

# ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ДАННЫХ АЗН-В В АЭРОДРОМНОЙ ЗОНЕ МЕТОДОМ СТРОБИРОВАНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49

**Калинцев Андрей Сергеевич**,  
Архангельский центр ОВД филиала "Аэронавигация Северо-Запада" ФГУП "Государственная корпорация по ОрВД в РФ",  
Мезень, Россия, [kas4job@gmail.com](mailto:kas4job@gmail.com)

**Рубцов Евгений Андреевич**,  
ФГБОУ ВО СПбГУ ГА, Санкт-Петербург, Россия,  
[rubtsov.spb.guga@rambler.ru](mailto:rubtsov.spb.guga@rambler.ru)

**Плясовских Александр Петрович**,  
АО "ВНИИРА", Санкт-Петербург, Россия,  
[vniira@yandex.ru](mailto:vniira@yandex.ru)

**Manuscript received** 04 February 2021;  
**Accepted** 30 March 2021

**Keywords:** безопасность полетов, авиационное наблюдение, АЗН-В, интервальная оценка, расширенное наблюдение режима S, стробирование, аэродромная зона

Низкая стоимость наземных станций АЗН-В в сравнении с радиолокаторами и многопозиционными системами наблюдения позволяет рассматривать их как перспективные средства, в том числе для аэродромной зоны. Однако, в настоящее время ИКАО не рекомендует применять АЗН-В в качестве основного средства наблюдения, поскольку требуется подтверждение достоверности полученной координатной информации. В статье представлена методика алгоритмического подтверждения данных АЗН-В при обеспечении полетов в аэродромной зоне. Предлагается использовать для оценки достоверности данных АЗН-В метод стробирования, путем выделения области пространства вокруг экстраполированной координаты ВС. Согласно требуемой схеме полета на борт передается запрос расширенного наблюдения режима S. По координатам заданной линии пути, согласно схеме маневрирования, строится траектория движения ВС, относительно которой выполняется расчет ошибок местоположения. Оценка математического ожидания и среднего квадратического отклонения ошибки местоположения выполняется для различных уровней надежности. Исходя из размеров области строга выполняется проверка на соответствие получаемых интервальных оценок условию достоверности данных. Проверка выполняется последовательно для уровней надежности 0,95, 0,99 и 0,999. При выходе величины оценки погрешности за пределы допуска для заданного уровня доверия отображается информация о ненадежности принятых данных, что позволяет выявлять большие отклонения измеренных координат за меньшее количество наблюдений. При выполнении имитационного моделирования для получаемых данных были заданы различные значения погрешностей: математическое ожидание от 10 до 48 м и СКО от 20 до 100 м. Оценка погрешностей для уровня надежности 0,999 требовала от 5 до 22 наблюдений, что соответствует интервалу от 3 до 11 с реального времени. При значениях систематической погрешности 10 м и СКО 70 м, принятые координаты будут идентифицированы как ненадежные и отобразится информация о запрете применения АЗН-В и необходимости использования иных средств наблюдения.

## Информация об авторах:

**Калинцев Андрей Сергеевич**, техник радионавигации, радиолокации и связи службы ЭРТОС Архангельского центра ОВД филиала "Аэронавигация Северо-Запада" ФГУП "Государственная корпорация по ОрВД в РФ", Мезень, Россия.

**Рубцов Евгений Андреевич**, к.т.н., доцент кафедры "Радиоэлектронные системы", ФГБОУ ВО "Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации", Санкт-Петербург, Россия.

**Плясовских Александр Петрович**, д.т.н., главный конструктор научно-технического центра "Организация воздушного движения" АО "Всероссийский научно-исследовательский институт радиоаппаратуры", Санкт-Петербург, Россия

## Для цитирования:

Калинцев А.С., Рубцов Е.А., Плясовских А.П. Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №7. С. 39-49.

## For citation:

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*, vol. 15, no.6, pp. 39-49. (in Russian)

## Введение

Развитие транспортной доступности является неотъемлемой задачей в сфере социально-экономического развития Арктической зоны Российской Федерации (АЗРФ). Принимая во внимание значительную удаленность и сезонную доступность автомобильных дорог, для многих населенных пунктов, воздушный транспорт является основным, а зачастую и единственным видом транспорта, который позволяет обеспечить круглогодичное сообщение, как для населения, так и для доставки грузов и товаров.

Авиационный транспорт играет важнейшую роль в АЗРФ. Учитывая возрастающую экономическую привлекательность Арктической зоны и особое значение воздушного транспорта в изучении и освоении территорий Крайнего Севера, увеличение объема авиaperевозок и развитие инфраструктуры местных воздушных линий (МВЛ) должны стать драйверами повышения качества и уровня жизни населения, а также экономического роста северных районов и страны в целом.

Низкий уровень развития транспортной инфраструктуры, предназначенной для функционирования малой авиации, а также высокая стоимость создания объектов такой инфраструктуры, в соответствии с Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года» [1] отнесены в числе прочего к основным опасностям и угрозам, формирующим риски для развития АЗРФ и обеспечения национальной безопасности. Стратегия содержит ряд мер, направленный на повышение транспортной доступности и снижение стоимости предоставления транспортных услуг. Применительно к авиации, предполагает модернизацию, реконструкцию и развитие авиационной инфраструктуры, а также подчеркивает, что стоимость объектов инфраструктуры играет немаловажную роль.

Глобальный аэронавигационный план (ГАНП) Международной организации гражданской авиации (ИКАО) [2] указывает, что инфраструктура зависимого наблюдения, с эксплуатационной точки зрения, является менее затратной в сравнении с расширением зон радиолокационного наблюдения в отдаленных районах. С экономической точки зрения применение технологии автоматического зависимого наблюдения (АЗН-В) является также более эффективным в сравнении с системами мультилатерации широкой зоны действия (МПСН-Ш). Специфика региона, труднодоступность населенных пунктов и требования к МПСН в геометрическом плане, значительно затрудняют их развертывание. Наземные станции АЗН-В могут быть установлены в труднодоступных районах и малых населенных пунктах (что затруднительно или невозможно выполнить для радиолокаторов и МПСН).

Руководство по авиационному наблюдению ИКАО [3] указывает на необходимость подтверждения данных от АЗН-В, для района аэродрома могут применяться аэродромные локаторы (ОРЛ-А) и МПСН. Применение перечисленных систем значительно увеличивает финансовую нагрузку: стоимость ОРЛ-А (например, Лира-А10) составляет 76 млн. руб., а МПСН-А (например, «Альманах») – порядка 130 млн. руб. [4, 5, 6], что в конечном итоге, сказывается на стоимости услуг для потребителя.

