ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОДТВЕРЖДЕНИЯ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ О МЕСТОПОЛОЖЕНИИ ОБЪЕКТА НА РАБОЧЕЙ ПЛОЩАДИ АЭРОДРОМА

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40

Плясовских Александр Петрович,
АО "ВНИИРА", г. Санкт-Петербург, Россия,
vniira@yandex.ru

Рубцов Евгений Андреевич,
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, г. Санкт-Петербург, Россия,
rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Ключевые слова: автоматическое зависимое наблюдение; АЗН-В, достоверность информации наблюдения, погрешность определения координат; рабочая площадь аэродрома, воздушное судно, транспортное средство

Поставлена задача оценить достоверность информации о местоположении воздушных судов и транспортных средств на рабочей площади аэродрома, полученной от наземной станции автоматического зависимого наблюдения, как наиболее дешевого средства наблюдения. Достоверность оценивается с заданной надежностью β . Предложен критерий оценки достоверности информации; суть его состоит в определении доверительного интервала оценки местоположения объекта I_β , при выполнении двух условий: доверительный интервал должен быть меньше оценки математического ожидания местоположения объекта $\tilde{m}$, полученной от средств наблюдения, а также меньше граничного значения точности подтверждения достоверности информации σ_r . Предлагаются различные способы определения точности. Она может быть получена из нормативных требований (например, из Базиса многопозиционной системы наблюдения аэродромной), либо рассчитана. Проведено моделирование движения объекта по рабочей площади аэродрома, при этом принималось, что объект движется прямолинейно, с постоянной скоростью и нулевым отклонением от заданной траектории. Для средства наблюдения задавались различные значения погрешностей: математическое ожидание от 0,5 до 1,5 м и средняя квадратическая ошибка определения координат от 3 до 15 м. Рассчитано требуемое число измерений для определения величины ошибки измерения координат объекта. Показано, что применение критерия позволяет, задавая требуемое количество измерений для анализа (которое зависит от надежности β и точности подтверждения достоверности σ_r), оценить достоверность координатной информации, получаемой от наземной станции автоматического зависимого наблюдения, то есть решить, можно ли ее применять как основное или единственное средство наблюдения за воздушными судами и транспортными средствами на рабочей площади аэродрома.

Информация об авторах:

Плясовских Александр Петрович, д.т.н., главный конструктор научно-технического центра "Организация воздушного движения" АО "Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры", Санкт-Петербург, Россия
Рубцов Евгений Андреевич, к.т.н., доцент кафедры "Радиоэлектронные системы", ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации", Санкт-Петербург, Россия

Для цитирования:

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

For citation:

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*, vol. 14, no.3, pp. 32-40. (in Russian)

Введение

Разработанный ИКАО «Глобальный план обеспечения безопасности полетов 2020-2022» (Doc. 10004) определяет события повышенного риска, к которым в частности относятся выезд за пределы взлетно-посадочной полосы (RE) и несанкционированный выезд на взлетно-посадочную полосу (RI). В документе подчеркивается необходимость наличия надлежащей инфраструктуры для обеспечения безопасности полетов [1].

Выездом за пределы взлетно-посадочной полосы (ВПП) принято называть выкатывание воздушного судна (ВС) за боковую кромку или за пределы ВПП. Инцидент происходит на этапе взлета или посадки. Выезд может быть преднамеренным или непреднамеренным. Преднамеренное выкатывание за боковую кромку ВПП может выполняться, чтобы избежать столкновения с воздушным судном, совершившим несанкционированный выезд на ВПП. Результат выезда за пределы ВПП (например, количество пострадавших) основывается на ряде факторов: скорости приземления или выкатывания ВС за конец ВПП, загрязнение ВПП, характеристики концевой зоны безопасности на аэродроме, интенсивности наземного движения [1].

Несанкционированный выезд на ВПП – это событие на аэродроме, в результате которого в защищенной зоне, предназначенной для посадки и взлета воздушных судов, несанкционировано находится воздушное судно, транспортное средство (ТС) или человек. Несанкционированные выезды особенно опасны для ВС, находящихся на данной ВПП, так как в этот момент они, как правило, двигаются с большой скоростью. Столкновения за пределами ВПП (например, на рулежной дорожке или на перроне) менее опасны, так как ВС и ТС движутся при этом относительно медленно. Несанкционированные выезды на ВПП включают много сопутствующих факторов, таких как: схема аэродрома; рабочая нагрузка пилота и диспетчера, использование нестандартной фразеологии, наличие или отсутствие средств наблюдения за объектами на рабочей площади аэродрома [1].

Проведенный Фондом безопасности полетов обзор всех авиационных происшествий с воздушными судами (ВС), произошедшими с 1995 по 2008 гг., показывает, что из общего числа происшествий (1429) 431 происшествие (30%) приходилось на выезды за пределы ВПП (RE – Runway Excursion) и несанкционированные выезды на ВПП (RI – Runway Incursion). Оба вида происшествий привели к гибели людей: на происшествия RE приходится больше. Из 431 происшествия 417 происшествий (97%) являлись RE, а остальные 14 (3%) – RI. 41 происшествие (10%) со смертельным исходом повлекло в общей сложности гибель 973 человек. Из 41 происшествия со смертельным исходом 34 происшествия (83%) являлись RE, а остальные 7 происшествий (17%) – RI. Из 973 человеческих жертв 712 (73%) были связаны с RE, а 261 (27%) – с RI [2].

Согласно Глобальному плану обеспечения безопасности на ВПП в период с 2008 по 2016 гг. произошло 1124 происшествия, из них 395 относятся к серьезным инцидентам, при этом 44 происшествия привели к человеческим жертвам. На долю RE приходится 382 происшествия (из них 140 – серьезные инциденты), на долю RI – 80 происшествий (из них 73 – серьезные инциденты). При этом стоит учитывать факт

наличия большого количества потенциальных (предотвращенных) несанкционированных выездов на ВПП. Количество отчетов об этих событиях варьируется в зависимости от года от 270 до 455, что соответствует 20...47 событиям на каждые 1000 рейсов [3].

В России инциденты на ВПП также являются серьезной проблемой. Одна из наиболее значимых катастроф произошла 20.10.2014 в аэропорту Внуково с самолетом Falcon 50EX F-GLSA авиакомпания «Unijet» (Франция). Частный самолет Кристофа де Маржери, исполнительного директора компании Total, столкнулся со снегоуборочной машиной. Все четыре человека, находившиеся на борту погибли [4].

