

Г.В. Худов¹, О.С. Дьяконов², П.Є. Минко³, Ю.С. Соломоненко¹, В.П. Марченко⁴, К.А. Тахьян¹¹Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків²Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова, Миколаїв³Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків⁴Військова академія (м. Одеса), Одеса

ПОРУШЕННЯ В РОБОТІ ТРАНСПОНДЕРІВ ADS-B ПРИ ВИЗНАЧЕННІ КООРДИНАТ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ

Предметом статті є процес виявлення порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат повітряних об'єктів. Метою є підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів з рахунок своєчасного виявлення та усунення порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат повітряних об'єктів. Завдання: аналіз відомих методів підвищення точності координат повітряних об'єктів при контролі повітряного простору та ведення радіолокаційної розвідки; навести приклад використання інформації від транспондерів ADS-B; проаналізувати склад пакетів ADS-B; провести експериментальні дослідження щодо виявлення можливих порушень та збоїв транспондерів ADS-B. Отримані такі результати. Встановлено, що у теперішній час для підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів активно використовується автоматичне залежне спостереження – радіомовне. Проаналізовані відомі методи підвищення точності визначення координат повітряних об'єктів. Встановлено, що основними недоліками таких методів є використання морально застарілих технологій, невідповідність точності визначення координат повітряних об'єктів вимогам та стандартам безпеки повітряного руху тощо. Наведений приклад використання інформації від транспондерів ADS-B. Інформація отримана з використанням RTL-SDR приймача. Проаналізовано склад пакетів ADS-B. Встановлено, що існує можливість перерахунку контрольної суми Parity Information. В результаті цього отримується валідний ADS-B пакет. Другий тип вразливостей пов'язаний з відсутністю механізмів для міцного криптографічного підпису. Це може привести до посилання в ефір підроблених даних або підміни інформації в пакетах. Третій вид вразливостей пов'язаний з відсутністю криптивання на пакетному рівні. Розглянуті різні сценарії атак на ADS-B. Проведені експериментальні дослідження щодо виявлення можливих порушень та збоїв транспондерів ADS-B. Для проведення експериментів використовувався приймач FlightAware Piaware та програмне забезпечення PiAware від FlightAware. Проілюстровано значні помилки у визначенні координат повітряних об'єктів. Встановлено, що при проведенні експерименту основною причиною помилок у визначенні координат ПО є навігаційний модуль, який є частиною транспондеру ADS-B. В подальших дослідженнях пропонується розробити рекомендації щодо протидії порушенням в роботі транспондерів та приймачів ADS-B.

Ключові слова: порушення, транспондер, ADS-B, координата, повітряний об'єкт, атака, контрольна сума.

Вступ

Постановка проблеми. У теперішній час швидкими темпами збільшуються обсяги повітряного руху. Одночасно підвищується потреба у підвищенні ефективності використання повітряних суден та забезпечення безпеки масштабного та складного повітряного руху. Це, в свою чергу, вимагає використання більш досконалих інструментів. Одним з таких важливих інструментів в процесі організації повітряного руху є авіаційне спостереження.

Одним з основних видів спостереження, що активно використовується у теперішній час є автоматичне залежне спостереження – радіомовне (ADS-B). При такому спостереженні повітряні об'єкти (ПО) періодично передають поточні параметри

польоту. Передача здійснюється відповідними транспондерами, які встановлені на борту ПО. Приймання сигналів транспондерів ADS-B здійснюється приймачами ADS-B. Особливістю приймачів ADS-B є їх відносна простота та дешевизна. Точність визначення координат ПО обумовлюється тим, що визначення місцеположення ПО проводиться з використанням супутникової навігаційної системи.

Використання інформації з транспондерів ADS-B стало актуальним при веденні гібридних війн. При веденні гібридних війн польоти цивільної авіації виконуються в звичайному режимі. Додаткове використання інформації ADS-B дозволяє:

- зменшити похибки координат ПО;
- унеможливити маскування ПО – порушників повітряного простору під цивільні повітряні судна;

– підвищити ефективність ведення радіолокаційного спостереження повітряного простору.

В той же час актуальним є питання забезпечення безвідмовної роботи транспондерів ADS-B та забезпечення достовірності визначення координат ПО.

Мета статті – дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат ПО.