Помимо стоимости, к достоинствам инфраструктуры АЗН-В можно также отнести отсутствие необходимости в постоянном присутствии обслуживающего персонала. Таким образом, использование станции АЗН-В при обеспечении полетов МВЛ в качестве основного средства наблюдения для удаленных аэродромов с низкой интенсивностью воздушного движения позволит значительно снизить затраты на внедрение и эксплуатацию.

Принимая во внимание экономическую привлекательность технологии АЗН-В, в сравнении со стоимостью РЛС и МПСН, а также рекомендации ИКАО по необходимости подтверждения данных АЗН-В получаемых от воздушного судна (ВС), задача разработки методики алгоритмического подтверждения данных является актуальной и согласуется с внутренней политикой РФ, направленной на развитие Арктической зоны.

## Постановка задачи

Для обеспечения возможности применения АЗН-В в качестве основного средства наблюдения, необходимо разработать методику подтверждения данных при обеспечении полетов в аэродромной зоне. Задача решается применительно к аэродромам с низкой интенсивностью воздушного движения.

В основе разрабатываемой методики лежит представленный в работах [4, 7] метод оценки достоверности информации АЗН-В в системе наблюдения и контроля аэродромного движения. Особенностью поставленной задачи является выполнение ВС полета в аэродромной зоне.

При построении траектории движения ВС в радиолокации применяется стробирование. Стробом называют область пространства вокруг экстраполированной точки траектории, в пределах которой полученная оценка координаты ВС может считаться достоверной. В работе предлагается алгоритмическая методика подтверждения данных АЗН-В, с целью применения наземной станции АЗН-В режима 1090 ES в качестве основного источника информации наблюдения.

Исполнительный регламент Европейской комиссии № 1207/2011 [8] и первая поправка к нему 1028/2014 [9] требует наличия бортовой аппаратуры расширенного наблюдения режима S (EHS) и АЗН-В режима 1090 ES для ВС с максимальной взлетной массой более 5700 кг, или с максимальной крейсерской истинной скоростью полета более 250 узлов. Расширенное наблюдение режима S (EHS) представляет собой набор расширенных функций режима S, и включает три типа отчетов [3, 10]:

1) выбранное намерение в вертикальной плоскости (BDS 4.0);

2) отчет о треке и повороте (BDS 5.0), который содержит информацию о путевой и истинной воздушной скорости (TAS) самолета, а также о значениях скорости изменения путевого угла, угла крена и истинного путевого угла;

3) отчет о курсе и скорости (BDS 6.0), который содержит информацию магнитном курсе, приборной скорости (IAS), числе Маха, вертикальной скорости и при отсутствии данных о путевом угле предоставляются истинная воздушная скорость.

Бортовое оборудование обеспечивающее работу в режиме стандартного (ELS) и расширенного (EHS) наблюдения режима S, а также в системе АЗН-В 1090 ES отечественного

производства установлено на ВС L-410, Як-152, а также вертолете Ми-8 и его модификациях [11]. Использование подобного бортового оборудования на ВС региональных линий, выполняющих полеты МВЛ, позволит отодвинуть необходимость модернизации наземного оборудования и повысить ситуационную осведомленность диспетчера.

При обеспечении управления воздушным движением на МВЛ на стороне наземной станции АЗН-В предлагается использование запросчика режима S, что позволит получать дополнительную информацию, которая может быть использована для подтверждения и верификации данных, получаемых от оборудования АЗН-В наблюдаемого ВС. Запросчик режима S позволяет адресно формировать запросы на получение сообщений с содержанием дополнительной информации. Использование запросчика режима S позволит получать информацию о времени выполнения маневра и координатах ВС.

Сборники аэронавигационной информации (AIP) содержат требования по организации воздушного движения в районе аэродрома, схемы выполнения маневров при взлете и заходе ВС на посадку [12]. Точки, принадлежащие схеме выполнения соответствующей процедуры, примем в качестве координат обязательной траектории. Содержащаяся в сборнике информация о схемах выполнения маневров с координатами соответствующих схеме точек внесена и используется в автоматизированных системах управления воздушным движением (АС УВД) [13].

Информация с координатами точки обязательной траектории на приемной стороне может быть использована для подтверждения достоверности получаемых данных. При наличии информации о точке пути, которую ВС должно преодолеть, а также о получаемых от ВС координатах, представляется возможным выполнить проверку на соответствие схемы маневрирования и получаемых координат.

#### Методика подтверждения данных АЗН-В в аэродромной зоне

Методика подтверждения данных АЗН-В, с использованием бортового оборудования, совместимого с режимом S, заключается в следующем. При подходе ВС к точке выполнения маневра, в АС УВД инициируется выполнение активного адресного запроса на передачу ВС сообщения расширенного наблюдения режима S. Дополнительно может быть инициирован запрос на передачу координат ВС и во время выполнения маневра, что позволит исключить неопределенность после начала выполнения маневра.

На стороне ВС, в ответ на активный адресный запрос, оборудование расширенного режима S (EHS) предоставляет информацию, касающуюся своего ближайшего намерения [3], а также дополнительную информацию: приборную скорость, угол крена, путевую скорость, скорость изменения путевого угла. Информация о скорости ВС также передается в радиовещательном режиме АЗН-В стандарта 1090 ES [14]. Таким образом, учитывая принятую информацию, АС УВД обладает данными о выполнении маневра и координатах, полученными от ВС, а также обязательными координатами полета ВС.

С использованием знаний о параметрах маневра, полученных от ВС, а также точек обязательного пути, АС УВД выполняется построение траектории движения цели с условием обязательного пересечения координат схемы маневри-

рования. Относительно наблюдаемого ВС строится траектория, соединяющая точки обязательного пути, действующие и прогнозируемые координаты ВС. Стоит указать, что траектория строится с учетом скорости движения ВС. Далее принимаемые координаты ВС сравниваются с построенной траекторией и рассчитываются ошибки местоположения относительно построенной траектории. Выполняется расчет оценки среднего квадратического отклонения (СКО) и математического ожидания (МО) ошибок местоположения ВС. Рассчитанная ошибка местоположения не должна превышать предварительно установленные допустимые значения. Интервалы допустимых значений можно интерпретировать как область пространства на координатной плоскости, вокруг экстраполированной отметки. В данном случае, вокруг координат точки заданного пути.

Примем, что в контексте решаемой задачи, зона стробирования – область пространства в пределах которого принятые данные считаются достоверными. Данные о местоположении ВС за пределами области строба считаются ошибочными. Таким образом, применительно к поставленной задаче условимся, что строб – область пространства вокруг экстраполированной (с учетом времени движения) отметки с центром в точке, совпадающей с координатами обязательной траектории движения ВС.

Для определения размеров области строба проанализируем требования к допустимым погрешностям некоторых средств наблюдения. В сертификационных требованиях (Базисах) указано, что для МПСН-Ш среднее квадратическое отклонение горизонтального местоположения ВС не должна превышать для аэродромной зоны 150 м [15].

