

УДК 629.7.016.2

DOI 10.51955/2312-1327_2023_4_50

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДА TDOA ДЛЯ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ РАДИОВЕЩАТЕЛЬНОГО АВТОМАТИЧЕСКОГО ЗАВИСИМОГО НАБЛЮДЕНИЯ

Александр Петрович Плясовских,
orcid.org/0000-0003-2250-8852,

доктор технических наук

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, д. 38*

Санкт-Петербург, 196210, Россия
al.plyasovskih@yandex.ru

Артем Вадимович Копосов,
orcid.org/0009-0002-4886-9250,

аспирант

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, д. 38*

Санкт-Петербург, 196210, Россия
a.kop33@mail.ru

Владислав Юрьевич Давиденко,
orcid.org/0009-0001-9707-166X,

аспирант

*Санкт-Петербургский государственный университет гражданской
авиации имени главного маршала авиации А.А. Новикова,
ул. Пилотов, д. 38*

Санкт-Петербург, 196210, Россия
david071521@mail.ru

Аннотация. Представленная статья посвящена возможности использования метода Time Different Of Arrival (TDOA), который можно применить для подтверждения достоверности информации, поступающей от нескольких наземных станций автоматического зависимого наблюдения вещательного типа (АЗН-В). Целью работы является изучение метода TDOA и применение его для станций АЗН-В. Данный метод дает возможность использования АЗН-В как единственного средства наблюдения на аэродроме. На данный момент, согласно рекомендациям ИКАО, станции АЗН-В не допускается использовать в качестве самостоятельного средства наблюдения из-за проблем, связанных с возможностью искажения сигнала или же внесения заведомо ложной информации в сообщения, поэтому эксплуатация данного вида станций возможна только совместно с другими средствами наблюдения, такими как многопозиционные системы наблюдения (МПСН) или системы вторичной радиолокации (ВРЛ), что увеличивает стоимость организации наблюдения на летном поле. Таким образом, актуальность работы связана с необходимостью поиска альтернативного метода подтверждения достоверности сообщения АЗН-В.

Ключевые слова: радиовещательное автоматическое зависимое наблюдение, АЗН-В, подтверждение, спуфинг, гипербола, разница времени.

USING THE TDOA METHOD FOR VALIDATION OF BROADCAST AUTOMATIC DEPENDENT SURVEILLANCE

*Alexander P. Plyasovskih,
orcid.org/0000-0003-2250-8852,
Doctor of Technical Sciences
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
Saint-Petersburg, 196210, Russia
al.plyasovskih@yandex.ru*

*Artem V. Kuposov,
orcid.org/0009-0002-4886-9250,
Postgraduate student
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
Saint-Petersburg, 196210, Russia
a.kop33@mail.ru*

*Vladislav Yu. Davidenko,
orcid.org/0009-0001-9707-166X,
Postgraduate student
St. Petersburg State University of Civil Aviation
named after Air Chief Marshal A.A. Novikov,
38, street of Pilots
Saint-Petersburg, 196210, Russia
david071521@mail.ru*

Abstract. The paper considers the possibility of using the Time Difference of Arrival (TDOA) method, which can be applied to confirm the reliability of information coming from multiple sources. TDOA method can be applied to validate the information received from several ground automatic dependent surveillance stations of broadcast type (ADS-B). The paper is aimed at studying the TDOA method and its application to ADS-B stations. This method makes it possible to use the ADS-B as the only means of surveillance at the airfield. Currently, according to ICAO recommendations, ADS-B stations are not allowed to be used as a stand-alone surveillance aid due to the problems related to the possibility of distorting a signal or introducing some false information into messages, so the operation of this type of stations is possible only together with other means of surveillance, such as multi-position surveillance systems (MLAT) or secondary surveillance radar systems (SSR) thus increasing the cost of organizing surveillance on the airfield. Thus, the relevance of the work is related to the need to find an alternative method of confirming the validity of an ADS-B message.

Key words: ADS-B, validation, spoofing, time difference, hyperbole.

Введение

Согласно Глобальному аэронавигационному плану ИКАО (ГАНП), первостепенной задачей всех организаций, относящихся к авиации, является обеспечение устойчивого развития глобальной системы гражданской авиации [Aeronautical Surveillance..., 2020; Global air..., 2016]. Одной из важных областей, которая непосредственно способствует развитию глобальной системы, а также способна реализовать стратегические цели ГАНП, в частности повышение уровня безопасности, наращивание потенциала и повышения эффективности

деятельности авиационной отрасли, является система авиационного наблюдения.

