

А. В. Федоров, Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, К. А. Тахьян, С. М. Ковалевський

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

## МЕТОД СИНХРОНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ ПРИЙМАЧІВ ADS-B ПРИ ВЕДЕННІ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ПОВІТРЯНОЇ ОБСТАНОВКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ MLAT

**Предметом** вивчення в статті є метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології MLAT. **Метою** є розробка методу синхронізації приймачів автоматичного залежного спостереження ADS-B при веденні радіолокаційного контролю з використанням технології MLAT. **Завдання:** аналіз факторів, що впливають на точність визначення координат повітряних об'єктів, стислий аналіз можливостей технології ADS-B, розробка методу синхронізації приймачів ADS-B з використанням технології MLAT. Використовуваними **методами** є: методи радіолокації, методи теорії прийому та обробки сигналів, визначення координат повітряних об'єктів. Отримані такі **результати**. Визначено фактори, що впливають на точність визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено можливість застосування технології автоматичного залежного спостереження та технології мультилатерації для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено, що для більш якісного визначення координат повітряних об'єктів необхідно забезпечити точність синхронізації приймачів менше 1 мкс. Розроблено метод синхронізації приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT, що забезпечує необхідну точність синхронізації. Запропоновано алгоритм, що реалізує метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології мультилатерації. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Встановлено, що перевагами використання запропонованого методу синхронізації приймачів ADS-B є простота процесу синхронізації, можливість використання в якості контрольних об'єктів випадкові повітряні об'єкти, що оснащені транспондерами ADS-B та знаходяться в зоні дії системи приймачів ADS-B. В подальших дослідженнях пропонується використання запропонованого методу синхронізації системи приймачів ADS-B та його практичного використання при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки.

**Ключові слова:** ADS-B, MLAT, синхронізація, повітряна обстановка, залежне спостереження, контроль повітряного простору, координати, GPS.

### Вступ

**Постановка проблеми у загальному вигляді.** За останні десятиліття інтенсивність повітряного руху зросла у декілька разів. На даний момент в зоні відповідальності радіотехнічних підрозділів знаходиться велика кількість повітряних об'єктів (ПО) як цивільного так і військового призначення, що безумовно, ускладнює виконання завдань з ведення якісного та ефективного радіолокаційного контролю (РЛК) повітряної обстановки в зоні огляду радіолокаційних станцій (РЛС) радіотехнічних військ (РТВ). Можливості існуючих радіолокаційних засобів (РЛС різних діапазонів) щодо здійснення РЛК та видачі радіолокаційної інформації (РЛІ) з підвищеними вимогами до точності визначення координат ПО дещо обмежені [1].

У цей час в управлінні повітряним рухом (УПР) широко застосовується технологія мультилатерації (MLAT). Сутність технології MLAT полягає в тому, що система з декількох приймачів (мінімум трьох) здатна вимірювати координати ПО, навіть за умов, коли ПО не передає в простір інформацію про своє місцезнаходження. В якості приймачів системи MLAT використовуються приймачі ADS-B [2].

Для прийому даних ADS-B від ПО використовуються досить дешеві та малогабаритні радіоприймачі [3]. Отже, з'являється можливість підвищення точності визначення координат, та отримання додаткової інформації про ПО (тип ПО, його позивний тощо). Відомо [1], що одним із факторів, що впливає на точність визначення координат ПО є точна синх-

ронізація системи приймачів, що забезпечують визначення координат ПО з використанням технології MLAT, за часом, тому актуальним є розробка методу синхронізації системи приймачів ADS-B.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теперішній час майже 99% ПО, які знаходяться у повітряному просторі, обладнані транспондерами ADS-B та працюють в системі вторинної оглядової радіолокації для управління повітряним рухом (Radar Beacon System) [2]. Технологія ADS-B фактично є елементом режиму "S" системи RBS.

Автоматичне залежне спостереження (ADS-B) – це технологія коопераційного спостереження, в якій ПО визначає своє місцезнаходження через супутникову систему навігації та поширює його у простір. Цю інформацію можуть отримувати як наземні станції органів УПР, так і інші повітряні судна, що дає змогу екіпажам бути більш ситуаційно обізнаними [3]. Технологія ADS-B може функціонувати в двох режимах: "ADS-B Out" та "ADS-B In" [3].

В режимі "ADS-B Out" через бортовий передавач поширюється інформація про точне місцезнаходження, висоту та швидкість ПО, а також інші данні з бортових систем ПО.

В режимі "ADS-B In" приймається інформація з каналів FIS-B (польотно-інформаційного сервісу) та TIS-B (інформацію про інший рух), а також інші данні ADS-B, такі як пряме спілкування з ПО, які перебувають поблизу.