В соответствии с требованиями авиационных правил АП-170 [16] к точностным характеристикам ОРЛ-А СКО после цифровой обработки информации не должна превышать 150 м при максимальной дальности 100 км, и 200 м при максимальной дальности 160 км.

В сертификационных требованиях [15] указано, что после цифровой обработки СКО измерения дальности должна быть не хуже 100 м для моноимпульсных ВРЛ и 250 м для обычных. СКО измерения азимута должна быть не хуже 15' для обычных ВРЛ, 8' для моноимпульсных.

Оценим допустимые погрешности АЗН-В, для чего примем некоторые допущения. Система АЗН-В передает информацию о местоположении в воздухе 2 раза в секунду [17]. Оценка достоверности данных о местоположении ВС выполняется в горизонтальной плоскости. Полученные данные, при обработке информации, переводятся в прямоугольную систему координат, в которой и осуществляется дальнейшая обработка информации.

Проанализировав приведенные требования к средствам наблюдения, в качестве отправных характеристик при определении параметров зоны стробирования, используем значение СКО для ОРЛ-А, равное 150 м.

Согласно данным ИКАО [3], распределение ошибок системы наблюдения является нормальным. При выборе размеров строба, примем СКО средств наблюдения равными минимально допустимому значению к отдельному средству наблюдения, т.е. 150 м. Радиус области строба примем равным минимальному значению СКО, установленному требованиями к ОРЛ-А. Тогда, область стробирования представляет собой окружность в горизонтальной плоскости с цен-



тром в точке экстраполяции и радиусом равным 150 м. При равных по осям  $Ox$  и  $Oy$  значениях СКО можно говорить о круговом рассеивании случайной величины. Случайные величины с круговым рассеиванием являются независимыми при любом выборе прямоугольной системы координат [18]. Необходимо также отметить, что применительно к поставленной задаче, математическое ожидание ошибки определения местоположения принимается близким к нулю.

Рассмотрим процесс построения области стробирования. В АС УВД от наземной станции АЗН-В поступают координаты текущего местоположения ВС. С учетом скорости и угла крена, рассчитывается номинальный радиус разворота и выполняется построение траектории. Вычисление радиуса разворота ВС определяется как [19, 20]:

$$R = \frac{V^2}{g \cdot \operatorname{tg} \beta}, \quad (1)$$

где  $\beta$  – максимальный угол крена ВС;  $V$  – скорость ВС;  $g$  – ускорение свободного падения.

Время выполнения разворота на заданный угол разворота (УР):

$$t_{360} = \frac{2\pi R}{V}, \quad (2)$$

$$t_{УР} = \frac{УР}{360} t_{360}, \quad (3)$$

где УР – угол разворота.

Угол разворота совпадает с углом между радиусами, соединяющими точки, определенные схемой маневрирования и местоположением ВС.

Далее вычисляется местоположение области строга за требуемое время наблюдений. Требуемое время наблюдений – время, необходимое для получения оценок СКО и МО с заданной точностью. В момент времени ( $t_{\text{кст}}$ ), равный временному интервалу экстраполяции, центр строга находится в точке с координатами, принадлежащими схеме маневрирования. Траектория строится с учетом временных интервалов, значения которых вычисляются исходя из значений скорости ВС.

Относительно построенной траектории движения, которая учитывает действительные и прогнозируемые координаты, полученные наземной станцией АЗН-В от ВС, а также время прохождения участков траектории и координаты схемы маневрирования, выполняется вычисление оценки МО и СКО ошибки местоположения ВС. Приняв, что ошибки местоположения относительно построенной траектории имеют нормальное распределение, выполним интервальную оценку случайной величины, взяв за основу методику [4, 7].

Оценка математического ожидания бокового отклонения ВС от линии экстраполяции, полученная с использованием данных АЗН-В, может быть найдена как:

$$\tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, \quad (4)$$

где  $n$  – число измерений местоположения ВС (число наблюдений).

Оценивание величины МО необходимо выполнять исходя из требуемой доверительной вероятности  $\beta$  таким образом, чтобы выполнялось условие [4, 18, 21]:

$$P(|\tilde{m} - m| < \varepsilon_M) = \beta, \quad (5)$$

где  $\varepsilon_M$  – ошибка определения местоположения;  $\tilde{m}$  – несмещенная оценка параметра  $m$ ;  $\beta$  – значение доверительной вероятности.

Значение доверительной вероятности  $\beta$  выбирается достаточно большим, например  $\beta = 0,9, 0,95, 0,99$ . В таком случае с вероятностью 0,9 ( $\beta = 0,9$ ) можно считать событие практически достоверным [18].

$$P(|\tilde{m} - m| < \varepsilon_\beta) = 2\Phi^*\left(\frac{\varepsilon_M}{\sigma_{\tilde{m}}}\right) - 1, \quad (6)$$

где  $\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{D}{n}}$  – СКО оценки  $\tilde{m}$  математического ожидания бокового отклонения ВС от линии экстраполяции;  $\Phi^*(x)$  – функция Лапласа.

При определении СКО оценки  $\tilde{m}$  значение дисперсии  $D$  можно принять равным оценке  $D \approx \tilde{D}$ . Тогда СКО оценки  $\tilde{m}$  можно находить как [18, 21, 4]:

$$\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (7)$$

Доверительный интервал МО может быть найден как:

$$I_\beta = (\tilde{m} - \varepsilon_M; \tilde{m} + \varepsilon_M), \quad (8)$$

где  $\varepsilon_M$  – ошибка определения местоположения;  $\tilde{m}$  – оценка МО бокового отклонения ВС от линии экстраполяции, полученная с использованием данных АЗН-В.

Величина  $\varepsilon_M$  вычисляется как:

$$\varepsilon_M = \sigma_{\tilde{m}} \operatorname{arg} \Phi^*\left(\frac{1+\beta}{2}\right), \quad (9)$$

где  $\operatorname{arg} \Phi^*(x)$  – функция обратная функции  $\Phi^*(x)$ .

При вычислении  $\varepsilon_M$  пользуются специальными таблицами [21], где приводятся значения величины:

$$t_\beta = \operatorname{arg} \Phi^*\left(\frac{1+\beta}{2}\right), \quad (10)$$

где  $t_\beta$  – коэффициент Стьюдента.

Тогда, выраженный через величину  $t_\beta$ , доверительный интервал равен:

$$I_\beta = (\tilde{m} - t_\beta \sigma_{\tilde{m}}; \tilde{m} + t_\beta \sigma_{\tilde{m}}). \quad (11)$$

На следующем этапе необходимо выполнить оценку дисперсии ошибки местоположения. Доверительный интервал для дисперсии строится аналогичным способом. Несмещенная оценка дисперсии определяется как [18]:

$$\tilde{D} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \tilde{m})^2}{n-1}, \quad (12)$$

где  $n$  – число наблюдений.