Системы авиационного наблюдения, в группу которых входит радиовещательное автоматическое зависимое наблюдение (АЗН-В), способствуют реализации одного из важных требований авиации – повышение уровня безопасности выполнения полетов ВС, а также содействующих в решении проблем, связанных с увеличением пропускной способности воздушного пространства [Княжский и др., 2019; Aeronautical Surveillance..., 2020; Minimum operational..., 2009,].

Система АЗН-В необходима для наблюдения за находящимися в зоне видимости наземной станции ВС и транспортными средствами оборудованными ответчиками, а также для передачи информации в центры управления воздушным движением.

АЗН-В имеет ряд преимуществ, таких как возможность установки станций в сложно-доступных районах, низкая стоимость оборудования, высокая точность [Сравнение..., 2020]. Также станции АЗН-В могут быть использованы для усовершенствованной системы наблюдения и контроля наземного движения (A-SMGCS) [Advanced Surface..., 2004]. Если АЗН-В входит в данную систему, то соответственно повышается уровень безопасности полетов в месте установки и имеется ряд преимуществ таких как:

- уменьшение количества столкновений на ВПП;
- сокращение времени руления путем повышения ситуационной осведомленности;
- снижение стоимости техобслуживания в сравнении с другими средствами наблюдения.

Помимо преимуществ есть недостатки, связанные с подтверждением достоверности сообщений. Из-за возможности внесения ложной информации в сообщения, получаемые на станциях, необходимо подтверждать достоверность информации АЗН-В с помощью многопозиционных систем наблюдения или вторичного радиолокатора.

Актуальность данной работы обуславливается необходимостью поиска альтернативной методики подтверждения достоверности сообщений АЗН-В, помимо установки дополнительного средства наблюдения. Также необходимо получить возможность выявления недостоверных сообщений, которые, в свою очередь, непосредственно влияют на безопасность выполнения полетов.

Новизна данного подхода заключается в том, что использование метода TDOA позволяет независимое измерение разности расстояния от наземных станций до ВС и обеспечивает подтверждение достоверности передаваемых в сообщении координат ВС.

Материалы и методы

Для подтверждения достоверности сообщений АЗН-В методом TDOA необходимы следующие исходные данные:

- 1) Время приема сообщений на станциях АЗН-В.
- 2) Координаты станций АЗН-В.

3) Координаты ВС, полученные с помощью бортовых систем.

Подтверждение достоверности основано на методе разницы приема сигнала TDOA (Time Difference Of Arrival). Следует отметить низкую стоимость оборудования станций АЗН-В, в сравнении с аналогами, которые можно использовать для наблюдения. Данный метод позволит использовать станции АЗН-В без дополнительной информации от независимого источника, таких как многопозиционные системы наблюдения, или вторичного радиолокатора. Линия вероятного местоположения с постоянной разницей расстояний, которая заложена в методе TDOA – это гипербола.

Гипербола – это совокупность точек плоскости, разность расстояний которых от двух данных точек, называемых фокусами, величина постоянная¹.

Для вывода канонического уравнения гиперболы, необходимого для реализации методики подтверждения достоверности сообщения АЗН-В, воспользуемся системой координат, представляющей собой прямоугольную систему координат, состоящую из оси абсцисс, проведенной через фокусы F_1 и F_2 , и оси ординат – выбранной перпендикулярно оси абсцисс через середину расстояния между фокусами. Обозначим через $2d$ – расстояние между фокусами, которое больше, чем разность расстояний до фокусов от произвольной точки. Введем обозначение для параметра гиперболы b , согласно которому:

$$b^2 = d^2 - a^2, \quad (1)$$

где d – половина расстояния между фокусами,

a – от центра гиперболы до одной из вершин.

Для нахождения половины разницы расстояний от произвольной точки до фокусов необходимо воспользоваться формулой:

$$a = \frac{r_2 - r_1}{2}, \quad (2)$$

где r_1 и r_2 – расстояние от первого и второго фокуса до произвольной точки соответственно.