Аналіз останніх досягнень та публікацій. У теперішній час для спостереження та управління повітряним рухом використовуються радіолокаційні станції (РЛС) [1]: первинні РЛС, вторинні РЛС. Основні недоліки таких РЛС:

– використання морально застарілих технологій;

– розробка, виготовлення та підтримка РЛС коштують в 10-20 разів більше, ніж устаткування на нових сучасних технологіях;

– точність визначення координат ПО не відповідає вимогам та стандартам безпеки повітряного руху;

– використання сучасних технологій не обґрунтовано, недоцільне та не має сенсу.

В [2] запропоновано оптимізація розташування РЛС. Основна мета [2] – забезпечення ущільнення РЛС. За рахунок такого ущільнення підвищується відношення сигнал/шум і, як наслідок, точність визначення координат ПО.

В [3] запропоновано використовувати різні частотні діапазони роботи РЛС. За рахунок використання РЛС різних частотних діапазонів також підвищується відношення сигнал/шум і, відповідно, точність визначення координат ПО.

В [4] запропоновані методи підвищення точності визначення координат ПО за рахунок ускладнення апаратного та алгоритмічного устаткування РЛС.

Основні недоліки [2–4]: застосування складних методів обробки радіолокаційної інформації, підвищення вартості системи контролю повітряного простору, не задоволення основним вимогам щодо визначення точності координат ПО.

В [5] запропоновано використання мультирадарних радіолокаційних систем. Використання мультирадарних радіолокаційних систем призводить до підвищення відношення сигнал/шум, що, в свою чергу, підвищує точність визначення координат ПО.

В [6] розглянуто особливості когерентної обробки радіолокаційних сигналів у мультирадарних радіолокаційних системах. Основними недоліками [5–6] є необхідність забезпечення синхронної роботи всіх РЛС в мультирадарних системах.

В [7] запропоновано додаткове використання інформації щодо спектру сигналу, що відбивається від ПО. Таке врахування підвищує точність визначення координат ПО. Недолік [6] – необхідність

роботи з кореляційними матрицями, що потребує значного обчислювального ресурсу.

В [8] запропоновано використання перетворення Галеркіна-Петрова з додатковим використанням перетворення Хелстрема. Метод [8] потребує апріорного знання діаграми вторинного випромінювання ПО.

В [9–10] запропоновано додаткове використання сигналів зовнішніх джерел випромінювання. У якості зовнішніх джерел у [9–10] запропоновано використання сигналів стільникових станцій. Основним недоліком [9–10] є необхідність синхронізації роботи зовнішніх джерел випромінювання.

В [11] у якості зовнішніх джерел випромінювання запропоновано використання сигналів навігаційних космічних систем. Основним недоліком [11] є також необхідність забезпечення синхронної роботи зовнішніх джерел випромінювання.

В [12–13] у якості зовнішніх джерел випромінювання запропоновано використання сигналів цифрового ефірного телебачення DVB-T. Основним недоліком [12–13] є необхідність перебудови РЛС та забезпечення методів боротьби з потужним проникаючим сигналом.

В [14] запропоновано приймання сигналів від бортових транспондерів ADS-B. Зроблено висновок щодо можливості підвищення точності визначення координат ПО за рахунок приймання сигналів від транспондерів ADS-B. Але в [14] не наведено ніяких розрахунків щодо приймання сигналів від бортових транспондерів ADS-B.

В [15] наведені пропозиції щодо використання приймачів ADS-B на позиції радіотехнічних підрозділів. Встановлено, що таке використання підвищить точність визначення координат ПО. Але в [15] не розглянуто можливість впливу на приймачі та транспондери ADS-B, що може привести до порушень в їх роботі.

В [16] розглянуто застосування системи Лоран-С для визначення навігаційних параметрів ПО. Враховані особливості геометричної побудови системи Лоран-С, проведені розрахунки точності визначення навігаційних параметрів ПО. Використання приймачів ADS-B для підвищення точності визначення ПО в [16] не розглядається. В [17] розглянуто побудова мультилатераційної системи визначення координат ПО. Недоліком [16] є можливість визначення координат ПО лише в межах аеропорту або аеродрому посадки чи базування. В [18] запропоновано для визначення координат ПО використання глобальної системи мультилатерації. Така система передбачає суттєвий розніс приймачів у просторі. Недоліками [18] є використання потужних сигналів та складного приймального обладнання. В [19] запропоновано методи визначення координат ПО, в основі яких покладено метод максимальної правдоподібності.