Значение  $\tilde{m}$  может быть найдено по формуле (4). СКО оценки дисперсии вычисляется в соответствии с выражением [18, 21, 4]:

$$\sigma_{\tilde{D}} \approx \sqrt{\frac{2}{n-1} \tilde{D}}. \quad (13)$$

Доверительный интервал может быть определен как:

$$I_{\beta} = (\tilde{D} - t_{\beta} \sigma_{\tilde{D}}; \tilde{D} + t_{\beta} \sigma_{\tilde{D}}). \quad (14)$$

В соответствии с работами [1, 4], выполним вычисление требуемого количества отсчетов (наблюдений), необходимых для выполнения оценки случайной величины с заданной точностью. Доверительный интервал определяется выражением [7]:

$$I_{\beta} = (\tilde{m} - \varepsilon; \tilde{m} + \varepsilon), \quad (15)$$

где  $\varepsilon_M$  – ошибка определения местоположения;  $\tilde{m}$  – оценка математического ожидания бокового отклонения ВС от линии экстраполяции, полученная с использованием данных АЗН-В.

С учетом того, что ошибки определения местоположения ВС имеют нормальное распределение [3], получим:

$$\varepsilon_M = t_{\beta} \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}. \quad (16)$$

Тогда доверительный интервал может быть записан как [7]:

$$I_{\beta} = (\tilde{m} - t_{\beta} \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}; \tilde{m} + t_{\beta} \sqrt{\frac{\tilde{D}}{n}}). \quad (17)$$

В таблице 1 приведены значения величины  $t_{\beta}$  для различных значений надежности  $\beta$  при количестве измерений 5, 10, 15 и 20 [7, 21].

Таблица 1

**Величина  $t_{\beta}$  для различных значений надежности  $\beta$**

| Количество измерений $n$ | Величина $t_{\beta}$ для надежности $\beta = 0,9$ | Величина $t_{\beta}$ для надежности $\beta = 0,95$ | Величина $t_{\beta}$ для надежности $\beta = 0,99$ | Величина $t_{\beta}$ 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   |

Рассмотрим условие принадлежности к области строба оценки МО и дисперсии случайной величины. При подтверждении данных АЗН-В необходимо выполнение условия принадлежности получаемых координат ВС к области строба и заданной схеме маневрирования. Оценка ошибки местоположения выполняется относительно построенной траектории с учетом скорости движения ВС.

Условие принадлежности области строба можно задать как разность местоположения центра строба и оценки МО ошибки местоположения с учетом ошибки определения местоположения ВС. Математически условие принадлежности можно записать как:

$$|M - \tilde{m} - \varepsilon_M| \leq \frac{R}{2}, \quad (18)$$

где  $M$  – экстраполированные координаты строба;  $R$  – заданный радиус области строба.

Примем координаты центра строба за начало прямоугольной декартовой системы координат на плоскости  $Oxy$  (0,0). Точка  $M$  с координатами (0,0) находится на траектории, заданной схемой маневрирования. Тогда можно записать:

$$|M - \tilde{m} - \varepsilon_M| = |-\tilde{m} - \varepsilon_M| = |\tilde{m} + \varepsilon_M| \leq \frac{R}{2}, \quad (19)$$

где  $\varepsilon_M$  – ошибка определения местоположения,  $\varepsilon_M < \frac{R}{2}$ ;

$\tilde{m}$  – оценка математического ожидания бокового отклонения ВС от линии экстраполяции, полученная с использованием данных от АЗН-В;  $R$  – заданный радиус области строба.

Рассмотрим подробнее выражения (16) и (17). Значения ошибки определения местоположения  $\varepsilon_M$  зависят от величины  $t_{\beta}$ , оценки дисперсии и количества наблюдений. При  $\tilde{D} \approx D$ , принимаем, что уровень надежности  $\beta$  – величина условно-постоянная и задается при выполнении вычислений. С увеличением количества наблюдений снижается ошибка определения местоположения, иными словами, повышается точность оценки  $\tilde{m}$ . Поэтому целесообразно выполнять оценку случайной величины в несколько этапов с разным количеством наблюдений для различных значений надежности.

На первом этапе,  $\beta$  задается равной 0,9...0,95. При первичном выполнении условия принадлежности (19), для любого количества наблюдений появляется индикация о наличии наблюдаемой цели в стробе с заданным начальным уровнем надежности, то есть первичная метрика доверия. На втором этапе выполняется параллельное вычисление принадлежности получаемых от ВС координат к области стробирования с большим количеством наблюдений, следовательно, и с большей надежностью, то есть итоговая метрика доверия. Назовем эти этапы первичным вычислением и процессом уточнения.

Первичное вычисление предполагает проведение оценки за малое время, с небольшим количеством наблюдений, но меньшим уровнем надежности. При выполнении процесса уточнения продолжается вычисление оценки для большего количества наблюдений, включая значения первичного процесса (с увеличением количества наблюдений уменьшаются значения величины  $t_{\beta}$ ) до достижения требуемой надежности. При ее достижении выводится информация об уровне надежности оценивания принадлежности местоположения ВС к области строба. Разделение на процессы определения принадлежности координат ВС к области строба позволит снизить количество требуемых отсчетов для вывода информации об отсутствии ВС в стробе, пусть и с меньшей надеж-

ностью. Для уровня надежности 0,95 информация об отсутствии ВС в стробе может быть принята как достоверная, так как противоположное событие – наличие ВС в стробе будет являться маловероятным, то есть не будет соответствовать требованиям определения местоположения с заданной вероятностью.

Выполним вычисление требуемого количества наблюдений. Для системы ГНСС, рассчитанная в [22] потенциальная погрешность определения координат потребителя в горизонтальной плоскости составила 9 м. Для ВС, с учетом высокой скорости движения и воздействия неблагоприятных факторов примем среднее значение СКО определения координат в горизонтальной плоскости 50 м.

Выполним расчет по представленным в методике [4, 7] формулам. Выразим  $n$  из выражения (16) как:

$$n \geq \frac{t_{\beta}^2 \cdot \tilde{D}}{\varepsilon^2} = \left( \frac{t_{\beta} \sigma[\tilde{m}]}{\varepsilon} \right)^2. \quad (20)$$

С учетом  $\varepsilon_M < \frac{R}{2} = 75$ , а также принятого значения СКО 50 м, коэффициент Стьюдента для 5 наблюдений составит  $t_{\beta} = 2,776$ . Требуемое количество наблюдений равно  $n \geq \left( \frac{2,776 \cdot 50}{75} \right)^2 = 3,42$ .