В порівнянні з сучасними радіолокаційними засобами данні про поточне положення ПО, що визначаються системою ADS-B, мають суттєво вищу точ-

ність через те, що координати ПО визначаються бортовим GPS навігатором.

Дискретність передачі координатних даних (2 рази за секунду) також суттєво менше дискретності даних від радіолокаційних засобів. Значення швидкості та курсу в більшості випадків також беруться з бортових GPS навігаторів, але можуть братися і з іншого бортового обладнання. В більшості випадків значення висоти береться з барометричного висотоміру ПО.

Однак не слід забувати, що далеко не всі, навіть сучасні ПО, обладнані апаратурою ADS-B. Але зараз практично всі ПО мають спроможність роботи в режимі "S" системи вторинної локації RBS. В режимі вторинної локації ПО відповідають на сигнали запитів трасових локаторів органів УПП. Відповідь здійснюється на тій же частоті, що і ADS-B, а саме 1090 МГц. Відповідно, приймач ADS-B здатен приймати і сигнали відповідей ПО на запити трасових локаторів. А так як ПО практично завжди здійснюють політ в полі трасових локаторів, то практично завжди присутні сигнали відповідей. Аналізуючи ці сигнали, можна отримати ті ж самі данні, що від ADS-B (інформація про висоту, адресу ICAO, SQUAWK, позивний) за винятком поточних координат [4]. Для визначення координат ПО, який не передає своїх координат доцільно використовувати технологію MLAT. По суті це відомий різницево-далекомірний багатопозиційний спосіб визначення координат. Для його використання потрібно обробляти сигнали щонайменше від трьох приймачів, маючих просторовий рознос та точну синхронізацію часу. Точна прив'язка часу (до 50 нс) може здійснюватися за допомогою GPS приймачів.

Відомо, що основними факторами, які впливають на точність визначення координат ПО, є [2]:

- тактико-технічні характеристики приймачів;
- відстань між приймачами системи;
- геометрична побудова системи приймачів з використанням технології MLAT;
- синхронізація приймачів в системі.

Якість роботи системи з використанням технології MLAT, в основному, залежить від точності синхронізації приймачів системи.

Технологію MLAT використовує широко відомий Інтернет ресурс "FlightRadar" [5], де здійснюється обробка сигналів від тисяч ADS-B приймачів.

**Метою статті** є розробка методу синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні радіолокаційного контролю повітряної обстановки з використанням технології MLAT.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Теоретично можливо забезпечити роботу системи в абсолютному часі, наприклад використовуючи синхронізацію за допомогою системи GPS та отримувати точний час. Однак, не слід забувати, що при точності синхронізації в 1 мкс похибка складатиме 300 м. Таким чином, для більш якісного визначення координат ПО необхідно забезпечити точність синхронізації менше 1 мкс.

Відомо, що навіть у сигналі відповіді, наприклад у системах держвпізнання ("Пароль", "Кремній-2") кожний імпульс більший за 1 мкс та складає близько 2-3 мкс [6-8]. Таким чином, коли мова йде про вимірювання часу необхідно визначитися, що саме розуміється під поняттям "час". Наприклад, це може бути фронт першого імпульсу. Крім того, зробити точний годинник на кожному пункті прийому не є проблемою, ця задача може бути вирішена з використанням кварцового генератора [9]. Однак виникає проблема синхронізації цих годинників.

**Сутність методу синхронізації.** Отже, на кожному приймальному пункті маємо годинник, однак ці годинники не синхронізовані.

Схема розміщення приймачів системи MLAT показана на рис. 1.