Недоліком [19] є складність вирішення оптимізаційної задачі внаслідок використання складних цільових функцій.

Використання спрощених цільових функцій при визначенні координат ПО запропоновано у [20]. Використовуються квадратичні цільові функції. Основний недолік [20] – оцінки координат ПО є зміщеними.

Алгебраїчні методи визначення координат ПО представлені в [21]. Система рівнянь, що використовується у [21], є лінійна та перевизначена. Це спрощує отримання оцінок координат ПО. Але у [21] не враховано випадковість при визначенні координат ПО. В [22–23] використовується алгоритм Банкрофта. За допомогою алгоритму Банкрофта розроблено комбінований метод визначення координат ПО. Метод передбачає рішення лінійної системи рівнянь за результатами спостереження ПО. Недоліком [22]–[23] є використання додаткових обчислень, обумовлених неоднозначністю тримання оцінок координат ПО. В [24] для визначення координат ПО запропоновано використання системи мультилатерації, що працює в пасивному режимі. У якості приймачів в такій системі можуть використовуватися приймачі ADS-B. При цьому використання алгебраїчних методів визначення координат ПО поєднується з використанням статистичних методів визначення координат ПО. Недоліком [24] є можливість використання такої системи в межах незначних відстаней до ПО (наприклад, в межах аеродрому базування чи аеропорту). В [25] для визначення координат ПО запропоновано використання глобальної системи мультилатерації. Перевагою такої системи є можливість визначення координат ПО на значних відстанях. В [25] проведені розрахунки конфігурації мультилатераційної системи в залежності від дальності до ПО. Але в [25] розрахунки проведені без урахування технічних можливостей приймачів мультилатераційної системи (наприклад, приймачів ADS-B).

Отже, з аналізу останніх досягнень та публікацій встановлено, що для управління повітряним рухом та ведення радіолокаційної розвідки широко використовується автоматичне залежне спостереження. При цьому вкрай важливо забезпечити якість та безперебійну роботу транспондерів та приймачів ADS-B. Тому актуальним є дослідження можливих порушень в роботі транспондерів ADS-B при визначенні координат ПО.

Виклад основного матеріалу

Основною перевагою використання ADS-B є можливість визначення координат ПО з використанням інформації супутникових навігаційних систем (наприклад, GPS/ГЛОНАСС). ПО визначає свої місцеположення з використанням супутникових навігаційних систем та за допомогою транспондерів

періодично передає цю інформацію. Інформація може бути отримана наземними станціями управління повітряним рухом. Такі станції можуть розглядатися як заміна вторинного оглядового радіолокатора. Сигнал від транспондерів ADS-B може також прийматися іншими ПО для забезпечення ситуаційної усвідомленості. В результаті більш точного позиціонування ПО можливо досягти підвищеної безпеки польотів, більш компактного та ефективного використання повітряного простору.

ADS-B є елементом системи повітряного транспорту США нового покоління NextGen, авіаційної системи Індії ASBU, дослідного Європейського проекту SESAR, систем, в яких не використовуються традиційні радары (райони Гудзонова проливу, Лабрадорське море, пролив Девіса, Баффінов залив та південна частина Гренландії).

Приклад використання інформації від транспондерів ADS-B наведений на рис. 1. Це ПО (рейс 50816F) сполученням Херсон – Київ [15].

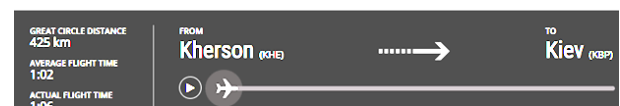
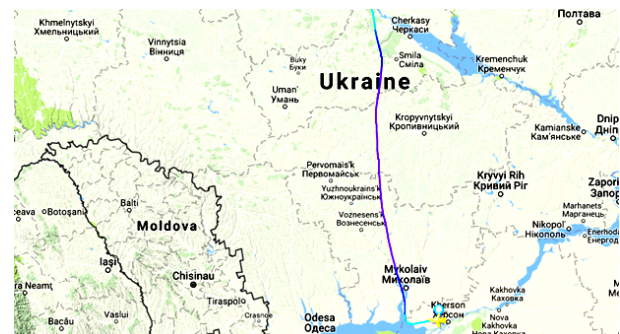


Рис. 1. ПО (рейс 50816F)

Джерело: [15].