Выполним расчет количества требуемых измерений, при различных уровнях надежности, для близких к условию принадлежности к области строба значений СКО. Условие принадлежности к области строба принято равным 75 м. Результаты вычислений представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Количество требуемых измерений при различных значениях надежности**

| Надежность $\beta$ | СКО определения местоположения, м | Коэффициент Стьюдента | Требуемое количество наблюдений $n$ |
|--------------------|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 0,95               | 50                                | 3,1                   | 5                                   |
|                    | 70                                | 2,5                   | 6                                   |
| 0,99               | 50                                | 3,707                 | 7                                   |
|                    | 70                                | 3,                    | 10                                  |
| 0,999              | 50                                | 4,7                   | 11                                  |
|                    | 70                                | 4,                    | 15                                  |

Сформулируем условие принадлежности области строба для оценки дисперсии. Выполнение условия (19) означает, что оценка математического ожидания совместно с допустимой ошибкой не превышают половины радиуса области строба. Тогда, оценка дисперсии не должны превышать  $(R/2)^2$ . Выполнение указанных условий гарантирует, что оцениваемая случайная величина находится в области строба. Математически условие можно записать как:

$$|\tilde{D} + \varepsilon_D| \leq D_{ГР}, \quad (21)$$

где  $\varepsilon_D$  – точность оценки дисперсии измеренных значений отклонения ВС от построенной траектории;  $D_{ГР}$  – граничное значение оценки дисперсии,  $D_{ГР} = (R/2)^2$ .

Примем дополнительное условие [4]:

$$\varepsilon_D = \sigma_{\tilde{D}} t_{\beta} \leq D_{ГР}, \quad (22)$$

где  $\sigma_{\tilde{D}}$  – СКО оценки дисперсии.

Оценка дисперсии рассчитывается с помощью выражения (12). Принимая ошибку определения местоположения нормально распределенной случайной величиной [3], СКО оценки дисперсии можно вычислить по формуле (13) [4, 7, 18].

С учетом дополнительного условия (22) можно записать:

$$\sqrt{\frac{2}{n-1}} \tilde{D} t_{\beta} \leq D_{ГР}. \quad (23)$$

Тогда требуемое количество наблюдений может быть найдено как [4]:

$$n \geq \left\lceil 1 + 2 \left( \frac{\tilde{D} t_{\beta}}{D_{ГР}} \right)^2 \right\rceil \quad (24)$$

Выполним расчет количества требуемых измерений для СКО, близких к значению условия принадлежности к области строба. При выполнении расчетов, СКО определения местоположения принята равной 70 м. Данное значение, согласно [23], соответствует порогу основного отказа ГЛОНАСС по критерию превышения мгновенной погрешности псевдодалности в наихудшей точке.

Граничным значением оценки дисперсии принята соответствующая границе условия принадлежности к области строба величина  $D_{ГР} = (R/2)^2$ . Результаты представлены в таблице 3.

Таблица 3

**Количество требуемых наблюдений при оценке дисперсии для различных значений надежности**

| Надежность $\beta$ | Коэффициент Стьюдента | Требуемое количество наблюдений $n$ |
|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|
| 0,95               | 2,306                 | 10                                  |
| 0,99               | 2,977                 | 15                                  |
| 0,999              | 3,792                 | 23                                  |

Исходя из полученных в таблице 3 значений, примем требуемое количество наблюдений равным 24, что соответствует 12 секундам реального времени, при условии передачи 2 сообщений в секунду [3]. Для требуемого количества наблюдений определим верхнюю границу оценки дисперсии. Точность оценки дисперсии может быть найдена как:

$$\varepsilon_D = \sigma_{\tilde{D}} t_{\beta}. \quad (25)$$

Тогда с учетом условия (21), определим значения верхней границы оценки дисперсии определения местоположения:



$$\tilde{D}_{ГР}^B \leq D_{ГР} - \sqrt{\frac{2}{n-1}} \tilde{D} t_{\beta}, \quad (26)$$

где  $\tilde{D}_{ГР}^B$  – верхняя граница оценки дисперсии определения местоположения;  $D_{ГР}$  – граничное значение оценки дисперсии;  $\tilde{D}$  – оценка дисперсии.

Результаты вычислений для различных уровней надежности и количества наблюдений  $n = 24$ , представлены в таблице 4. Полученные результаты подтверждают адекватность принятой ранее средней величины СКО определения местоположения ВС 50 м.

Таблица 4

**Верхняя граница оценки СКО определения местоположения**

| Надежность $\beta$ | Коэффициент Стьюдента | Верхняя граница оценки СКО определения местоположения ВС |
|--------------------|-----------------------|--|
| 0,95               | 2,069                 | 64,03  |
| 0,99               | 2,807                 | 59,63  |
| 0,999              | 3,768                 | 53,36  |

**Анализ возможности применения методики подтверждения данных АЗН-В в аэродромной зоне**

Пусть радиус строба составляет 150 м, исходя из требований к точности средств наблюдения [16]. При этом, строб представляет собой окружность, центр которой имеет координаты точек схемы маневрирования. Принадлежность к области строба значений оцениваемых величин МО и дисперсии ошибки определения местоположения ВС находится из условий:  $|\tilde{m} + \varepsilon_M| \leq R/2$  и  $|\tilde{D} + \varepsilon_D| \leq D_{ГР}$ , где  $D_{ГР} = (R/2)^2$ .

Выполнение указанных условий означает, что оцениваемые величины находятся в пределах строба с заданной вероятностью (надежностью  $\beta$ ).

Применение методики подтверждения данных АЗН-В в аэродромной зоне выполняется согласно следующему алгоритму:

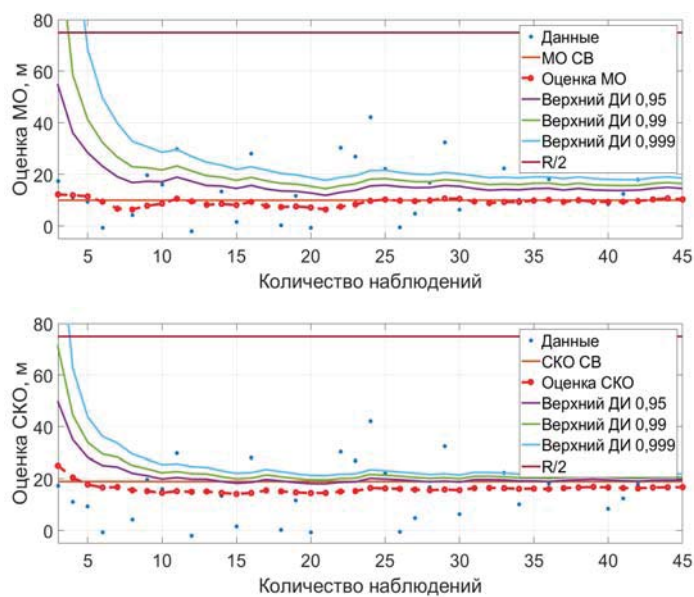
- 1) При подходе к ВС к точке выполнения маневра АС УВД инициирует выполнение расширенного запроса режима S вторичным радиолокатором.
- 2) В ответ на запрос бортовой ответчик передает сообщение режима S с текущими координатами и дополнительной информацией о намерениях.
- 3) По полученным данным выполняется экстраполирование траектории ВС, при этом проверяется, чтобы полученные от бортового ответчика координаты и координаты схемы маневрирования принадлежали построенной траектории.
- 4) Относительно построенной траектории выполняется интервальная оценка математического ожидания и СКО ошибок местоположения ВС.
- 5) По результатам выполненной оценки выполняется проверка условий принадлежности к области строба для различных значений надежности  $\beta$ .
- 6) При выполнении условий информация от АЗН-В считается достоверной. В случае, если условия не выполняются, то координаты считаются не достоверными и диспетчеру

выводится информация о невозможности применения АЗН-В в качестве основного средства наблюдения и о необходимости подтверждения данных.

