значення ($P_s = null$). Тут і далі під потужністю випромінювання будемо розуміти ймовірну потужність з якою ДРВ здійснює випромінювання, і яка складається з потужності передавача та коефіцієнта підсилення передавальної антени, що використовується ДРВ (1):

$$P_s = P_t + G_t, \quad (1)$$

де P_t – потужність передавача ДРВ, dBm; G_t – коефіцієнт підсилення передавальної антени ДРВ, dBi.

Далі в межах циклу (рис. 2), що послідовно перебирає всі відомі сигнатури з множини $S \{s_1, s_2, \dots, s_N\}$ здійснюється оцінка чи характеристика отриманої події, відповідають черговій сигнатурі s_i , де $i = 1 \dots N$. У разі, якщо таку сигнатуру знайдено ймовірна потужність випромінювання встановлюється у значення, що відповідає сигнатурі ДРВ s_i ($P_s = f(s_i)$).

У разі, якщо на попередньому кроці значення ймовірної потужності випромінювання не було визначено, здійснюється оцінка можливості застосування процедури визначення P_s на основі множини повноцінних триангуляцій (T). Виклик цієї процедури відбувається лише у випадку, коли кількість повноцінних триангуляцій, в яких брав участь відповідний засіб виявлення, є більшою або рівною за мінімально встановлену кількість ($M \geq M_{\min}$). В іншому випадку відповідна подія типу “пеленг” ігнорується і не може бути використаною для визначення місцезнаходження ДРВ.

Якщо відповідне ймовірне значення потужності випромінювання було визначено або шляхом співставлення із відповідною множиною сигнатур, або через застосування процедури визначення потужності, на основі множини повноцінних триангуляцій, на наступному кроці алгоритму здійснюється визначення ймовірної відстані від засобу виявлення до ДРВ та його географічних координат з подальшим передаванням цієї інформації до загального потоку фінальних детекцій для подальшої кластеризації та поєднання в польоти.

На рисунку 3 наведено процедуру визначення P_s на основі множини повноцінних триангуляцій (T). Вихідними даними для роботи процедури є географічні координати та характеристики засобу виявлення, що отримані з головного алгоритму (рис. 1), а також множина повноцінних триангуляцій з відомими координатами виявлених за участю цього засобу ДРВ.

Процедура базується на визначенні середнього по кожному сенсору значенню P_s , що визначено шляхом зворотного підрахунку, спираючись на значення частоти та рівня сигналу, що фіксується засобом виявлення, що отримані для кожної повноцінно триангульованої детекції в якій приймав участь відповідний засіб за певний період часу (задану глибину (кількість) детекцій), а також на характеристики самого засобу (зокрема, коефіцієнт підсилення приймальної антени засобу виявлення).

У разі, якщо в базі даних недостатньо відомостей для обрахунку середнього значення на задану глибину (кількість) детекцій $M_{\min}$ – відповідні припущення щодо візуалізації можливих джерел випромінювання за цим засобом не обраховуються.

Слід зазначити, що на рис. 3 наведено найпростіший з можливих варіантів реалізації процедури. Для покращення точності додатково може бути застосовано відкидання значень p_j , що відхиляються від середнього значення на певне значення (наприклад, перевищують середньоквадратичну похибку, що обчислена на основі попереднього ряду значень). Однак в межах цієї статті зазначені варіанти не розглядаються, а підкрислюється лише загальний

принцип – застосування даних про повноцінні триангуляції для своєрідного “навчання” моделі шляхом підрахунку очікуваної (ймовірної) потужності ДРВ.

Визначення відстані d_j від засобу виявлення до точки триангуляції t_j здійснюється за допомогою формули гаверсінуса [5] із використанням координат сенсора та триангульованої позиції.

В свою чергу визначення значення ймовірної потужності випромінювання ДРВ p_j для триангуляції t_j (рис. 3) здійснюється на основі тієї чи іншої моделі розповсюдження радіохвиль (моделі визначення втрат). Слід зазначити, що обрання моделі також залежить від конкретної реалізації системи, особливостей розташування засобу виявлення та характеристик його антенної системи. Однак у межах цієї статті ми будемо розглядати лише найпростіший випадок – модель розповсюдження радіохвиль у вільному просторі (справедлива для випадків коли і джерело і приймач в зоні прямої видимості). В цьому випадку значення ймовірної потужності випромінювання ДРВ p_j може бути визначено за формулою [6; 7] (2):

$$p_j = RS_j + 20 \log(f_j) + 20 \log(d_j) - G_r + 32.44, \quad (2)$$

де RS_j – RSSI (Received Signal Strength Indicator), сила сигналу, що було зафіксовано засобом виявлення в межах j -ї триангуляції, dBm; f_j – частота, на якій засобом виявлення було зафіксовано сигнал в межах j -ї триангуляції, МГц; d – відстань від засобу виявлення до точки триангуляції t_j , км; G_r – максимальний коефіцієнт підсилення антени приймача засобу виявлення (для резонансної частоти та головного напрямку випромінювання).