Согласно выпущенной Росавиацией 17.02.2017 «Информации по безопасности полетов № 2» в 2016 г. с гражданскими воздушными судами произошло 8 инцидентов, связанных с несанкционированным занятием ВПП воздушными судами или автотранспортом, которые были обусловлены такими факторами опасности, как [5]:

1) Отсутствие эффективного взаимодействия между подразделениями (орган ОВД, оператор аэродрома) гражданской и государственной авиации на аэродроме (инциденты с самолетами CRJ-200 VQ-BNL 13.05.2016 в аэропорту Петрозаводск (Бесовец), Як-40 RA-88188 05.07.2016 в аэропорту Псков).

2) Упущения при планировании мероприятий по предотвращению несанкционированных выездов на ВПП при изменениях в инфраструктуре (проведении ремонтных работ) на летном поле; формальная работа группы по безопасности на ВПП; неэффективность СУБП оператора аэродрома (инцидент с самолетом Л-410УВП-Э20 RA-67030 07.04.2016 в аэропорту Самара (Курумоч)).

3) Незнание водителем транспортного средства знаков и маркировки, предупреждающих о выезде на ВПП; недостаточная информативность знаков и/или маркировки (инцидент с самолетом А-320 VQ-BIR 16.03.2016 в аэропорту Шереметьево).

4) Несоблюдение водителем спец автомобиля правил проведения работ на летном поле (инцидент с самолетом Боинг-737-800 VP-BRF 01.02.2016 в аэропорту Самара (Курумоч)).

5) Невнимательность экипажа воздушного судна при ведении радиообмена с диспетчером (инцидент с самолетом Як-42Д RA-42421 07.03.2016 в аэропорту Омск (Центральный)).

С учетом результатов расследований инцидентов, связанных с несанкционированным занятием ВПП, требований нормативных правовых актов Российской Федерации и рекомендаций ИКАО, Росавиацией разработаны «Мероприятия по предотвращению несанкционированных выездов на ВПП» [6].

Для предотвращения несанкционированных выездов на ВПП рекомендуется развивать процедуры УВД, а также усовершенствованные системы управления наземным движением и контроля (A-SMGCS) [2]. Для уменьшения рисков выезда за пределы ВПП рекомендуется повышать ситуативную осведомленность летных экипажей, однако немаловажно обеспечивать возможность оперативного контроля за движением ВС со стороны диспетчера с помощью A-SMGCS для принятия экстренных мер. Данные системы позволяют в режиме реального времени обнаруживать и идентифициро-

вать наземные объекты на рабочей площади аэродрома, а описанные мероприятия должны стать частью программы по предотвращению инцидентов на ВПП [7].

Существующие системы контроля и управления наземным движением А-SMGCS и ASDE-X [8-10] используют данные получаемые от различных источников, основными из которых являются: радиолокационные станции обзора летного поля (РЛС ОЛП), многопозиционные системы наблюдения (МПСН), станции автоматического зависящего наблюдения (АЗН-В) и другие датчики. Стоимость РЛС ОЛП составляет 30÷35 млн. руб., (стоимость РЛС ОЛП «Атлантика») [11, 12]. Для аэродрома требуется как минимум две радиолокационные позиции, стоимость оснащения аэродрома составит 60÷70 млн. руб. без учета расходов на установку, настройку и программное обеспечение комплекса средств автоматизации. Стоимость МПСН как правило превышает 100 млн. руб. (стоимость МПСН «Альманах», аэропорта «Пулково» составляет порядка 130 млн. руб.) [13]. Стоимость одноканальной станции АЗН-В 10-15 млн. руб., (стоимость станции АЗН-В «НС-1А» составляет 13 млн. руб.) [14]. Для одного аэродрома в зависимости от конфигурации ВПП, РД и расположения зданий требуется от одной до трех станций, стоимость оснащения аэродрома составит 15÷40 млн. руб. Таким образом, внедрение АЗН-В является наиболее оправданным с экономической точки зрения. При этом стоит помнить, что в Руководстве по авиационному наблюдению ИКАО рекомендуется верифицировать информацию, полученную от станции АЗН-В с помощью радиолокатора или МПСН [15]. Применять АЗН-В как единственное средство наблюдения не рекомендуется по причине отсутствия методов оценки достоверности информации. Проблемы, связанные с точностью и достоверностью данных АЗН-В достаточно полно описаны [16-21], поэтому возникает потребность в разработке методики оценки достоверности получаемой информации без применения РЛС ОЛП или МПСН.

Оценка требований к средствам наблюдения за наземным движением на аэродроме

Требования к РЛС ОЛП изложены во втором томе Авиационных правилах АП-170, где отмечено, что радиолокатор должен с периодом не более 1 с на удалении 90-5000 м обнаруживать и определять координаты объекта с эффективной отражающей поверхностью не менее 1 м² с вероятностью не хуже 0,9 при вероятности ложных тревог по собственным шумам приемника не более 10⁻⁶. При этом должна обеспечиваться ошибка измерения координат (СКП) не более 10 м по дальности и 0,2° по азимуту при разрешающей способности 15 м [22].

Требования к аэродромной МПСН изложены в Сертификационных требованиях (Базис), где указано, что погрешность определения местоположения ВС не должна превышать [23]:

– 7,5 м (с доверительным уровнем 95%) и 12 м (с доверительным уровнем 99%) для площади маневрирования аэродрома;

– 2 м (средняя точность за период 5 с) для зоны стоянки.

Период обновления информации должен составлять 1 с при вероятности обнаружения 0,5 в зоне стоянки, 0,7 в зоне перрона и 0,95 для площади маневрирования. При этом

вероятность обнаружения должна быть больше 99,9% в течение интервала 2 с на ВПП и РД, а также 99,9% в течение интервала 5 с на стоянках и перроне. Вероятность ложного обнаружения (в том числе дробления цели) не должна превышать 0,01% [23].

Следует отметить, что в соответствии с Руководством по А-SMGCS рекомендуется, чтобы продольная точность измерения координат составляла 6 м. Требуемая боковая точность определения местоположения основывается на положениях ИКАО, предусматривающих, чтобы минимальное расстояние между ВС на месте стоянки и любым примыкающим зданием, ВС на другом месте стоянки и другими объектами составляло 3 м [24].