Інформація (рис. 1) отримана з використанням RTL-SDR приймача (рис. 2).



Рис. 2. RTL-SDR приймач

Джерело: [15].

Дослідження проводилися у місті Миколаїв (Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова) рис. 4). Технічні характеристики приймача наведені в [15].

На рис. 1 траса ПО відмічена суцільною лінією синього кольору. Збоїв в роботі транспондерів та приймачів ADS-B не зафіксовано.

Передача інформації з транспондерів ADS-B проводиться у відкритому режимі. Отже, є можливість проведення різного роду атак на технологію ADS-B.

У всіх пакетах ADS-B присутні два обов'язкових поля:

– Aircraft Address (AA), у якому вказується глобально унікальний ідентифікатор ПО. Аналогічно IMSI на SIM-карті або MAC-адресу мережевої картки;

– Parity Information (PI), яке містить інформацію для контролю бітної парності.

Хоча наявність останнього поля, на перший погляд, оберігає пакети від сторонньої, випадкової чи зловмисної маніпуляції, але це зовсім не так. Це поле може лише підказати, чи були допущені випадкові помилки під час передачі даних. З іншого боку, зловмисник, який шкідливо маніпулює даними, може просто і легко перерахувати контрольну суму PI, отримуючи в результаті здоровий і валідний ADS-B пакет. Глобальність ідентифікатора ПО та унікальність мають інший наслідок – суттєво послаблюється безпека ADS-B з погляду конфіденційності. Очевидно, це дозволяє відстежувати дані всіх літаків як реального часу.

Другий тип вразливостей пов'язані з відсутністю механізмів для міцного криптографічного підпису. Найголовніше в цій уразливості – це можливість посилати в ефір підроблені дані або підмінювати інформацію в цих пакетах, а найнеприємніше – це той факт, що сторона, яка приймає дані пакети, не може бути впевнена ні в автентичності пакета, ні в ідентифікації того, хто посилає, ні без шкідливих змін у якомусь спочатку справжньому пакеті.

Третій вид вразливості пов'язаний з відсутністю криптивання на пакетному рівні. Систему для ADS-B для застосування в мирний час зробили некриптованою з низки технічних причин. По-перше, можливості обладнання для ADS-B недостатні для ресурсомістких криптографічних операцій. По-друге, існують витрати лише на рівні менеджменту криптографічних ключів. Якщо система використовуватиме один ключ по системі “shared secret”, його буде досить легко обчислити, оскільки довжина пакета невелика і більшість даних у пакеті можна передбачити.

Сценарії атак на ADS-B можуть бути різними. Так, наприклад, атака на неконфіденційність даних та глобально унікальні статичні ідентифікатори

адрес ПО.

Перехоплюючи AA, можна стежити будь-яким ПО. А якщо все це ще інтегрувати з публічно доступними базами даних, які детально розписують особисті дані власників ПО, то природно, можна отримати інформацію, яка показує, хто з власників де знаходиться і куди пересувається.

Це певною мірою порівняно з ситуацією, коли особисті дані реєстрації автотранспорту стануть публічно доступними.

Також зловмисник може зімітувати на екранах диспетчерів польотів повітряне зіткнення літаків або згенерувати на екранах диспетчерів кілька тисяч неіснуючих ПО на базі підроблених даних, але використовуючи реальні ідентифікатори інших ПО, що зробить роботу диспетчера практично нездійсненною. Це може призвести до різного роду наслідків – від паніки у штабі диспетчерів польоту до спрацювання наземних систем щодо запобігання терористичних актів та виклику термінових аварійних служб.

Проведемо експериментальні дослідження щодо виявлення можливих порушень та збоїв транспондерів ADS-B. Для проведення експериментів будемо використовувати та порушень приймач FlightAware Piaware (рис. 3) та програмне забезпечення PiAware від FlightAware.



Рис. 3. Приймач FlightAware Piaware
Джерело: розроблено авторами.

Робоча частота приймач FlightAware Piaware 1090 МГц, до складу входить смуговий фільтр. Використовується Raspberry Pi 3 B+ та приймач GPS. Основне призначення приймача GPS – проведення синхронізації у часі та визначення координат ПО. До складу приймального комплексу входить антена (коефіцієнт підсилення 5дБ).

Формат отримання декодованих повідомлень – beast.