С помощью программного обеспечения MATLAB было выполнено имитационное моделирование оценки значений математического ожидания и СКО нормально распределенных ошибок местоположения ВС (графики оценки МО и СКО представлены на рис. 1-7). При определении условия принадлежности к области строба было использовано граничное значение СКО 75 м. Исходные данные задавались для МО 10...48 м, для СКО 20...100 м.

По графикам на рисунке 1 видно, что для доверительного интервала (ДИ) 0,999 оценка выполняется в пределах 5 наблюдений, то есть в течение времени, не превышающем 3 секунд. Необходимо отметить, что выбранное при моделировании значение погрешности определения координат превышает порог надежности системы ГЛОНАСС [23, 24], таким образом, такая погрешность будет обнаружена и идентифицирована с требуемой точностью. Значения меньшей погрешности, при одинаковой систематической погрешности, учитывая зависимость от входных данных СКО и количества наблюдений, будут также идентифицированы.

При той же систематической погрешности (МО 10 м) рассмотрим случай, когда СКО входных данных приближается к верхнему граничному значению и составляет 50 м (рис. 2).



**Рис. 1.** Результаты моделирования при исходных данных: МО 10 м, СКО 20 м

По графикам на рисунке 2 видно, что, оценка СКО с доверительным интервалом 0,999 может быть выполнена за 22 наблюдения, что соответствует 11 секундам реального времени.

На рисунке 3 представлены результаты другой итерации моделирования для тех же исходных данных (МО 10 м, СКО 50 м). Видно наличие выбросов оценки СКО после 9 наблюдений, что говорит о возможной нестабильной работе алгоритма при наличии погрешности определения местоположения ВС, приближающейся к верхнему граничному значению.

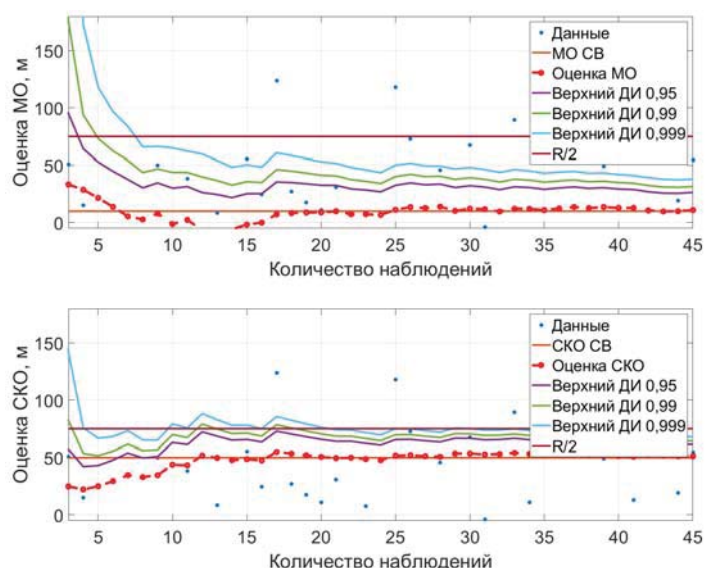


Рис. 2. Результаты моделирования при исходных данных: MO 10 м, SKO 50 м

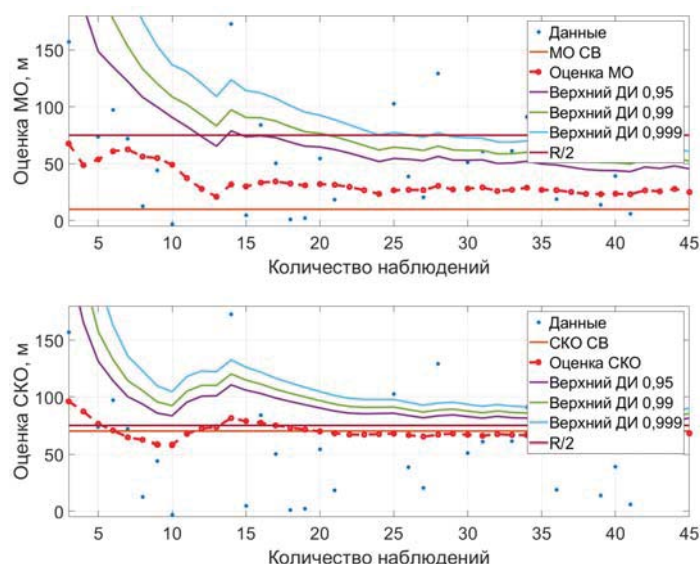


Рис. 4. Результаты моделирования при исходных данных: MO 10 м, SKO 70 м

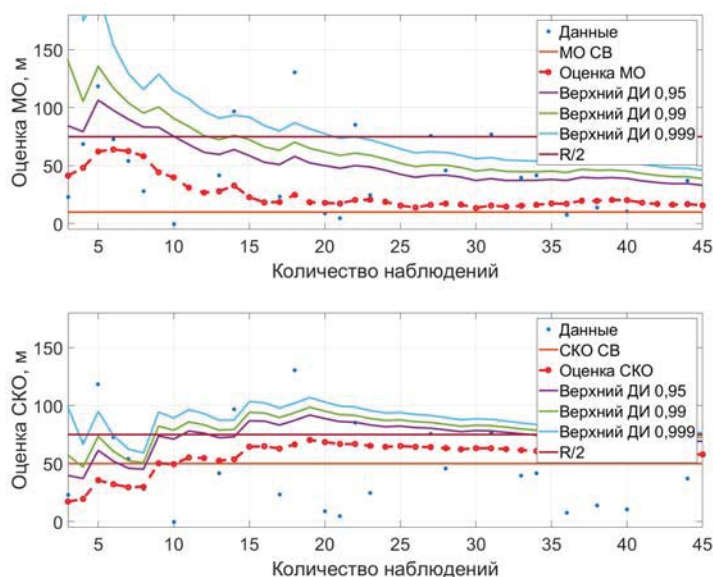


Рис. 3. Результаты моделирования при исходных данных: MO 10 м, SKO 50 м (пример невыполнения условия принадлежности)