¹ Мышкис А. Д. Лекции по высшей математике: Учебное пособие. 6-е изд., испр. СПб.: Издательство «Лань», 2009. 688с.: ил. (Учебники для вузов. Специальная литература)

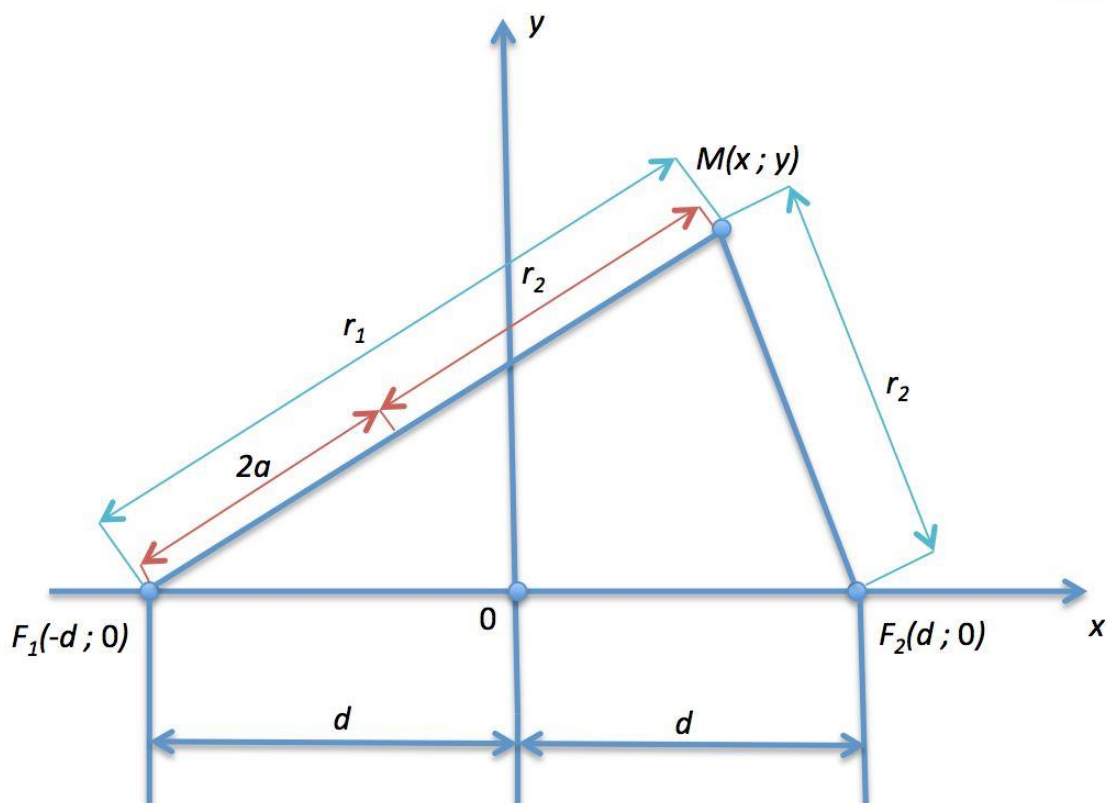


Рисунок 1 – Построение гиперболы

Для получения канонического уравнения гиперболы выберем произвольную точку и получим для нее следующие математические выражения (рис. 1):

$$r_1 = \sqrt{(x - d)^2 + y^2}, \quad (3)$$

$$r_2 = \sqrt{(x + d)^2 + y^2} \quad (4)$$

$$\begin{cases} r_2 - r_1 = 2a \\ r_2^2 - r_1^2 = 4dx \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} r_2 + r_1 = 2\frac{d}{a}x \\ r_2 - r_1 = 2a \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} r_1 = \frac{d}{a}x - a \\ r_2 = \frac{d}{a}x + a \end{cases} \quad (7)$$

Таким образом,

$$(x + d)^2 + y^2 = \left(\frac{d}{a} + a\right)^2 \quad (8)$$

$$x^2 + 2dx + d^2 + y^2 = \frac{d^2}{a^2}x^2 + 2dx + a^2 \quad (9)$$

$$\left(\frac{d^2}{a^2} - 1\right)x^2 - y^2 = d^2 - a^2. \quad (10)$$

Упростив, получим каноническое уравнение гиперболы, которому удовлетворяют координаты любой произвольной точки гиперболы:

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1. \quad (11)$$

Таким образом, получив каноническое уравнение гиперболы, рассмотрим его применение в рамках метода TDOA. На рисунке 2 задана система координат, учитывающая взаимное расположение наземных станций, а также ВС, относительно которых возможно применять полученное ранее каноническое уравнение гиперболы. Наземные станции располагаются на оси абсцисс, и их места установки являются фокусами гиперболы. ВС находится в произвольной точке, относящейся к гиперболе.