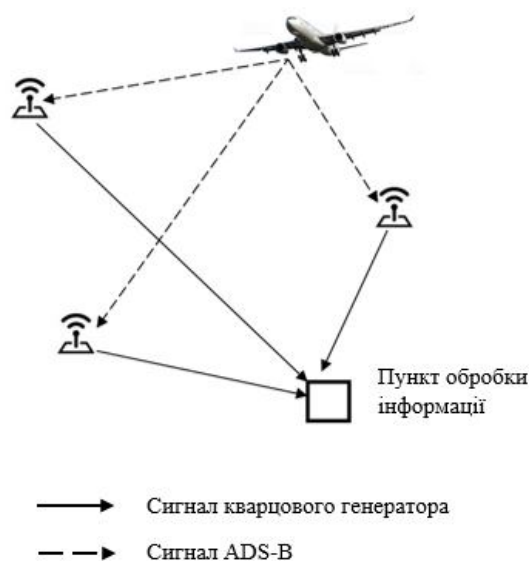


Рис. 1. Схема розміщення системи приймачів ADS-B

До кожного повідомлення, яке приймається, додається значення регістру (час прийому сигналу). Ці данні передаються на пункт обробки. Самі по собі ці данні не несуть корисної інформації, оскільки інформація про координати відсутня, а годинники на пунктах прийому не синхронізовані. Однак, не слід забувати, що на пунктах прийому в якості приймачів використовуються приймачі ADS-B, які здатні приймати сигнали від ПО, обладнаного відповідною апаратурою ADS-B на частоті 1090 МГц. Таким чином, якщо в зоні дії системи приймачів з'являється ПО, який передає у простір свої координати, є можливість використовувати їх у якості еталонних. Крім того, можна свідомо направити в зону відповідальності радіотехнічних підрозділів ПО, обладнаний відповідною апаратурою ADS-B та використовувати сигнал від нього в якості еталонного. Знаючи точні координати ПО, які передаються з борту ПО за даними системи ADS-B, є можливість визначити еталонну різницю часу приходу сигналу між окремими пунктами прийому та різницю значень кварцових генераторів між тими ж пунктами прийому. Значення поправки, використовуючи яке, можна забезпечити синхронізацію за часом між приймачами

системи, визначається як

$$P = \Delta t_{ADS-B} - \Delta t_{КГ}, \quad (1)$$

де  $\Delta t_{КГ}$  – різниця значень кварцових генераторів між окремими пунктами прийому;  $\Delta t_{ADS-B}$  – еталонна різниця часу приходу сигналу між окремими пунктами прийому.

Використовуючи технологію MLAT та маючи значення поправки  $P$  для кожного пункту прийому, можна враховувати її кожного разу, коли ПО, що знаходиться в зоні дії системи, не передає свої координати.

Алгоритм, що реалізує метод синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології MLAT, наведено на рис. 2.

На першому етапі здійснюється прийом повідомлень (сигналів) від ПО, що оснащені апаратурою ADS-B.

На другому етапі здійснюється прикріплення до кожного повідомлення значень часу кварцових генераторів на кожному пункті прийому та передача даних на пункт обробки інформації.

На третьому етапі за виразами (2), (3) та (4) обчислюються різниці часу приходу сигналу за даними ADS-B та за виразом (5) – різниця часу приходу сигналу за даними кварцового генератору:

$$t_1 = D_1/c, \quad (2)$$

$$t_2 = D_2/c, \quad (3)$$

$$\Delta t_{ADS-B} = t_1 - t_2, \quad (4)$$

де  $D_1$  – відстань від ПО до першого приймача;  $D_2$  – відстань від ПО до другого приймача;  $c$  – швидкість світла;  $t_1, t_2$  – час приходу сигналу на перший та другий приймач відповідно;

$$t_{КГ} = t_{1КГ} - t_{2КГ}, \quad (5)$$

де  $t_{1КГ}, t_{2КГ}$  – час прийому сигналу від ПО на першому та другому кварцовому генераторі відповідно.

На четвертому етапі обчислюється часова поправка за виразом (1). На п'ятому етапі, знаючи точне значення часової поправки для кожного пункту прийому, за виразом (6) здійснюється корегування (синхронізація) приймачів системи ADS-B з використанням технології MLAT:

$$t = \Delta t_{КГ} + P. \quad (6)$$

За необхідністю корегування можна проводити з певною періодичністю.

### Висновки і напрямки подальших досліджень

Основними перевагами запропонованого методу синхронізації системи приймачів ADS-B при веденні РЛК повітряної обстановки з використанням технології MLAT є можливість використання в якості контрольних об'єктів випадкових ПО, що пролітають в зоні відповідальності радіотехнічних підрозділів та оснащені транспондерами ADS-B. Крім того, синхронізація може проводитися в автоматичному режимі. Корегування поправок може здійснюватися з певною періодичністю. Використання даного методу може значно підвищити точність синхронізації що забезпечить більш точне визначення координат ПО, навіть якщо ПО не обладнане відповідною апаратурою ADS-B. **Напрямок подальших досліджень** є практичне застосування розробленого методу для синхронізації системи приймачів ADS-B з використанням технології мультилатерації.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основы построения радиолокационных станций радиотехнических войск. – Красноярск : СФУ, 2011. – 536 с.
2. Маляренко А.С. Системи вторинної радіолокації для управління повітряним рухом та державного впізнання / А.С. Маляренко. – Х.: ХУВС, 2007. – 78 с.