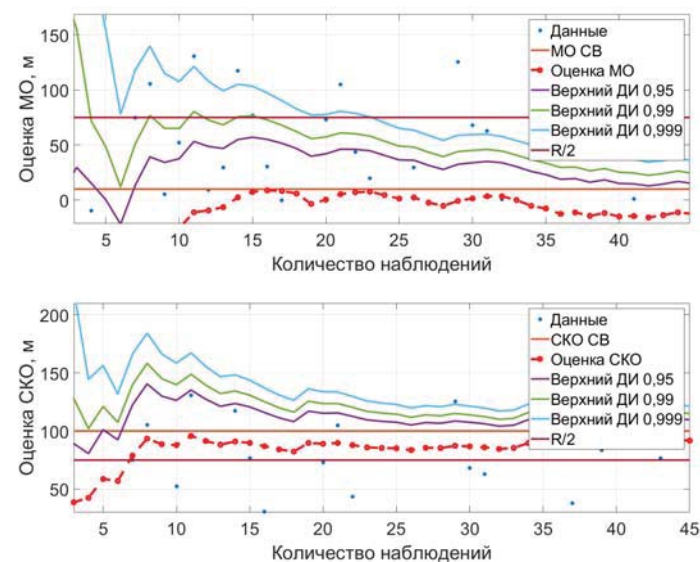


Рис. 5. Результаты моделирования при исходных данных: MO 10 м, SKO 100 м

Представляет интерес случай, когда величина погрешности близка к половине радиуса области строга, а в сумме значения MO и SKO превышают размеры половины строга. Значение систематической ошибки составляет 10 м. Значение SKO входных данных соответствует значению порога основного отказа ГЛОНАСС и составляет 70 м [23].

По графикам рисунка 4 видно, что оценка случайной величины не удовлетворяет условиям. При таком сценарии на рабочем месте диспетчера должна сработать сигнализация о невозможности применения АЗН-В в качестве основного средства наблюдения и о необходимости подтверждения данных.

На рисунке 5 представлен случай незначительной систематической (MO 10 м) и значительной SKO, равной 100 м.

По графикам рисунка 5 видно, что условие принадлежности к области строга, при оценке MO с доверительным интервалом 0,999, выполняется после 23 наблюдений. При оценке SKO необходимое условие не выполняется. Таким образом, АС УВД на рабочем месте диспетчера должна быть выведена информация, что получаемые от АЗН-В данные (координаты ВС) не достоверны и необходимо выполнить подтверждение получаемых данных АЗН-В другими способами.

Рассмотрим случай исходных данных: MO 20 м, SKO 45 м (рис. 6). Для данного случая видно, оценка SKO может быть выполнена по 11 наблюдениям, что соответствует 6 секундам реального времени. Следует также отметить, что после 25 наблюдений наблюдается выброс (превышение значения условия принадлежности к области строга) для доверительных интервалов 0,999 и 0,99.



Невыполнение условия принадлежности на интервале после 25 наблюдений свидетельствует об большой величине СКО входных данных. Индикация уровня надежности для оцениваемых значений позволит оперативно сигнализировать диспетчеру о снижении уровня доверия к координатам ВС, полученных от станции АЗН-В.

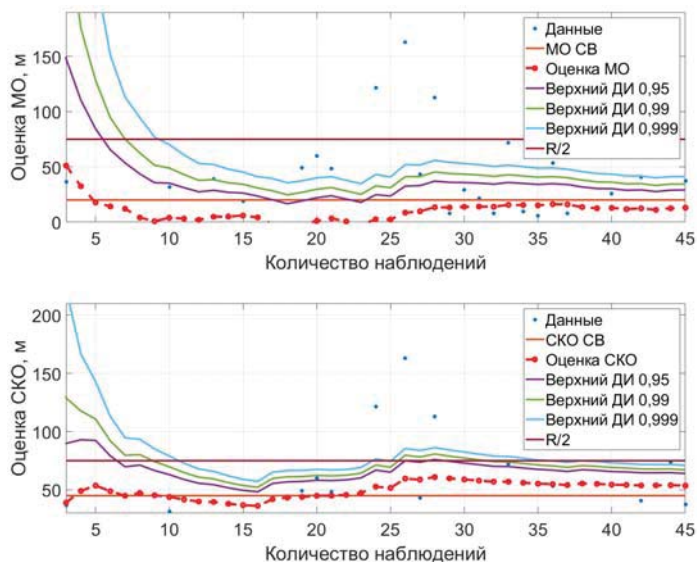


Рис. 6. Результаты моделирования при исходных данных: MO 20 м, СКО 45 м

Рассмотрим случай среднего значения СКО (48 м) при достаточно большой систематической ошибке, MO 48 м (рис. 7).

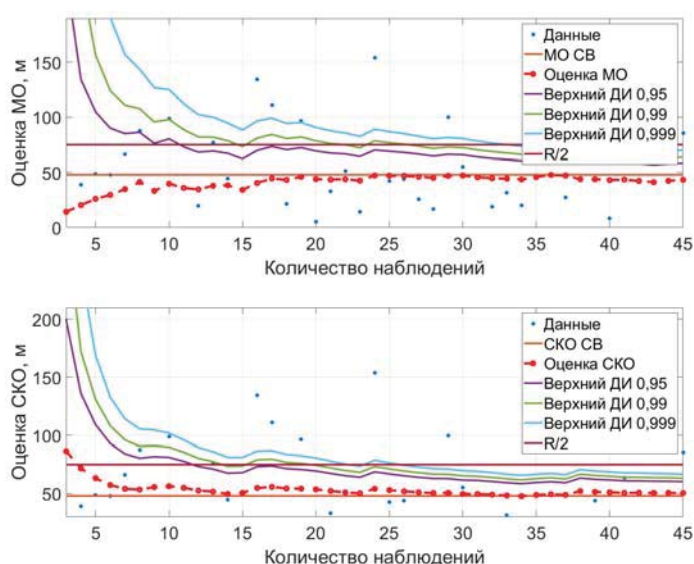


Рис. 7. Результаты моделирования при исходных данных: MO 48 м, СКО 48 м

По графикам рисунка 7 видно, что оценка СКО может быть выполнена за 20 наблюдений, что соответствует 10 секундам реального времени. При оценке МО условие принадлежности к области строга выполняется преимущественно только для доверительного интервала 0,95.

Для значений ДИ 0,99 и 0,999 условие либо выполняется для большого количества наблюдений, либо не выполняется на всем интервале наблюдений.