Требования к наземным станциям АЗН-В, изложенные в Сертификационных требованиях (Базис) содержат требования к формату сообщения (состав и содержание подполей) на соответствие стандарту RTCA DO-260B [25]. Для наземной станции регламентируется готовность, которая должна быть не менее 0,9999, а также частота необнаруженных декодером ошибок, которая не должна превышать 1 на 10⁵ принятых сообщений в условиях асинхронных помех [26]. Методические рекомендации по летным проверкам позволяют определить возможность использования АЗН-В для управления воздушным движением. При этом оценивается зона действия и правильность информации сообщений, передаваемых с борта ВС: соответствие расстановки и значений битов в коде информации сообщений о категории эмиттера, идентификаторе эмиттера, широты, долготы, высоты, опознавательного индекса ВС и показателя качества [27].

Для обоснования требований к точности средств наблюдения за наземным движением на аэродроме можно использовать величину допустимого отклонения ВС (ТС) от оси ВПП или РД.

Для расчета допустимого отклонения ВС (ТС) от оси ВПП или РД можно рассмотреть следующий способ. Пусть выход за пределы ВПП или РД является редким событием, происходящим с вероятностью 10⁻⁷...10⁻⁸. Найдем допустимую среднюю квадратическую погрешность (СКП) отклонения от осевой при которой будет обеспечиваться данная вероятность [28].

Ширина ВПП для аэродромов классов А, Б и В составляет 60, 45 и 42 м соответственно. Ширина РД для ВС индексов 4, 5 и 6 (с размахом крыла 32-65 м и колесной шасси по авиашинам 9-14 м) составляет 17, 19 и 22,5 м, а если учесть укрепленные обочины, то ширина РД с покрытием достигает 27, 29 и 40,5 м соответственно [29, 30]. Выезд шасси на обочину не приводит к его повреждению, однако считается ошибкой экипажа. Для дальнейших расчетов будем использовать значения ширины РД как без обочин, так и с обочинами, принимая, что ВС не выезжает более чем на половину обочины.

Примем, что отклонения ВС (ТС) от осевой линии ВПП или РД распределены по нормальному закону. Тогда, предельно допустимую среднюю квадратическую погрешность (СКП) отклонения можно определить, как [28]:

$$\sigma_{z\text{ доп}} = \frac{b}{\Phi^{-1}(P)}, \quad (1)$$

где b – ширина ВПП или РД; P – требуемая вероятность нахождения ВС в пределах ВПП или РД; $\Phi^{-1}(P)$ – функция, обратная функции Лапласа.

Задавая вероятность выкатывания ВС (ТС) за пределы ВПП или РД 10^{-7} и 10^{-8} , получим: $\Phi^{-1}(10^{-7}) = 5,3267$ и $\Phi^{-1}(10^{-8}) = 5,7307$. Зависимость величины СКП от ширины ВПП или РД представим в виде графика (рис. 1), где зеленым цветом представлены значения для РД без учета обочин, синим – для РД с учетом обочин, красным – для ВПП, сплошной линией – для вероятности выкатывания 10^{-7} , пунктирной линией – для вероятности выкатывания 10^{-8} .

Рис. 1. Зависимость величины СКП от ширины ВПП или РД для вероятностей выкатывания ВС (ТС) за пределы ВПП или РД 10^{-7} и 10^{-8}

Для дальнейших оценок необходимо выбрать некоторое среднее значение допустимой СКП отклонения ВС от оси ВПП или РД. Исходя из данных рис.1 примем это значение 8 м для ВПП, 3,5 м для РД без учета обочин и 4,5 м для РД с учетом обочин. Также необходимо учесть существующие требования к точности средств наблюдения. Согласно рекомендациям ИКАО, изложенным в циркуляре № 326, установленные требования должны обеспечиваться любым средством наблюдения [31]. Таким образом, система АЗН-В должна обеспечивать такую же точность, что и МПСН-А, то есть, согласно Сертификационным требованиям (Базис) иметь СКП 3,8 м.

Методика определения критерия оценки достоверности информации о местоположении воздушных судов и транспортных средств на рабочей площадке аэродрома

Объектом исследования будет воздушное судно или транспортное средство, перемещающееся по рабочей площадке аэродрома, которая включает площадь маневрирования, перрон, взлетно-посадочную полосу, рулежные дорожки и места стоянки ВС [32]. Движение объекта примем прямолинейным, с постоянной скоростью. При движении по ВПП или РД объект движется точно по осевой линии, которую обозначим как ось x .

Пусть местоположение объекта A на оси x точно известно. Ошибка определения местоположения объекта с помощью информации о его местоположении – это случайная величина X , причем нам известно n информационных данных (измерений) о местоположении $X_1, X_2, \dots, X_n$.

Задача состоит в том, чтобы оценить достоверность информации о местоположении объекта с заданной надежностью β . Надежность выбирается достаточно большой, например, 0,9; 0,95; 0,99 или 0,999 так чтобы вывод о достоверности информации (или о ее недостоверности) был практически достоверным событием, а ошибка вывода о достоверности информации была практически невозможной.

Найдем доверительный интервал I_β оценки местоположения, который по определению составляет [33]:

$$I_\beta = (\tilde{m} - \varepsilon; \tilde{m} + \varepsilon), \quad (2)$$

где $\tilde{m}$ – оценка математического ожидания местоположения объекта, полученная от средств наблюдения; ε – точность подтверждения достоверности информации.

Если ошибка определения местоположения объекта распределена по нормальному закону, то

$$\varepsilon = t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}},$$

и доверительный интервал I_β рассчитывается как [33]:

$$I_\beta = \left(\tilde{m} - t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}; \tilde{m} + t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} \right), \quad (3)$$

где t_β – величина, определяемая из выражения [33]:

$$2 \int_0^\beta S_{n-1}(t) dt = \beta, \quad (4)$$

$\tilde{D}$ – оценка дисперсии определения местоположения объекта.

В приведенном выражении $S_{n-1}(t)$ – плотность распределения Стюдента с $n - 1$ степенями свободы [34]:

$$S_{n-1} = \frac{\Gamma\left(\frac{n}{2}\right)}{\sqrt{(n-1)\pi} \cdot \Gamma\left(\frac{n-1}{2}\right)} + \left(1 + \frac{t^2}{n-1}\right)^{-\frac{n}{2}}, \quad (5)$$

где $\Gamma(x)$ – гамма-функция [33]:

$$\Gamma(x) = \int_0^\infty u^{x-1} e^{-u} du. \quad (6)$$

В таблице 1 приведены значения величины t_β для различных значений надежности β при количестве измерений 5, 10, 15 и 20.