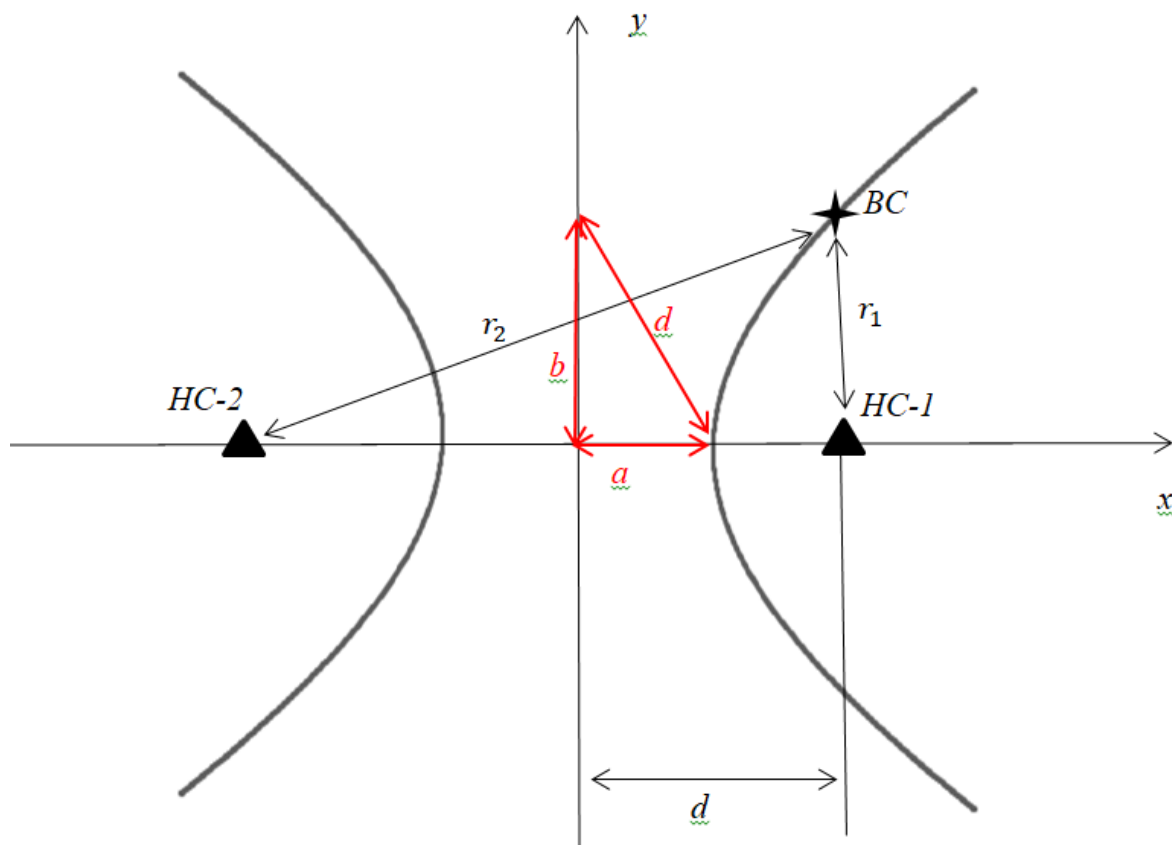


Рисунок 2 – Гипербола вероятного местоположения ВС

По определению, одним из свойств гиперболы является то, что разность расстояний от фокусов до гиперболы есть величина постоянная.

$$\Delta r = r_2 - r_1 = \text{const}, \quad (12)$$

где r_1, r_2 – расстояния от ВС до фокусов;

Δr – разность расстояний.

Далее необходимо найти коэффициенты, необходимые для построения гиперболы, используя полученное ранее каноническое уравнение гиперболы (1):

$$d = \frac{\sqrt{(x_{\text{HC2}} - x_{\text{HC1}})^2 + (y_{\text{HC2}} - y_{\text{HC1}})^2}}{2} \quad (13)$$

$$a = \frac{\Delta r}{2} \quad (14)$$

$$b = \sqrt{d^2 - a^2}, \quad (15)$$

где d – это полуфокусное расстояние;

a – расстояние от центра гиперболы до одной из вершин;

b – параметр гиперболы;

$x_{nc2}, x_{nc1}, y_{nc2}, y_{nc1}$ – координаты станций.