На рис. 4, 5 наведені результати експерименту щодо визначення координат ПО CYP487. Дата проведення експерименту – 20.08.2021.

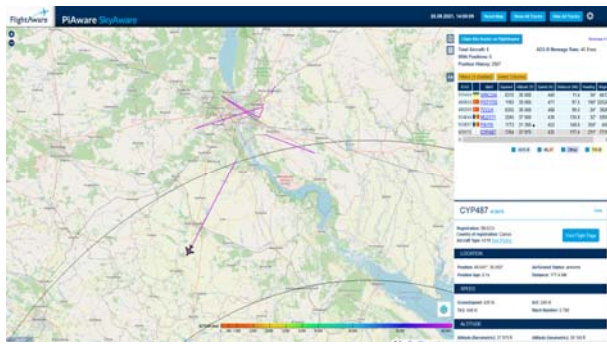


Рис. 4. Експериментальні дані щодо ПО СУР487 (20.08.2021)

Джерело: розроблено авторами.

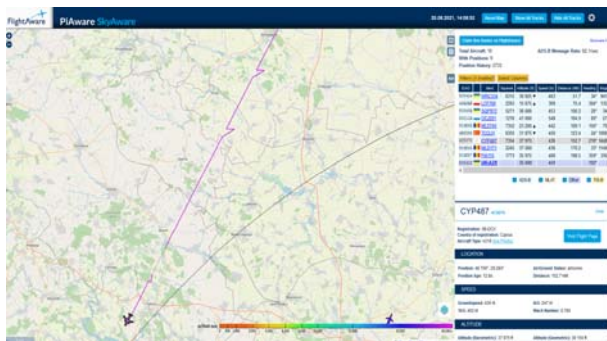


Рис. 5. Експериментальні дані щодо ПО СУР487 (20.08.2021)

Джерело: розроблено авторами.

Рис. 4 ілюструє значні помилки у визначенні координат ПО (особливо – у Київській області). Імовірною причиною наведених помилок є нестабільність транспондерів та ADS-B приймачів.

Рис. 5 також ілюструє помилки у визначенні координат ПО у декількох районах на протязі польоту ПО.

При проведенні експерименту з використанням даних сайту Flightradar24 встановлено, що ПО СУР487 рухався від Москви до Ларнаки (рис. 6).

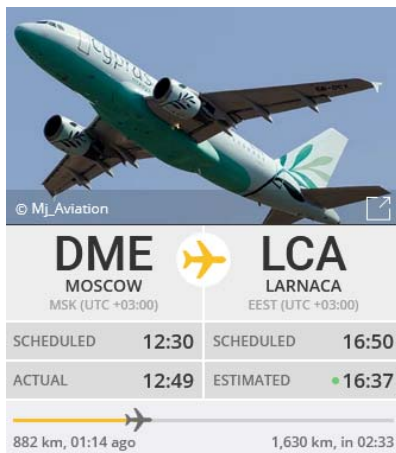


Рис. 6. ПО СУР487

Джерело: розроблено авторами.

До транспондеру ADS-B інтегровано модуль GPS. Імовірно, що саме цей модуль і є причиною

помилку у визначенні координат ПО.

При цьому у повідомленні ADS-B використовується контрольна CRC сума, яка представлена 24-ма розрядами.

Враховуючи той факт, що ADS-B технологія є GPS залежною, саме атаки на такі системи і приводять до помилок у визначенні координат ПО. Як правило, атаки проводяться частіше на програмне забезпечення навігаційних приймачів. Це може привести до розсинхронізації, помилок у визначенні ефемерид, помилок у визначенні поточної дати, спуфінгу, тощо.

Також може бути навмисне спотворення та підробка повідомлення ADS-B. Таке навмисне спотворення і підробка передбачає наявність іншого ПО. Але аналіз рис. 4, 5 свідчить про відсутність іншого ПО. Отже, при проведенні експерименту (рис. 4, 5) основною причиною помилок у визначенні координат ПО є навігаційний модуль, який є частиною транспондеру ADS-B. Такі помилки у визначенні координат ПО, безумовно, не є припустимими та вимагають прийняття відповідних заходів.

Висновки

Встановлено, що у теперішній час для підвищення точності визначення координат ПО активно використовується автоматичне залежне спостереження – радіомовне (ADS-B). При такому спостереженні передача поточних параметрів польоту здійснюється відповідними транспондерами, які встановлені на борту ПО. При цьому актуальним є забезпечення безвідмовної роботи транспондерів ADS-B та забезпечення достовірності визначення координат ПО.