Так, из выражения (3) при $n = 10$ и надежности определения достоверности информации $\beta = 0,99$ интервал I_β равен:

$$I_\beta = \left(\tilde{m} - 3,25 \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}; \tilde{m} + 3,25 \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} \right). \quad (7)$$

Таблица 1

Величина t_β для различных значений надежности β

Количество измерений n	Величина t_β для надежности $\beta = 0,9$	Величина t_β для надежности $\beta = 0,95$	Величина t_β для надежности $\beta = 0,99$	Величина t_β для надежности $\beta = 0,999$
5	2,13	2,776	4,604	8,610
10	1,8	2,262	3,250	4,781
15	1,7	2,145	2,977	4,140
20	1,7	2,093	2,861	3,883

Для этого примера критерий достоверности информации можно выразить как:

$$|x_A - \tilde{m}| < 3,25 \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (8)$$

где x_A – местоположение объекта A на оси x .

Если, например, оценка СКП определения местоположения объекта равна 10 м, то $\tilde{D} = 100$ и критерий достоверности информации выглядит следующим образом:

$$|x_A - \tilde{m}| < 3,25 \sqrt{\frac{100}{10}} = 10,28 \text{ м.} \quad (9)$$

Таким образом, для данного примера, если при десяти измерениях координат объекта оценка математического ожидания его местоположения отличается от реальной позиции менее чем на 10,28 м, значит с надежностью 0,99 информация о местоположении объекта достоверна.

В общем виде критерий достоверности информации о местоположении объекта при наличии его точно известной позиции можно записать как:

$$|x_A - \tilde{m}| < t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (10)$$

Таким образом, достоверность информации о местоположении объекта определяется:

1. Систематической ошибкой информации о местоположении объекта (чем больше систематическая ошибка, тем больше модуль разности $|x_A - \tilde{m}|$;

2. Значением оценки дисперсии информации о местоположении объекта $\tilde{D}$;

3. Числом информационных данных (измерений) о местоположении объекта n .

Заметим здесь, выражение (10) можно использовать при $n \geq 2$, то есть при наличии хотя бы двух измерений, полученных с помощью информации, достоверность которой оценивается. При $n = 1$ достоверность информации о местоположении объекта оценить невозможно за исключением случая, когда априори известна дисперсия D ошибки информации о местоположении.

Оценим достоверность информации при $n = 2$. Можно найти, что в этом случае при $\beta = 0,99$ $t_\beta = 63,657$. Если СКП определения местоположения, как и в рассмотренном выше случае, равна 10 м, то точность подтверждения достоверности информации согласно (10) будет равна 450,43 м.

Это выражение говорит о том, что информация о местоположении объекта достоверна с надежностью 0,99, если оценка математического ожидания местоположения отличается от его точной позиции менее чем на 450,43 м. Таким образом, при числе измерений $n = 10$ точность информации о местоположении объекта более чем в 40 раз меньше, чем при $n = 2$. И в том и в другом случае достоверность информации подтверждается с надежностью 0,99, однако при $n = 10$ точность оценки достоверности информации намного больше.

При решении таких задач, как подтверждение незанятости ВПП для заходящего на посадку ВС, точность 10,28 м может оказаться недостаточно, не говоря уже о точности 450,43 м.

Эти соображения наглядно показывают, что при подтверждении информации о местоположении необходимо задаваться не только надежностью β подтверждения достоверности информации, но и точностью ε .

Какую точность подтверждения достоверности информации нужно выбирать для практических целей?

Исходя из практической целесообразности использования информации, достоверность которой оценивается, точность подтверждения достоверности информации должна соответствовать требуемой точности самой информации. Тогда, критерий (10) должен быть дополнен условием:

$$t_\beta \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}} \leq \varepsilon_{\text{гр}}, \quad (11)$$

где $\varepsilon_{\text{гр}}$ – граничное значение точности подтверждения достоверности информации (выбирается из принципа практической целесообразности применения информации).

Точность подтверждения достоверности информации наблюдения о местоположении ВС (ТС) на аэродроме может быть выбрана, например, исходя из условия:

$$\varepsilon_{\text{гр}} \leq 2\sigma^*, \quad (12)$$

где σ^* –требуемая СКП измерения координат объекта.

Понятно, что точность $\varepsilon_{\text{гр}}$ может быть выбрана равной $2\sigma^*$; σ^* ; $0,5\sigma^*$; $0,25\sigma^*$ и т. д., в зависимости от целей подтверждения достоверности информации. Так, например, если для целей сертификации система автоматизации наблюдения и контроля аэродромного движения может иметь $\varepsilon_{\text{гр}}$ равной $0,25\sigma^*$, а в процессе эксплуатации – $1\sigma^*$ или $2\sigma^*$.

Для практических целей значение $\varepsilon_{\text{гр}}$ необходимо выбирать, ища компромисс между желаемым уменьшением точности подтверждения достоверности информации и числом измерений n . Из (11) можно получить:

$$n \geq \tilde{D} \left(\frac{t_\beta}{\varepsilon_{\text{гр}}} \right)^2. \quad (13)$$

Из выражения (13) видно, что число потребных для подтверждения информационных данных обратно пропорционально величине $\varepsilon_{\text{гр}}$ в квадрате. То есть для того, чтобы уменьшить точность подтверждения достоверности информации в два раза, необходимо увеличить число наблюдений в четыре раза.

Оценим потребное число наблюдаемых данных о местоположении ВС (ТС) на аэродроме, если требуемая СКП измерения координат $\sigma^* = 10$ м. Тогда $\tilde{D} = 100$ и из выражения (13) имеем:

$$n \geq 100 \left(\frac{t_\beta}{\varepsilon_{\text{гр}}} \right)^2. \quad (14)$$

Величина t_β зависит от n , и один из способов найти значение n , удовлетворяющее условию (14) – это последовательный перебор от $n = 1$ с шагом 1, вычисление t_β и проверка выполнения условия (14) на каждом шаге до тех пор, пока это условие не будет выполняться.

Оценим потребное количество измерений для обеспечения надежности 0,99 при интервале $\varepsilon_{\text{гр}}$, равном 20; 10; 5; 2,5 м, что соответствует $2\sigma^*$; σ^* ; $0,5\sigma^*$; $0,25\sigma^*$ (табл. 2).