На основе фокального свойства гиперболы можно найти линию вероятного местоположения ВС, зная разность расстояния. Данные свойства уже используются в существующих системах, таких как многопозиционные системы наблюдения (МПЧН). В МПЧН для расчета координат ВС используется метод TDOA (Time Difference Of Arrival)². Также одно из самых известных применений гиперболы в навигации – это навигационная система Десса, введенная в эксплуатацию еще в 1944 году. Она использовалась до 1990 годов, пока не была заменена спутниковыми системами навигации.

Метод TDOA применяется в мультилатерации для определения местоположения объекта в режиме реального времени в пространстве, основываясь на информации о разности времени, которое было затрачено сигналом для прохождения расстояния от передатчика до приемников [Aeronautical Surveillance..., 2020].

Для реализации метода TDOA необходим передатчик, установленный на борту ВС, который будет формировать сигнал и с помощью антенной системы излучать его в пространство. Для приема и обработки переданного с борта ВС сигнала на земле необходимо установить станции, способные принять и обработать пришедший сигнал для получения информации о местоположении ВС. Обязательным условием, необходимым для возможности получения точной информации, является временная синхронизация всех наземных станций. В основу метода TDOA заложен принцип определения разницы во времени прихода сигнала на все наземные станции. Разница во времени прихода сигнала на разные наземные станции обуславливается различным расстоянием от источника до приемников. Таким образом, получив данные от ВС, появляется возможность точного определения координат ВС.

Используется несколько разнесенных в пространстве приёмных станций, измеряется время прихода излученного сигнала на каждую из станций, и учитывается разность времени прихода этого сигнала на каждую из станций, называемая временной задержкой.

Преимуществами данной методики являются высокая точность определения местоположения объекта и малая задержка передачи сигнала. Недостатки связаны с необходимостью временной синхронизации станций. Если не синхронизировать станции по времени, то рассчитанные значения станут неверными, и полученная информация не будет соответствовать действительности, и ее дальнейшее применение будет нецелесообразным. Согласно [Aeronautical Surveillance..., 2020], существует возможность устранить недостаток, связанный с временной синхронизацией часов путем синхронизации

² Григорьев С. В. Теоретические основы радионавигации и радиолокации. Ч.1 Методы радионавигационных определений: учебное пособие. СПб: СПбГУГА, 2018. 279 с.

времени при помощи атомных часов спутниковой навигационной системы или же выбором опорной станции, относительно которой будет происходить дальнейшая настройка всех остальных наземных станций.

Таким образом, в рамках данной работы используется метод TDOA, учитывающий разность прихода, излученного ВС сигнала на приёмные наземные станции АЗН-В.

Благодаря тому, что геодезические координаты наземных станций известны, появляется возможность получения значения разности расстояний, что, в свою очередь, даёт возможность применить математический аппарат, основывающийся на построении гиперболы.



Рисунок 3 – Метод TDOA

На рисунке 3 показано, как работает метод TDOA на аэродроме. Сигналы АЗН-В принимаются на станциях, на основе принятого сигнала строится гипербола, так как можно найти разность расстояний. В пространстве излученный сигнал распространяется со скоростью света – $c = 3 \times 10^8$ м/с. Так, при построении гиперболы учитывается время, необходимое сигналу для прохождения от ВС до наземных станций АЗН-В. Разность расстояний определяется следующим образом:

$$\Delta r = (t_1 - t_2) \times c \quad (16)$$

где c – скорость света;

t_1 и t_2 – время приема сигнала на станциях АЗН-В.

На основе полученной разницы расстояний можно найти гиперболу, подставив данную разность в формулы, полученные ранее для нахождения гиперболы. Получаем следующие формулы с учетом полученной разницы расстояний:

$$d = \frac{\sqrt{(x_{\text{НС2}} - x_{\text{НС1}})^2 + (y_{\text{НС2}} - y_{\text{НС1}})^2}}{2} \quad (13)$$

$$a = \frac{\Delta r}{2} \quad (14)$$

$$b = \sqrt{d^2 - a^2}, \quad (15)$$

где d – это полуфокусное расстояние;

a – расстояние от центра гиперболы до одной из вершин;

b – параметр гиперболы;

$x_{\text{НС2}}, x_{\text{НС1}}, y_{\text{НС2}}, y_{\text{НС1}}$ – координаты станций.