Рис. 3. Процедура визначення P_s на основі множини повноцінних триангуляцій

Слід зазначити, що формула (2) є коректною якщо частоти передавача та приймача співпадають. Отже потрібно, щоб засіб виявлення працював у смузі роботи ДРВ. В іншому випадку засіб виявлення може детектувати позасмугове випромінювання і розрахунок не буде коректним. Також слід зазначити, що якщо частота відрізняється від оптимальної для даної антени та/або напрямком на ДРВ не є головним напрямком випромінювання, необхідно враховувати зменшення підсилення в вертикальній та горизонтальній площинах.

Очевидно, що отримавши в результаті роботи вищезазначених алгоритмів (рис. 2 та рис. 3) припущення щодо ймовірної потужності ДРВ та використавши формулу (2) можна отримати ймовірне значення відстані від засобу до ДРВ.

$$d = \frac{10^{P_s - RS - 20 \log(f) - G_r - 32.44}}{20}, \quad (3)$$

де P_s – ймовірна потужність з якою ДРВ здійснює випромінювання, dBm; RS – RSSI (Received Signal Strength Indicator), сила сигналу, що було зафіксовано засобом виявлення в межах відповідної події типу “пеленг”, dBm; f – частота, на якій засобом виявлення було зафіксовано сигнал у межах відповідної події типу “пеленг”, МГц; G_r – максимальний коефіцієнт підсилення антени приймача засобу виявлення (для резонансної частоти та головного напрямку випромінювання).

Отримане ймовірне значення відстані, від засобу до ДРВ, можна легко перерахувати у координати потенційного джерела випромінювання із застосуванням тієї ж самої формули гаверсінуса, а відповідні координати в подальшому можуть бути кластеризовані до того чи іншого активного польоту, надаючи змогу відображати відповідні фіксації ДРВ в цілісному вигляді в межах тієї чи іншої системи ситуаційної обізнаності.

Висновки й перспективи подальших досліджень

Запропоновано методику визначення джерела радіовипромінювання за одним пеленгом, що базується на застосуванні ймовірного значення потужності випромінювання для визначення підрахунку ймовірного значення відстані від засобу до джерела через застосування тієї чи іншої моделі розповсюдження радіохвиль.

Наведений приклад базується на застосуванні моделі розповсюдження радіохвиль у вільному просторі та визначенні потужності на основі множини повноцінних триангуляцій, що були зроблені за участю відповідного засобу виявлення.

Отримані результати можуть бути використані у складі більш комплексних алгоритмів систем ситуаційної обізнаності військового та цивільного призначення. Відображення місцеположення джерел радіовипромінювання, яке отримане на основі запропонованого алгоритму, в таких системах має супроводжуватись позначенням того, що відповідні розрахунки зроблено на основі низки припущень про потужність ДРВ, тип на направленість його антени тощо, що суттєвим чином може вплинути на точність визначення потенційного місцезнаходження такого джерела.

З цією метою подальші дослідження мають бути зосереджені на формалізації процедур поєднання відповідних визначень положень джерела радіовипромінювання в таку сутність як “політ БпЛА”.

Також, для оцінки ефективності запропонованого підходу, рекомендовано розробити імітаційну модель, що дозволила б на основі історичних даних, які отримані з реальних засобів виявлення, формувати відповідну гіпотезу про потужність ДРВ. Подальші дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення “опорних” показників, що можуть вплинути на точність детектування, таких як глибина детекцій тощо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Cui G., Liu J., Li H., Himed B. Signal detection with noisy reference for passive sensing. *Signal Process.* 2015. No. 108. P. 389–399.
2. He W.-N., Huang X.-L. Deterministic Localization for Fully Automatic Operation: A Survey and Experiments. *Sensors*. 2024. Vol. 24, no. 13. P. 4128. DOI: <https://doi.org/10.3390/s24134128>.
3. Chen F., Rezatofighi S. H., Ranasinghe D. C. GyroCopter: Differential Bearing Measuring Trajectory Planner for Tracking and Localizing Radio Frequency Sources. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2024. DOI: 10.1109/LRA.2024.3525549.
4. Eliyahu G., Maor A. M., Meshar R., Mukamal R., Weiss A. J. Single Transmitter Direction Finding Using a Single Moving Omnidirectional Antenna. *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 23. P. 9208. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22239208>.
5. Інман Джеймс. Navigation and Nautical Astronomy: For the Use of British Seamen. L., C. & J. Rivington, 1835.
6. Friis H. T. A Note on a Simple Transmission Formula. *IRE Proceedings*. 1946. Vol. 34, No. 5. P. 254–256.
7. Ensattelite. Free Space Path Loss: Derivation from Friis transmission equation. URL: https://ensattelite.com/fspl/?utm_source=chatgpt.com (дата звернення: 30.08.2025).