Таблица 2

Требуемое количество измерений n для обеспечения заданного интервала $\varepsilon_{\text{гр}}$, при различных значениях надежности β

Надежность β	Интервал $\varepsilon_{\text{гр}}$			
	20 м	10 м	5 м	2,5 м
0,9	3	5	13	46
0,95	4	7	18	64
0,99	6	11	31	110
0,999	8	17	50	180

Анализ табл. 5 показывает, что при надежности $\beta = 0,99$ и интервале $\varepsilon_{\text{гр}} = \sigma^* = 10$ м число измерений n должно не меньше чем 11. Соответственно, при $\varepsilon_{\text{гр}} = 0,25\sigma^* = 2,5$ м требуемое число измерений n возрастает до 110.

На практике далеко не всегда имеется возможность получить такое большое число наблюдений в стационарных условиях. Для целей подтверждения достоверности информации АЗН-В с тем, чтобы использовать эту информацию для наблюдения и контроля движения ВС и ТС необходимо сделать вывод о достоверности или недостоверности информации не более чем за 5–15 с. При частоте обновления информации 1 раз в секунду для анализа будет доступно не более $n = 5 \div 15$ данных наблюдения за одним ВС или ТС. Для такого количества измерений координат объекта при надежности $\beta = 0,99$ можно получить точность подтверждения достоверности информации наблюдения $\varepsilon_{гр}$ порядка $0,8 \div 2\sigma^*$, что вполне приемлемо для практики.

Таким образом, оценка достоверности информации о местоположении объекта с известной координатой на оси x с надежностью β и точностью $\varepsilon_{гр}$ заключается в сравнении модуля отклонения траектории объекта от номинальной траектории (оси ВПП или РД) с граничным значением точности $\varepsilon_{гр}$ при выполнении условия (11).

В математической форме критерий достоверности информации выглядит так:

$$|x_A - \tilde{m}| < \varepsilon_{гр} \quad (15)$$

Дополнительными условиями являются выражения (11) и (13). Если основное (15) и дополнительное (13) условия выполняются, то информация является достоверной с надежностью β и точностью $\varepsilon_{гр}$. Если выполняется дополнительное условие (13), но не выполняется условие (15), то информация о местоположении объекта является недостоверной. Если же дополнительное условие (13) не выполняется, то сделать надежные выводы о достоверности информации невозможно. В этом случае необходимо либо проверить получаемую информацию с помощью альтернативного средства наблюдения, либо запретить применять АЗН-В из-за недостаточной достоверности данных измерений.

Анализ критерия оценки достоверности информации о местоположении воздушных судов и транспортных средств на рабочей площади аэродрома

Для анализа разработанного критерия оценки достоверности информации о местоположении ВС (ТС) на рабочей площади аэродрома проведем ряд модельных экспериментов. Пусть ВС (ТС) перемещаются по ВПП или РД прямолинейно с постоянной скоростью. Примем скорость перемещения по ВПП 20 м/с, а скорость перемещения по РД – 10 м/с для прямолинейного участка и 5 м/с для участка съезда с ВПП.

Анализ схем и данных международных аэродромов, а также аэродромов класса А, Б и В показал, что длина ВПП $L_{ВПП}$ как правило составляет от 2000 до 4000 м, длина прямолинейных участков РД $L_{РД}$ – от 500 до 1200 м, а длина участков съезда с ВПП $L_{съезд}$ – от 150 до 300 м [35, 36].

Для проведения расчетов примем $L_{ВПП} = 3000$ м, $L_{РД} = 800$ м, $L_{съезд} = 200$ м. Исходя из скорости объекта можно сказать, что при движении по ВПП количество измерений n не превысит 150, при движении по РД – 80, а при движении по участку съезда с ВПП – 40. Следует учесть, что ВС (ТС) не перемещается по всей длине ВПП, а также то, что часть измерений АЗН-В могут быть искажены помехами или потерями.

Поэтому, примем максимальное количество информационных данных о местоположении объекта при движении по ВПП $n_{ВПП} = 100$, при движении по прямолинейному участку РД $n_{РД} = 50$, при движении по участку съезда с ВПП $n_{съезд} = 30$.

Поскольку объект движется точно по осевой ВПП или РД, ошибки определения его местоположения будут связаны только с погрешностью средства наблюдения, при этом будем считать, что погрешности имеют нормальное распределение. Рассмотрим несколько случаев, в которых будем последовательно изменять математическое ожидание от 0,5 до 1,5 м и СКП координатной информации, полученной от наземной станции АЗН-В от 3 до 15 м. Надежность β зададим равной 0,99. При задании точности $\varepsilon_{гр}$ воспользуемся полученными ранее расчетными данными СКП σ^* : 8 м для ВПП, 3,5 и 4,5 м – для РД, а также нормативными требованиями (Базис МПСН-А) – 3,8 м.

Дабы не перегружать статью рисунками, приведем наиболее характерные графики для случаев: математического ожидания 1 м и СКП 5 м (рис. 2), математического ожидания 0,5 м и СКП 10 м (рис. 3), математического ожидания 1 м и СКП 15 м (рис. 4).

На рисунках значком «+» показаны смоделированные погрешности определения местоположения объекта относительно оси ВПП или РД, зеленой кривой показано значение критерия из условия (10), бордовой кривой – математическое ожидание для накопленного числа измерений n . Не превышение математического ожидания критерия означает выполнение условия (10). Красными линиями показаны граничные значения точности $\varepsilon_{гр}$ и указана ее величина в метрах. Не превышение критерием значения $\varepsilon_{гр}$ означает выполнение условия (11).

Рис. 2. Результаты моделирования для случая математического ожидания 1 м, СКП 5 м

Рис. 3. Результаты моделирования для случая математического ожидания 0,5 м, СКП 10 м

Рис. 4. Результаты моделирования для случая математического ожидания 1 м, СКП 15 м

На рисунке 2 видно, что при выполнении условия (11) возможны ситуации, когда не выполняется условие (10). На рисунке 3 показана классическая ситуация выполнения условия (10) для всего периода наблюдения ($n = 100$), при этом можно определить количество измерений, потребное для удовлетворения условия (11). Анализ рисунка 4 позволяет установить, что при больших СКП практически невозможно за разумное время определить достоверность информации о местоположении объекта из-за невыполнения условия (11). Косвенным признаком больших погрешностей является периодическое невыполнение условия (10).