Соответственно, мы получаем линию вероятного нахождения ВС (гиперболу). И по данным, полученным с борта ВС, и гиперболой мы сможем определить достоверность сообщения. Для подтверждения достоверности данных АЗН-В необходимо установить как минимум две станции АЗН-В на аэродроме. Далее нужно использовать гиперболу, полученную с помощью метода TDOA. Зная, что в сообщении АЗН-В передаются координаты ВС, необходимо найти расстояние между гиперболой и точкой с этими координатами. Это расстояние находится по формуле:

$$r_{\min} = \min(r_k), \quad (16)$$

где r_k – расстояние между ВС и k -й точкой гиперболы.

Для возможности определения достоверности сообщения введем такое понятие, как допустимое расстояние – $r_{\text{доп}}$, которое необходимо для его дальнейшего сопоставления с полученным в ходе математического расчета расстоянием от ВС до гиперболы. Результаты сопоставления будут указывать на то, насколько точность определения местоположения будет соответствовать исходным требованиям. Значение $r_{\text{доп}}$ может быть выбрано исходя из [Сертификационные требования..., 2018]. Из этих требований следует, что погрешность не должна превышать 7,5 м (с доверительным уровнем 95%) и 12 м (с доверительным уровнем 99%) для площади аэродрома, 20 м для зоны стоянки.

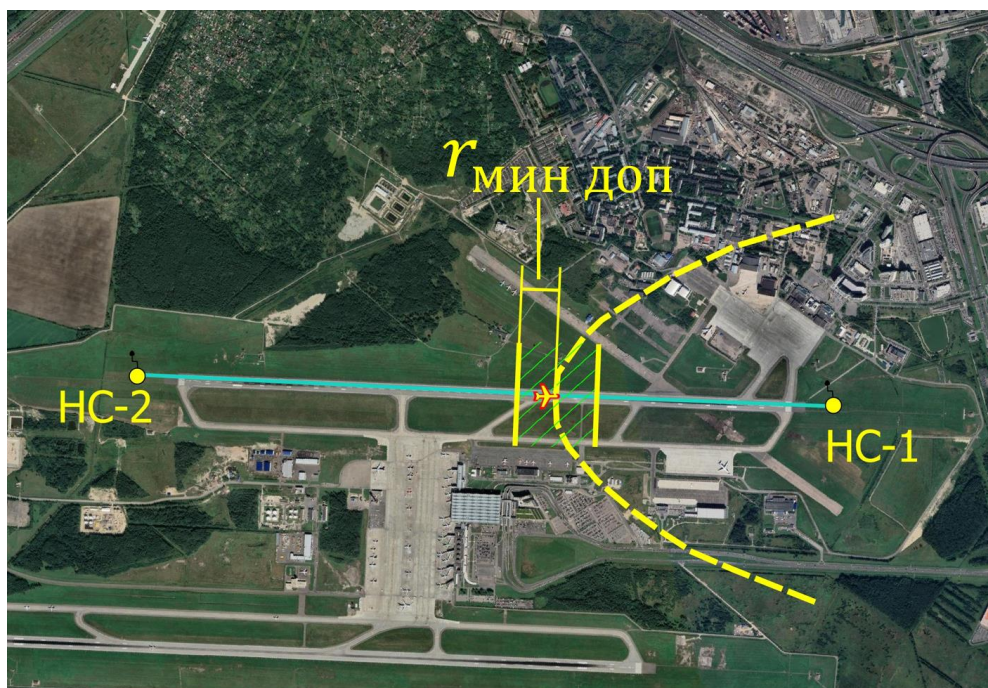


Рисунок 4 – Определение достоверности сообщения АЗН-В

На рисунке 4 представлено, как реализован метод TDOA для станций АЗН-В. Если r_{min} меньше $r_{доп}$, то сообщение достоверно. В противном случае сообщение не достоверно

Дискуссия

Вопрос подтверждения данных АЗН-В – актуальная задача, которая требует серьезного рассмотрения. Вопрос подтверждения данных АЗН-В исследуется разными учеными. Основой исследования являются методы и принципы подтверждения достоверности сообщений АЗН-В на аэродроме. В данной статье предложено использование метода TDOA для подтверждения достоверности сообщений АЗН-В на аэродроме.