Проаналізовані відомі методи підвищення точності визначення координат ПО. Встановлено, що основними недоліками таких методів є використання морально застарілих технологій, невідповідність точності визначення координат ПО вимогам та стандартам безпеки повітряного руху тощо.

Наведений приклад використання інформації від транспондерів ADS-B. Інформація отримана з використанням RTL-SDR приймача. При цьому збоїв в роботі транспондерів та приймачів ADS-B не зафіксовано. Встановлено, що передача інформації з транспондерів ADS-B проводиться у відкритому режимі. Отже, є можливість проведення різного роду атак на технологію ADS-B.

Проаналізовано склад пакетів ADS-B. Встановлено, що існує можливість перерахунку контрольної суми PI. В результаті цього отримується валідний ADS-B пакет. Другий тип вразливостей пов'язаний з відсутністю механізмів для міцного криптографічного підпису. Це може привести до посилення в ефір підроблених даних або підміни інформації в пакетах. Третій вид вразливості пов'язаний з відсут-

ністю криптування на пакетному рівні. Розглянуті різні сценарії атак на ADS-B.

Проведені експериментальні дослідження щодо виявлення можливих порушень та збоїв транспондерів ADS-B. Для проведення експериментів використовувався приймач FlightAware Piaware та програмне забезпечення PiAware від FlightAware. Проілюстровано значні помилки у визначенні координат

ПО. Встановлено, що при проведенні експерименту основною причиною помилок у визначенні координат ПО є навігаційний модуль, який є частиною транспондеру ADS-B.

Напрямами подальших досліджень є розробка рекомендацій щодо протидії порушенням в роботі транспондерів та приймачів ADS-B.

Список літератури

1. Друзин С. В., Горевич Б. Н. Методика формирования облика радиолокационных станций перспективной системы вооружения войсковой ПВО. *Вестник Концерна ВКО "Алмаз – Антей"*. 2020. № 2. С. 6-31. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2020-2-6-31>.
2. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of modern radar. Raleigh : SciTech Publishing, 2013. 872 p.
3. Melvin W. L., Scheer J. A. Principles of modern radar. Volume III, Radar applications. Raleigh : SciTech Publishing, 2014. 821 p.
4. Bezouwen J., Brandfass M. Technology Trends for Future Radar : web-site. URL: <http://www.microwavejournal.com/articles/29367-technology-trends-for-future-radar> – 14.10.2020 year (accessed 08.06.2021).
5. Lishchenko V., Kalimulin T., Khizhnyak I., Khudov H. The method of the organization coordinated work for air surveillance in MIMO radar. *2018 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics*. <https://doi.org/doi:10.1109/UkrMiCo43733.2018.9047560>.
6. Khudov H., Lishchenko V., Lanetskii B., Lukianchuk V., Stetsiv S., Kravchenko I. The coherent signals processing method in the multiradar system of the same type two-coordinate surveillance radars with mechanical azimuthal rotation. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2020. Vol. 8. No. 6. P. 2624-2630. <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/66862020>.
7. Марпл-мл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения : пер. с англ. Москва : Мир, 1990. 584 с.
8. Климов С. А. Метод повышения разрешающей способности радиолокационных систем при цифровой обработке сигналов. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 1. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/jan13/1/text.html>. – 11.04.2021 year (дата звернення: 07.06.2021).
9. Bhatta A., Mishra A. GSM based CommSense system to measure and estimate environmental changes. *IEEE AES magazine*. 2018. Vol. 32. <https://doi.org/10.1109/maes.2017.150272>.
10. Neyt X., Raout J., Kubica M., Kubica V., Roques S., Acheroy M., Verly J. Feasibility of STAP for passive GSM-based radar : web-site. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.158.2101&rep=rep1&type=pdf> (accessed 08.06.2021).
11. Willis N., Nicholas J. Bistatic Radar, Second Edition. Raleigh : SciTech Publishing, 2005. 329 p.
12. Khudov H., Zvonko A., Kovalevskiy S., Lishchenko V., Zots F. Method for the detection of small sized air objects by observational radars. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 2(92). P. 61-68. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.126509>.
13. Ruban I., Khudov H., Lishchenko V., Pukhovyi O., Popov S., Kolos R., Kravets T., Shamrai N., Solomonenko Y., Yuzova I. The assessment of detection zones of radars with the additional use of external sources emission. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 6/9(108). P. 6-17. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.216118>.
14. Лещенко С. П., Колесник О. М., Грицаенко С. А., Бурковський С. І. Використання інформації ADS-B в інтересах підвищення якості ведення радіолокаційної розвідки повітряного простору. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. № 3(28). С. 69-75.
15. Khudov H., Diakonov O., Kuchuk N., Method for determining coordinates of airborne objects by radars with additional use of ADS-B receivers. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. № 4/9(112). P. 54-64. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.238407>.
16. Platform SKYbrary : web-site. URL: <https://www.skybrary.aero/index.php/LORAN-C> (accessed 08.06.2021).
17. Multilateration (MLAT) Concept of Use. Edition 1. ICAO Asia and Pacific Office. 2007 : web-site. URL: https://www.icao.int/APAC/Documents/edocs/mlat_concept.pdf (accessed 08.06.2021).
18. Neven W. H., Quilter T. J., Weedon R., Hogendoorn R. A. Wide Area Multilateration Wide Area Multilateration Report on EATMP TRS 131/04. Version 1.1 : web-site. URL: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-05/surveillance-report-wide-area-multilateration-200508.pdf> (accessed 08.06.2021).
19. Mantilla-Gaviria I. A., Leonardi M., Balbastre-Tejedor J. V., Reyes E. D. L. On the application of singular value decomposition and Tikhonov regularization to ill-posed problems in hyperbolic passive location. *Mathematical and Computer Modelling*. 2013. Vol. 57. № 7. P. 1999-2006. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2012.03.004>.
20. Schau H. C., Robinson A. Z. Passive source localization employing intersecting spherical surfaces from time-of-arrival differences. *IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing*. 1987. № 8. P. 1223-1225. <https://doi.org/10.1109/TASSP.1987.1165266>.
21. Leonardi M., Mathias A., Galati G. Two Efficient Localization Algorithms for Multilateration. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. 2009. Vol. 1. № 3. P. 223-229. <https://doi.org/10.1017/S1759078709000245>.