Разработанный критерий позволяет выявлять большую систематическую погрешность измерения. При математическом ожидании 1,5 м и сравнительно небольшой СКП 5 м, учащаются случаи невыполнения условия (10), что видно из рис. 5.

Рис. 5. Результаты моделирования для случая математического ожидания 1,5 м, СКП 5 м

При моделировании удалось установить среднее значение требуемого числа измерений n для выполнения условия (11) при различных СКП определения местоположения объекта (рис. 6). Таким образом, критерий позволяет выявить большую СКП координат ВС (ТС) в случае, если после накопления требуемого числа измерений условие (11) не выполняется.

Из рисунка 6 видно, что при уменьшении граничного значения точности подтверждения достоверности информации $\epsilon_{гр}$ требуемое число измерений n резко возрастает. Из этого можно сделать вывод о необходимости задания обоснованных требований к точности систем наблюдения за аэродромным движением (в частности АЗН-В).

Рис. 6. Зависимость требуемого числа измерений n от величины СКП измерения координат объекта:
1) для $\epsilon_{гр} = 3,5$ м; 2) для $\epsilon_{гр} = 3,8$ м; 3) для $\epsilon_{гр} = 4,5$ м; 4) для $\epsilon_{гр} = 8$ м

Выводы

Анализ статистики происшествий на рабочей площадке аэродрома (выкатывание за пределы ВПП, несанкционированный выезд на ВПП или РД и т.д.) показал, что эти события происходят относительно редко, но при этом связаны с высоким риском повреждения ВС и ТС, а также человеческими жертвами. Для уменьшения вероятности событий RE и RI применяют системы A-SMGCS и ASDE-X, в которых источниками информации о местоположении объектов на рабочей площадке аэродрома выступают РЛС ОЛП и МПСН-А, обладающие высокой стоимостью и потому не применяемые на региональных аэродромах. Наземные станции АЗН-В, обладающие низкой стоимостью в настоящее время не применяются в качестве основного или единственного средства наблюдения по причине отсутствия механизмов подтверждения достоверности информации наблюдения.

В статье разработан критерий, позволяющий с заданным уровнем надежности на основе анализа данных, получаемых от наземной станции АЗН-В сделать вывод о достоверности информации наблюдения. При этом необходимо задать граничное значение точности подтверждения достоверности информации $\epsilon_{гр}$, которая может быть получена из нормативных требований (например, из Базиса МПСН-А – 3,8 м), либо получена расчетным методом. В статье были рассмотрены следующие значения $\epsilon_{гр}$: 8 м – для ВПП, 3,5 м – для РД без учета обочин и 4,5 м – для РД с учетом обочин.

Произведенные расчеты для случаев математического ожидания от 0,5 до 1,5 м и СКП координатной информации от 3 до 15 м подтвердили работоспособность критерия для заданных модельных условий. Показана возможность установления требуемого числа измерений для определения величины СКП измерения координат объекта (рис. 6). Критерий позволяет выявить увеличение СКП измерения координат объекта при проверке условия (11), а также увеличение математического ожидания путем проверки условия (10), поскольку при увеличении СКП перестает выполняться условие (11), а при уве-

личении математического ожидания – условие (10) (рис. 2-5). Стоит отметить, что определение чувствительности критерия требует проведения отдельного исследования.

Таким образом применение критерия позволяет задавая требуемое количество измерений для анализа (которое зависит от надежности β и точности $\varepsilon_{гр}$), оценить достоверность координатной информации, получаемой от наземной станции АЗН-В, то есть решить, можно ли применять АЗН-В как основное или единственное средство наблюдения за ВС (ТС) на рабочей площади аэродрома.

Проведенное исследование является первой частью комплексной работы, поскольку при проведении расчетов предполагалось, что ВС (ТС) перемещается точно по осевой линии ВПП или РД.В дальнейшем авторы планируют исследовать случай наличия не только ошибки измерения координат объекта, но и ошибки соблюдения заданной траектории движения.