Вопрос с подтверждением данных АЗН-В изучался в работах [Григорьев и др., 2016; Калинин и др., 2021; Косьянчук и др., 2019; Плясовских 2022; Плясовских и др., 2019; Плясовских и др., 2020; A Study..., 2013; Hammad et al., 2023], в результате были предложены методы и методики подтверждения данных АЗН-В для полетов на эшелоне, в районе аэродрома.

На данный момент в Российской Федерации не рекомендуется использовать АЗН-В в качестве единственного средства наблюдения из-за невозможности идентифицировать данные, полученные от ВС. В свою очередь, международные документы ИКАО говорят об обратном, что АЗН-В нужно использовать из-за своих преимуществ.

Использование метода TDOA для подтверждения достоверности сообщений радиовещательного автоматического зависящего наблюдения предоставляет возможность применения АЗН-В на аэродромах средней и малой интенсивности. Данный метод, рассмотренный в статье, отличается от аналогов тем, что измеряется разность расстояний, позволяющая подтвердить и

идентифицировать сообщения. С практической точки зрения технология использования метода TDOA позволит использовать станции АЗН-В в качестве единственного средства наблюдения на аэродромах низкой и средней интенсивности, что уменьшит стоимость наблюдения и увеличит кибербезопасность и саму безопасность полетов.

Также одним из преимуществ АЗН-В является возможность использования усовершенствованной системы контроля и наблюдения, что в свою очередь влияет на ситуационную осведомленность пилотов и диспетчера, тем самым повышая безопасность полетов.

Результаты

В ходе проведенного исследования предложен метод подтверждения достоверности сообщений АЗН-В, который позволяет повысить безопасность полетов на аэродроме. Предложена возможность использования станций АЗН-В как самостоятельного средства наблюдения на аэродроме.

Также данный метод можно использовать для обнаружения спуфинга, тем самым повысив кибербезопасность авиационной системы.

Данный метод позволяет использовать станции АЗН-В на аэродромах малой и средней интенсивности, уменьшая экономическую составляющую организации наблюдения.

Заключение

В статье предложен метод подтверждения достоверности сообщений АЗН-В на аэродроме. Данный метод позволит идентифицировать сообщение от ВС и обнаружить ложные сообщения, тем самым повысить уровень кибербезопасности и безопасности полетов в целом. Также данный метод дает возможность использовать станции АЗН-В без использования дополнительного оборудования, такого как МПСН или ВРЛ, тем самым обеспечив возможность использовать станции АЗН-В как единственное средство наблюдения на аэродроме.

Библиографический список

- Григорьев И. Д.* Анализ уязвимостей АЗН-В на базе 1090 Extended Squitter / И. Д. Григорьев, В. Г. Орлов / Материалы Международной научно-технической конференции "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения" INTER-MATIC-2016. 2016. Т. 16, № 5. С. 171–174. EDN YSZETJ.
- Калинцев А. С.* Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования / А. С. Калинцев, Е. А. Рубцов, А. П. Плясовских // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 7. С. 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49.
- Княжский А. Ю.* Комплексы средств автоматизации наблюдения и контроля аэродромного движения и управления воздушным движением на основе АЗН-В / А. Ю. Княжский, А. П. Плясовских, Е. С. Щербаков // Crede Experto: транспорт, общество, образование, язык. 2019. № 3. С. 53-62. EDN HOXDWP.
- Косьянчук В. В.* Обзор основных путей повышения безопасности системы АЗН-В / В. В. Косьянчук, Н. И. Сельвесюк, Р. Р. Хамматов // Научный вестник Московского

государственного технического университета гражданской авиации. 2019. Т. 22. № 1. С. 39-50. DOI 10.26467/2079-0619-2019-22-1-39-50.

Плясовских А. П. Закон абберрации и его приложения в навигации и управлении воздушным движением. М.: Знание-М, 2022. 70 с. EDN IEMXKB.

Плясовских А. П. Метод оценки достоверности информации АЗН-В в системе наблюдения и контроля аэродромного движения / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 90-102. EDN SMYDUH.

Плясовских А. П. Теоретическое обоснование подтверждения достоверности информации о местоположении объекта на рабочей площади аэродрома / А. П. Плясовских, Е. А. Рубцов // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 3. С. 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40. EDN JWKVQM.