3. Standards of USA (2009), "RTCA DO-260B. Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance – Broadcast (ADS-B) and Traffic Inf. Services – Broadcast (TIS-B)", Washington, p. 185.
4. Лещенко С.П. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору / С.П. Лещенко, О.М. Колесник, С.А. Грицаєнко, С.І. Бурковський // Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України. – Х.: ХНУПС, 2017. – Вип. № 3(28). – С. 69–75.
5. Flightradar24. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: [www.flightradar24.com](http://www.flightradar24.com).
6. ГОСТ 25620-83 Системы вторичной радиолокации для управления воздушным движением. Методы измерений основных параметров.
7. Ширман Я.Д. Теоретические основы радиолокации / Я.Д. Ширман. – М.: Сов.радио, 1970. – 560 с.
8. Kuchuk G., Kovalenko A., Komari I.E., Svytydov A., Kharchenko V.. Improving big data centers energy efficiency: Traffic based model and method. Studies in Systems, Decision and Control, vol 171. Kharchenko, V., Kondratenko, Y., Kasprzyk, J. (Eds.). Springer Nature Switzerland AG, 2019. Pp. 161-183. DOI: [http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4\\_8](http://doi.org/10.1007/978-3-030-00253-4_8)
9. Хоменко И. В. Кварцевые резонаторы и генераторы : учеб. пособие / И. В. Хоменко, А. В. Косых : Минобрнауки России, ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – 160 с.

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. К. С. Васюта

Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

Received (Надійшла) 11.06.2019

Accepted for publication (Прийнята до друку) 31.07.2019

### Метод синхронизации системы приемников ADS-B при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки с использованием технологии MLAT

А. В. Федоров, Г. В. Худов, Б. В. Бакуменко, К. А. Тахьян, С. Н. Ковалевский

**Предметом** изучения в статье является метод синхронизации системы приемников ADS-B с использованием технологии MLAT. **Целью** является разработка метода синхронизации приемников автоматического зависящего наблюдения ADS-B при ведении радиолокационного контроля с использованием технологии MLAT. **Задачи:** анализ факторов, влияющих на точность определения координат воздушных объектов, краткий анализ возможностей технологии ADS-B, разработка метода синхронизации приемников ADS-B с использованием технологии MLAT. Используемыми **методами** являются: методы радиолокации, методы теории приема и обработки сигналов, определения координат воздушных объектов. Получены следующие **результаты**. Определены факторы, влияющие на точность определения координат воздушных объектов. Установлена возможность применения технологии автоматического зависящего наблюдения и технологии мультilaterации для повышения точности определения координат воздушных объектов. Установлено, что для качественного определения координат воздушных объектов необходимо обеспечить точность синхронизации приемников менее 1 мкс. Разработан метод синхронизации приемников ADS-B при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки с использованием технологии MLAT, что обеспечивает необходимую точность синхронизации. Предложен алгоритм, реализующий метод синхронизации системы приемников ADS-B с использованием технологии мультilaterации. **Выводы.** Научная новизна полученных результатов заключается в следующем. Установлено, что преимуществами использования предложенного метода синхронизации приемников ADS-B является простота процесса синхронизации, возможность использования в качестве контрольных объектов случайные воздушные объекты, оснащенные транспондерами ADS-B и находятся в зоне действия системы приемников ADS-B. В дальнейших исследованиях предлагается использование предложенного метода синхронизации системы приемников ADS-B и его практического применения при ведении радиолокационного контроля воздушной обстановки.

**Ключевые слова:** ADS-B, MLAT, синхронизация, воздушная обстановка, зависящее наблюдение, контроль воздушного пространства, координаты, GPS.

### Method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use

A. Fedorov, G. Hudov, B. Bakumenko, K. Tahyan, S. Kovalevskyi

The **subject matter** of the article is method of synchronization the ADS-B receivers system with MLAT technology use. The **goal** is to develop a method for synchronizing auto-dependent observation receivers ADS-B during conducting radar control with MLAT technology use. The **task** to analysis of the factors influencing the accuracy of the determination of airspace coordinates, a brief analysis of the ADS-B technology, and development the method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use. The **methods** used are: radar methods, methods of the theory of reception and processing of signals, determination of coordinates of air objects. The following **results** are obtained. The factors influencing accuracy of determination of coordinates of air objects are determined. The possibility of application of the technology of automatic dependent observation has been established to improve the accuracy of the determination of the coordinates of air objects. The method of synchronization the ADS-B receivers system for the radar aircraft control with MLAT technology use is developed. It is established that in order to better determine the coordinates of air objects, it is necessary to ensure the accuracy of synchronization of receivers of less than 1 microsecond. The method of synchronizing ADS-B receivers with radar control of the airspace with the use of MLAT technology has been developed, which provides the necessary precision of synchronization. The algorithm that implements the method of synchronization of the ADS-B receivers system using the technology of multilateration is proposed. **Conclusions.** The scientific novelty of the results obtained is as follows. It is established that the advantages of using the proposed ADS-B receiver synchronization method are the simplicity of the synchronization process, the possibility of using random objects of airborne objects equipped with ADS-B transponders and are in the action zone of the ADS-B receivers system as control objects. Further research suggests to use the proposed method of synchronizing the ADS-B receivers system and its practical use in conducting radar control of the airspace.

**Keywords:** ADS-B, MLAT, synchronization, air traffic, dependent monitoring, airspace control, coordinates, GPS.