Литература

- GlobalAviationSafetyPlan2020-2022. Doc. 10004. ICAO, 2019. 144 p.
- Решение глобальной проблемы обеспечения безопасности операций на ВПП. Ассамблея ИКАО – 37 сессия. А37-WP/68 TE/21. ИКАО, 2010. 6 с.
- Runway Safety Programme – Global Runway Safety Action Plan. First edition. ICAO, 2017. 35 p.
- МАК. Расследование происшествия с Falcon 50EX F-GLSA 20.10.2014 в аэропорту Внуково. URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya/falcon-50ex-f-glsa-20-10-2014>. (дата обращения 27.01.2020).
- Информация по БП № 2 от 17.02.2017 № Иск-3397/02. URL: www.dvmtu-favt.ru/upload/medialibrary/698/698f53cf0cf9bce64d35bce0f1b1abf1.pdf. (дата обращения 27.01.2020).
- О мероприятиях по предотвращению несанкционированных выездов на взлетно-посадочную полосу [утв. приказом Министерства транспорта РФ №69-П от 6фев. 2017г.]. 33 с.
- Руководство по предотвращению несанкционированных выездов на ВПП. Doc. 9870 AN/463. Издание первое. ИКАО, 2007. 110 с.
- National airspace system (NAS). Visual specification for airport surface applications (VSAS). Department of transportation Federal aviation administration, FAA-E-2943b. 2006. 172 p.
- Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. Doc. 9830 AN/452. ICAO, 2004. – 89 p.
- EUROCONT Specification for Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) Services. EUROCONTROL-SPEC-171, 2018. 123 p.
- Поставка оборудования РЛС ОЛП «Атлантика», г. Ростов-на-Дону. СКБ «Контур». URL: <https://zakupki.kontur.ru/31604094594>. (дата обращения 27.01.2020).
- Поставка РЛС ОЛП «Атлантика» для оснащения а/п Самара (Курумоч). СКБ «Контур». URL: <https://zakupki.kontur.ru/31604200326>. (дата обращения 27.01.2020).
- Санкт-Петербургский «Альманах». Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. (дата обращения 27.01.2020).
- Поставка одноканальной наземной станции АЗН-В. СКБ «Контур». URL: <https://zakupki.kontur.ru/31806872353>. (дата обращения 27.01.2020).
- Руководство по авиационному наблюдению. ИКАО, документ 9924 AN/474. 2017. 372 с.
- Ali Busayraah Syd, Schuster Wolfgang, Ochien Washington, Majumdar Arnab Kian, Chiew Thiam. 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, January 2013, pp. 444-455.
- Duan Pengfei Peinecke, Niklas de Haag, Maarten Uijt. Proof of Concept: Real-Time Demonstration of a Measurement-Based ADS-B System // Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of the Institute of Navigation, San Diego, California, January 2013, pp. 456-466.
- Затучный Д.А. К вопросу о достоверности передаваемой информации в режиме автоматического зависимого наблюдения // Надежность и качество сложных систем, 2016. №4 (16). С. 43-45.
- A. Soto, P. Merino, J. Valle. ADS-B integration in the SESAR surface surveillance architecture // 2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications – Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV), Sep. 2011, pp. 13-18.
- Wei Liu, Yanbo Zhu, Jun Zhang, Yongchun Wang. ADS-B Data Evaluation by the Trial Project in Western China // Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation, San Diego, CA, January 2010, pp. 323-328.
- Рубцов Е.А., Калинин А.С., Григорьева Е.И. Анализ линии передачи данных автоматического зависимого наблюдения вещательного типа // Научные технологии в космических исследованиях Земли, 2018. Т. 10. № 6. С. 19-27.
- Авиационные правила Часть 170 Сертификация оборудования аэродромов и воздушных трасс (АП-170). Том 2. Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс. Международный авиационный комитет, 2013. 216 с.
- Сертификационные требования (Базис) к многопозиционным системам наблюдения аэродромным [согл. письмом Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации №08-04/5228-ИС от 15мар.2018 г.]. 7 с.
- Advanced surface movement guidance and control systems (A-SMGCS) manual. Doc. 9830 AN/452. First Edition. ICAO, 2004. 89 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. RTCA, 2009. 1410 p.
- Сертификационные требования (Базис) к наземной станции автоматического зависимого наблюдения вещательного типа [согл. письмом Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации №08-04/19757-ИС от 28сен. 2017 г.]. 42 с.
- Методические рекомендации по летным проверкам наземных средств радиотехнического обеспечения полетов, авиационной электросвязи и систем светосигнального оборудования гражданской авиации [утв. Распоряжением Минтранса России №ИЛ-79-р от 24 авг. 2005 г., с изм. Распоряжением Минтранса России №МС-82-р от 29 июня. 2012 г.]. 236 с.
- Соболев Е.В. Организация радиотехнического обеспечения полетов. Часть 1. Основные эксплуатационные требования к авиационным комплексам навигации, посадки, связи и наблюдения: учебное пособие. СПб: СПбГУ ГА. Санкт-Петербург, 2007. 120 с.
- Руководство по эксплуатации гражданских аэродромов Российской Федерации. Министерство Транспорта РФ, ДВТ, М., 1994. 117 с.
- Федеральные авиационные правила «Требования, предъявляемые к аэродромам, предназначенным для взлета, посадки, руления и стоянки гражданских воздушных судов» (Приказ Минтранса России от 25.08.2015г. №262). 130 с.
- Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation. Cir. 326 AN/188. ICAO, 2012. 41p.
- Федеральные авиационные правила «Радиотехническое обеспечение полетов воздушных судов и авиационная электросвязь в гражданской авиации»: [утв. приказом Министерства транспорта Российской Федерации №297 от 20 окт. 2014г. в ред. от 9 янв. 2019г.]. 63 с.
- Вентцель Е.С., Овчаров Л.А. Теория вероятностей и ее инженерные приложения. Учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Высш. шк., 2000. 480 с.
- Корн Г., Корн Т. Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: Наука, 1974. 832 с.
- Россия книга 1 «Международные аэродромы Российской Федерации». URL: <http://www.caica.ru/common/AirInter/validaip/html/rus.htm>. (дата обращения 27.01.2020).
- АИ России книга 2 «Аэродромы Российской Федерации класса А, Б, В (кроме международных)». URL: <http://www.caica.ru/common/AirClassABV/validaip2/html/rus.htm>. (дата обращения 27.01.2020).

THEORETICAL SUBSTANTIATION OF CONFIRMATION OF THE VALIDITY OF INFORMATION ABOUT THE LOCATION OF THE OBJECT ON THE WORK AREA OF THE AERODROME

Alexandr P. Plyasovskiy, All-Russian scientific research institute of radio equipment (JSC VNIIRA), Saint Petersburg, Russia, vniira@yandex.ru
Evgeny A. Rubtsov, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia, rubtsov.spb.guga@rambler.ru

Abstract

The article sets the task of assessing the reliability of information about the location of aircraft and vehicles on the working area of the aerodrome, obtained from a ground station of automatic dependent surveillance, as the cheapest aid of surveillance. Authenticity is evaluated with a given reliability β . A criterion for assessing the reliability of information is proposed; its essence is to determine the confidence interval for estimating the location of the object l_β , under two conditions: the confidence interval should be less than the estimate of the mathematical expectation of the location of the object $\tilde{m}$ received from the surveillance aids, and also less than the boundary value of the accuracy of confirming the information authenticity ε_g . The article offers various methods for determining accuracy. It can be obtained from regulatory requirements (for example, from the Basis of an aerodrome multi-sensor surveillance system), or calculated. The movement of the object along the working area of the aerodrome was simulated, while it was assumed that the object moves in a straight line, with a constant speed and zero deviation from a given trajectory. For the surveillance aids were set various errors: the mathematical expectation from 0.5 to 1.5 m and the mean square error of determining coordinates from 3 to 15 m. The required number of measurements was calculated to determine the magnitude of the error in measuring the coordinates of the object. It is shown that the application of the criterion allows, by setting the required number of measurements for analysis (which depends on the reliability β and the accuracy of confirming authenticity ε_g), to evaluate the accuracy of the coordinate information received from the ground station automatic dependent surveillance, that is, decide whether it can be used as the main or the only aid of monitoring aircraft and vehicles on the aerodrome's working area.

Keywords: automatic dependent surveillance, ADS-B, authenticity of surveillance information, coordinate error, aerodrome's working area; aircraft, vehicle.