22. Монаков А. А. Алгоритм оценки местоположения объекта в активных системах мультilaterации. XXIV Международная научно-техническая конференция "Радиолокация, навигация, связь". Воронеж, 17-19 апр. 2018 г. Т. 3. С. 134-142.

23. Монаков А. А. Модифицированный алгоритм Банкрофта для систем мультilaterации. *Радиоэлектроника*. 2018. № 1. С. 50-55.

24. Monakov A. A. Localization algorithm for multilateration systems. *Radioelectronics*. 2018. № 4. P. 38-46. <https://doi.org/10.32603/1993-8985-2018-21-4-38-46>.

25. Скрыпник О., Шагидевич А. Особенности рабочих зон многопозиционных систем наблюдения. *Авиационный вестник*. 2019. № 1(1). С. 10-16.

Надійшла до редколегії 24.09.2021

Схвалена до друку 16.11.2021

Відомості про авторів:

Худов Геннадій Володимирович

доктор технічних наук професор
начальник кафедри
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-8269-0089>

Дьяконов Олексій Сергійович

кандидат технічних наук
доцент кафедри Національного університету
кораблебудування ім. адмірала Макарова,
Миколаїв, Україна
<https://orcid.org/0001-7438-7066>

Минко Петро Євгенович

кандидат фізико-математичних наук
доцент Харківського національного
університету радіоелектроніки,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0002-2621-8900>

Соломоненко Юрій Станіславович

кандидат технічних наук
заступник начальника факультету
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<http://orcid.org/0000-0002-6503-7475>

Марченко Володимир Петрович

викладач
Військової академії (м. Одеса),
Одеса, Україна
<https://orcid.org/0000-0001-5775-4477>

Тахьян Крістіна Альбертівна

науковий співробітник
Харківського національного університету
Повітряних Сил ім. І. Кожедуба,
Харків, Україна
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

Information about the authors:

Hennadii Khudov

Doctor of Engineering Science Professor
Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-3311-2848>

Oleksii Diakonov

PhD in Engineering
Associate Professor of Admiral Makarov National
University of Shipbuilding
Mykolaiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-7438-7066>