Сертификационные требования (Базис) к многопозиционным системам наблюдения аэродромным [согл. письмом Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации №08-04/5228-ИС от 15 марта 2018 г.]. 2018. 7 с.

Сравнение пропускной способности систем автоматического зависимого наблюдения вещания / А. Мирошниченко, И. Татарчук, Э. Фальков, С. Шаврин // Первая миля. 2020. № 3(88). С. 24-29. DOI 10.22184/2070-8963.2020.88.3.24.29. EDN COHGEE.

Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. Doc 9830 AN/452/ ICAO, 2004. 89 p.

A Study of ADS-B Data Evaluation and Related Problems / B. S. Ali, W. Schuster, W. Ochien, A. K. Majumdar, T. Chiew // Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation. San Diego, California: 2013, pp. 444-455.

Global air navigation plan 2016–2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

Hammad A. Kh. Securing ADS-B Communications through a Novel Authentication Framework / A. Kh. Hammad, Kh. Haibat, G. Salman // IEEE Journal On Selected Areas In Communications. 2023. Vol. XX, № X. Available at: https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Securing_ADS-B_Communications_through_a_Novel_Authentication_Framework/24043494 DOI 10.36227/techrxiv.24043494.v1 (accessed 10 November 2023).

Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.

References

Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. Doc 9830 AN/452/ ICAO, 2004. 89 p.

Ali B. S., Schuster W., Ochien W., Majumdar A. K., Chiew T. (2013). A Study of ADS-B Data Evaluation and Related Problems. *Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*. San Diego, California. 444-455.

Global air navigation plan 2016–2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.

Grigoriev I. D., Orlov V. G. (2016). Vulnerability analysis of AZN-B based on 1090 Extended Squitter. *Fundamental Problems of Radioelectronic Instrumentation*. 16(5): 171-174. (in Russian)

Hammad A. Kh., Haibat Kh., Salman G. (2023). Securing ADS-B Communications through a Novel Authentication Framework. *IEEE Journal On Selected Areas In Communications*. XX(X). Available at: https://www.techrxiv.org/articles/preprint/Securing_ADS-B_Communications_through_a_Novel_Authentication_Framework/24043494 (accessed 10 November 2023).

Kalintsev A. S., Rubtsov E. A., Plyasovskih A. P. (2021). Confirmation of ADS-B data in the aerodrome traffic zone by gating method. *T-Comm*. 15(7): 39-49. DOI 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49. (in Russian)

Knyazhskiy A. Yu., Plyasovskikh A. P., Scherbakov E. S. (2019). Complexes of automation means of observation and control of airfield traffic and air traffic control on the basis of AZN-B. Crede Experto: transportation, society, education, language. 3: 53-62. (in Russian)

Kosianchuk V. V., Selvesiuk N. I., Khammatov R. R. (2019). An overview of the main ways to improve the ADS-B system security. Civil Aviation High Technologies. 22(1): 39-50. (in Russian).

Minimum operational performance standards for 1090 MHz extended squitter automatic dependent surveillance – broadcast (ADS-B) and traffic information services – broadcast (TIS-B). RTCA DO-260B, 2009. 1410 p.

Miroshnichenko A., Tatarchuk I., Falkov E., Shavrin S. (2020). Comparison of throughput capacity of automatic dependent surveillance broadcasting systems. First Mile. 3(88): 24-29. DOI:10.22184/2070-8963.2020.88.3.24.29. (in Russian)

Plyasovskikh A. P. (2022). Law of aberration and its applications in navigation and air traffic control. Moscow: Znanie-M, 2022. 70 c. (in Russian)

Plyasovskikh A. P., Rubtsov E. A. (2019). Reliability estimation method of ADS-B information for surface movement guidance and control system. Vestnik Saint Petersburg State University of Civil Aviation. 3(24): 90-102. (in Russian)

Plyasovskikh A. P., Rubtsov E. A. (2020). Theoretical substantiation of confirmation of the validity of information about the location of the object on the work area of the aerodrome. T-Comm. 14(3): 32-40. DOI 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40. (in Russian)

Certification requirements (Basis) for multi-position airfield surveillance systems [according to the letter of the Department of Development Programs of the Ministry of Transport of the Russian Federation No. 08-04/5228-IS of 15 March 2018]. 2018. 7 c. (in Russian)

Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2020. 372 p.