References

1. GlobalAviationSafetyPlan2020-2022. Doc. 10004. ICAO, 2019. 144 p.
2. Tackling the global issue of runway safety. Assembly - 37th session. A37-WP/68 TE/21. ICAO, 2010. 5 p.
3. Runway Safety Programme - Global Runway Safety Action Plan. First edition. ICAO, 2017. 35 p.
4. Interstate Aviation Committee. Investigation of an accident with Falcon 50EX F-GLSA 20.10.2014 at Vnukovo Airport. URL: <https://mak-iac.org/rassledovaniya/falcon-50ex-f-glsa-20-10-2014>. (date of the application 27.01.2020).
5. Safety Bulletin Information № 2 at 17.02.2017 № Isk-3397/02. URL: www.dvmtu-favt.ru/upload/medialibrary/698/698f53cf0cf9bce64d35bce0f1b1abf1.pdf. (date of the application 27.01.2020).
6. On measures to prevent unauthorized exits to the runway [approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation №69-P at February 6, 2017]. 33 p.
7. Manual on the Prevention of Runway Incursions. Doc. 9870 AN/463. First edition. ICAO, 2007. 90 p.
8. National airspace system (NAS). Visual specification for airport surface applications (VSASA). Department of transportation Federal aviation administration, FAA-E-2943b. 2006. 172 p.
9. Advanced Surface Movement Guidance and Control Systems (A-SMGCS) Manual. Doc. 9830 AN/452. ICAO, 2004. 89 p.
10. EUROCONTROL Specification for Advanced-Surface Movement Guidance and Control System (A-SMGCS) Services. EUROCONTROL-SPEC-171, 2018. 123 p.
11. Equipment supply high-resolution radar "Atlantic", Rostov-on-Don city // SCB "Kontur". URL: <https://zakupki.kontur.ru/31604094594>. (date of the application 27.01.2020).
12. Equipment supply high-resolution radar "Atlantic" for airport Samara (Kurumotch). SCB "Kontur". URL: <https://zakupki.kontur.ru/31604200326>. (date of the application 27.01.2020).
13. Saint-Petersburg's "Almanac" // Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. (date of the application 27.01.2020).
14. Equipment supply one-channel ground station ADS-B // SCB "Kontur". URL: <https://zakupki.kontur.ru/31806872353>. (date of the application 27.01.2020).
15. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2017. 372 p.
16. Syd Ali Busyairah. (2013). A Study of ADS-B Data Evaluation and Related Problems / Ali Busyairah Syd, Schuster Wolfgang, Ochien Washington, Majumdar Arnab Kian, Chiew Thiam. *Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, January 2013, pp. 444-455.
17. Duan Pengfei Peinecke, Niklas de Haag, Maarten Uijt. (2013). Proof of Concept: Real-Time Demonstration of a Measurement-Based ADS-B System. *Proceedings of the 2013 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, California, January 2013, pp. 456-466.
18. Zatushnyi D.A. (2016). On the reliability of transmitted information in the automatic dependent surveillance mode. *Reliability and quality of complex systems*. No.4 (16), pp. 43-45.
19. A. Soto, P. Merino, J. Valle. (2011). ADS-B integration in the SESAR surface surveillance architecture. *2011 Tyrrhenian International Workshop on Digital Communications - Enhanced Surveillance of Aircraft and Vehicles (TIWDC/ESAV)*, Sep. 2011, pp. 13-18.
20. Wei Liu, Yanbo Zhu, Jun Zhang, Yongchun Wang. (2010). ADS-B Data Evaluation by the Trial Project in Western China. *Proceedings of the 2010 International Technical Meeting of The Institute of Navigation*, San Diego, CA, January 2010, pp. 323-328.
21. Rubtsov E.A., Kalintsev A.S., Grigoreva E.I. (2018). Data link analysis of automatic dependent surveillance – broadcast. *H&ES research*. Vol. 10. No. 6, pp. 19-27.
22. Aviation Rules Part 170 Certification of equipment for aerodromes and airways (AR-170). Volume 2 Certification requirements for the equipment of aerodromes and airways. Interstate Aviation Committee, 2013. 216 p.
23. Certification Requirements (Basis) for multi-sensor surveillance system [agreed upon by the letter of the Department of Development Programs of the Ministry of Transport of the Russian Federation №08-04/5228-IS of March 15, 2018], 2018. 7 p.
24. Advanced surface movement guidance and control systems (A-SMGCS) manual. Doc. 9830 AN/452. First Edition. ICAO, 2004. 89 p.
25. 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. RTCA, 2009. 1410 p.
26. Certification requirements (Basis) for a ground station of automatic dependent surveillance of broadcast type [agreed upon by the letter of the Department of Development Programs of the Ministry of Transport of the Russian Federation №08-04/19757-IS of September 28, 2017], 2017. 42 p.
27. Guidelines for flight inspections of ground-based radio-technical flight support equipment, aeronautical telecommunications, and civil aviation lighting systems [approved by decree of the Ministry of Transport of Russia №IL-79-r of August 24, 2005, as amended by the decree of the Ministry of Transport of Russia №MS-82-r of June 29, 2012], 2012. 236 p.
28. Sobolev E.V. (2007). *Organization of radio engineering flight support. Part 1. Basic operational requirements for aviation systems of navigation, landing, communications and surveillance: handbook*. St.-Petersburg: St.-P. State University of Civil Aviation. Saint-Petersburg. 120 p.
29. Operation manual for civil aerodromes of the Russian Federation. Ministry of Transport of the Russian Federation, Department of Air Transport, Moscow, 1994. 117 p.
30. Federal Aviation Rules "Requirements for aerodromes intended for take-off, landing, taxiing and parking of civil aircraft" (Order of the Ministry of Transport of Russia at 25.08.2015 №262). 130 p.
31. Assessment of ADS-B and Multilateration Surveillance to Support Air Traffic Services and Guidelines for Implementation. Cir. 326 AN/188. ICAO, 2012. 41p.
32. Federal Aviation Rules "Radio-technical support of aircraft flights and aviation telecommunication in civil aviation" [approved by order of the Ministry of Transport of the Russian Federation №297 of October 20, 2014 as amended on January 9, 2019], 2019. 63 p.
33. Ventzel E.S., Ovcharov L.A. (2000). *Probability theory and its engineering applications. Textbook for technical colleges*. 2nd edition. Moscow: High school. 480 p.
34. Korn G, Korn T. (1974). *Mathematical handbook (for scientists and engineers)*. Moscow: Nauka. 832 p.
35. AIP Russia book 1 "International aerodromes of the Russian Federation". URL: <http://www.caica.ru/common/AirInter/validaip/html/rus.htm>. (date of the application 27.01.2020).
36. AIP Russia book 2 "Aerodromes of the Russian Federation of class A, B, C (except international)". URL: <http://www.caica.ru/common/AirClassABV/validaip2/html/rus.htm>. (date of the application 27.01.2020).