Petro Mynko

PhD in Physical and Mathematical Sciences
Associate Professor of Kharkiv National University
of Radio Electronics
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-2621-8900>

Yuriy Solomonenko

PhD in Engineering
Deputy Head of Department
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<http://orcid.org/0000-0002-6503-7475>

Volodymyr Marchenko

Lecturer
of Military Academy
Odesa, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-5775-4477>

Kristina Tahyan

Researcher
of Ivan Kozhedub Kharkiv National
Air Force University,
Kharkiv, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0003-0087-9601>

СБОИ В РАБОТЕ ТРАНСПОНДЕРОВ ADS-B ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ КООРДИНАТ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Г.В. Худов, А.С. Дьяконов, П.Е. Минко, Ю.С. Соломоненко, В.П. Марченко, К.А. Тахьян

Предметом исследования в статье является процесс обнаружения нарушений в работе транспондеров ADS-B при определении координат воздушных объектов. Целью является повышение точности определения координат воздушных объектов за счет своевременного обнаружения и устранения нарушений в работе транспондеров ADS-B при определении

нии координат воздушных объектов. Задачи: анализ известных методов повышения точности координат воздушных объектов при контроле воздушного пространства и радиолокационной разведки; привести пример использования информации от транспондеров ADS-B; проанализировать состав пакетов ADS-B; провести экспериментальные исследования по выявлению возможных нарушений и сбоев транспондеров ADS-B. Получены следующие результаты. Установлено, что основными недостатками таких методов является использование морально устаревших технологий, несоответствие точности определения координат воздушных объектов требованиям и стандартам безопасности воздушного движения. Приведен пример использования информации от транспондеров ADS-B. Проанализирован пакет ADS-B. Рассмотрены разные сценарии атак на ADS-B. Проведены экспериментальные исследования по выявлению возможных нарушений и сбоев транспондеров ADS-B. Установлено, что при проведении эксперимента основной причиной ошибок в определении координат ПО является навигационный модуль, являющийся частью транспондера ADS-B. В дальнейших исследованиях предлагается разработать рекомендации по противодействию нарушениям в работе транспондеров и приемников ADS-B.

Ключевые слова: нарушение, транспондер, ADS-B, координата, воздушный объект, атака, контрольная сумма.

DISORDERS IN THE OPERATION OF ADS-B TRANSPONDERS WHEN DETERMINING THE COORDINATES OF AIR OBJECTS

H. Khudov, O. Diakonov, P. Mynko, Yu. Solomonenko, V. Marchenko, K. Tahyan

The subject of the paper is the process of detecting violations in the operation of ADS-B transponders in determining the coordinates of air objects. The aim is to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects by timely detection and elimination of violations in the operation of ADS-B transponders in determining the coordinates of air objects. Tasks: analysis of known methods to improve the accuracy of the coordinates of air objects in the control of airspace and radar reconnaissance; give an example of the use of information from ADS-B transponders; analyze the composition of ADS-B packages; to conduct experimental studies to identify possible violations and failures of ADS-B transponders. The following results were obtained. It is established that nowadays automatic radio-dependent dependent observation is actively used to increase the accuracy of determining the coordinates of air objects. The known methods of increasing the accuracy of determining the coordinates of air objects are analyzed. It is established that the main disadvantages of such methods are the use of obsolete technologies, the inconsistency of the accuracy of determining the coordinates of air objects to the requirements and standards of air traffic safety, and so on. An example of the use of information from ADS-B transponders is given. The information was obtained using an RTL-SDR receiver. The composition of ADS-B packages is analyzed. It is established that it is possible to recalculate the checksum Parity Information. The result is a valid ADS-B packet. The second type of vulnerability is the lack of mechanisms for strong cryptographic signatures. This can lead to the broadcast of fake data or the substitution of information in packets. The third type of vulnerability is related to the lack of encryption at the batch level. Different scenarios of attacks on ADS-B are considered. Experimental studies have been conducted to identify possible violations and failures of ADS-B transponders. FlightAware PiAware receiver and FlightAware PiAware software were used for the experiments. Significant errors in determining the coordinates of air objects are illustrated. It is established that during the experiment the main cause of errors in determining the coordinates of the software is the navigation module, which is part of the transponder ADS-B. In further research, it is proposed to develop recommendations for combating malfunctions in transponders and ADS-B receivers.

Keywords: violation, transponder, ADS-B, coordinate, air object, attack, checksum.