### Выводы

Предложена методика подтверждения данных АЗН-В с применением стробирования, которая, может быть применена при использовании станции АЗН-В в качестве основного источника информации при обеспечении управления воздушным движением в районе аэродрома с низкой интенсивностью полетов. Методика подтверждения данных может быть использована для автоматического контроля данных АЗН-В, что позволит снизить нагрузку на диспетчера. Методика базируется на методе оценки достоверности информации АЗН-В в системе наблюдения и контроля аэродромного движения. Новизной предложенной методики является использование метода стробирования при обработке информации АЗН-В.

С использованием программного обеспечения MATLAB в работе была выполнена оценка МО и СКО нормально распределенных ошибок местоположения ВС. Результаты моделирования показывают, что при нормальных условиях функционирования спутниковых систем навигации (МО 10 м, СКО 20 м) возможно получение требуемых оценок и подтверждения данных за 5 наблюдений, что соответствует 3 секундам реального времени.

При возрастании СКО до 50 м оценка с ДИ 0,999 может быть выполнена примерно за 22 наблюдения, что соответствует 11 секундам реального времени. Моделирование показало, что при большом СКО возможны ситуации нестабильной работы алгоритма, что подтверждается наличием выбросов после 9 наблюдений. При этом условие принадлежности к области строга перестает выполняться, а на рабочем месте диспетчера должна сработать сигнализация о необходимости подтверждения данных АЗН-В. Таким образом, можно говорить о том, что предложенная методика позволит обнаружить увеличение погрешности определения местоположения ВС. Для исходных данных МО 10 м и СКО 70 м условие принадлежности к области строга не выполняется и на рабочем месте диспетчера должна сработать сигнализация о необходимости подтверждения координат ВС, полученных от наземной станции АЗН-В.

Предлагаемая методика предлагается к применению прежде всего на аэродромах с низкой интенсивностью воздушного движения, что является характерной особенностью аэродромов МВЛ, расположенных в АЗРФ.

### Литература

1. О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года: утв. Указом Президента РФ от 26.10.2020 № 645. – 40 с.
2. Global a navigation plan 2016-2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. – 142 p.
3. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2017. – 372 p.
4. Плясовских А.П., Рубцов Е.А. Метод оценки достоверности информации АЗН-В в системе наблюдения и контроля аэродромного движения // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации. 2019. № 3(24). С. 90-102.

5. Санкт-Петербургский «Альманах» // Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. дата обращения 21.01.2021).
6. Поставка АРЛК «Лира-А10» в аэропорт «Центральный» (г. Саратов) // СКБ «Контур». URL: <https://zakupki.kontur.ru/31503146346>. (дата обращения 21.01.2021).
7. *Плясовских А.П., Рубцов Е.А.* Теоретическое обоснование подтверждения достоверности информации о местоположении объекта на рабочей площади аэродрома // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 3. С. 32-40. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-3-32-40.
8. Regulation 1207/2011. Requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the SES // Official journal of the European Union, 2011. Pp. 35-52.
9. Regulation 1028/2014. Requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the SES // Official journal of the European Union, 2014. Pp. 7-8.
10. European Supplementary Procedures (SUPPS). Doc. 7030 – 5th Edition - ICAO, 2008 - 300 p.
11. Самолетные ответчики // Навигатор. URL: <https://navigat.ru/products/samoletnye-otvetchiki>. (дата обращения 21.01.2021).
12. А России книга 4 «Аэродромы класса Г, Д, Е, вертодромы и посадочные площадки Российской Федерации» // ЦАИ. URL: <http://www.caiga.ru/common/AirClassGDE/?lang=ru>. (дата обращения 21.01.2021).
13. *Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В.* Автоматизированные системы управления воздушным движением: новые информационные технологии в авиации. СПб., 2004. 446 с.
14. Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter. Doc 9871 AN/460, Second Edition. ICAO 2012. 352 p.
15. Сертификационные требования (Базис) к многопозиционным системам наблюдения широкозонным [согл. письмом Департамента программ развития Министерства транспорта Российской Федерации №08-04/5228-ИС от 15 мар. 2018 г.], 10 с.
16. 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.
17. Aeronautical telecommunication. Vol. IV. Surveillance and collision avoidance systems. Fifth Edition. ICAO, 2014. 216 p.
18. *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.
19. *Сарайский Ю.Н., Алешков И.И.* Аэронавигация. Часть I. Основы навигации и применение геотехнических средств: Учебное пособие. 2-е изд. Университет ГА. С-Петербург, 2013. 298 с.
20. *Чехов И.А.* Воздушная навигация. Выполнение навигационных расчетов: пособие по проведению учебной практики. М.: МГТУ ГА, 2016. 32 с.
21. *Корн Г., Корн Т.* Справочник по математике (для научных работников и инженеров). М.: изд. «Наука», 1974. 832 с.
22. *Тяпкин В.Н., Гарин Е.Н.* Методы определения навигационных параметров подвижных средств с использованием спутниковой радионавигационной системы ГЛОНАСС: монография. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. 260 с.
23. Стандарт эксплуатационных характеристик открытого сервиса. Редакция 2.2. Королев, 2019. 59 с.
24. Глобальная навигационная спутниковая система. Параметры радионавигационного поля. Технические требования и методы испытаний. ГОСТ 32454-2013. М.: Стандартинформ, 2014. 20 с.

## CONFIRMATION OF ADS-B DATA IN THE AERODROME TRAFFIC ZONE BY GATING METHOD

**Andrey S. Kalintsev**, Arkhangelsk air traffic management center, North-West Air Navigation branch, "State Air Traffic Management Corporation of the Russian Federation", Mezen, Russia, [kas4job@gmail.com](mailto:kas4job@gmail.com)

**Evgeny A. Rubtsov**, Saint Petersburg State University of Civil Aviation, Saint Petersburg, Russia, [rubtsov.spb.guga@rambler.ru](mailto:rubtsov.spb.guga@rambler.ru)

**Alexandr P. Plyasovskih**, All-Russian scientific research institute of radio equipment (JSC VNIIRA), Russia, [vnaira@yandex.ru](mailto:vnaira@yandex.ru)

### Abstract

The low cost of ADS-B stations in comparison with radars and multi-position surveillance systems allows to consider them as promising means, including for the airfield zone. However, at present, the ICAO does not recommend the use of the ADS-B as the main means of observation, since confirmation of the accuracy of the received coordinate information is required. The article presents a method of algorithmic confirmation of the ADS-B data, while providing flights in the aerodrome traffic zone. It is suggested to use method of the gating to estimate the fidelity of the ADS-B data by selecting the area of space around the extrapolated coordinate of the aircraft. According to the required flight procedure, request of the enhanced surveillance Mode S is transmitted to the aircraft. On the coordinates of assigned track, according to the maneuvering scheme, aircraft trajectory is built, relative to which the calculation of location errors is performed. Estimation of the mathematical expectation and the mean square deviation of the location error is performed for different levels of reliability. Based on the size of the gate area, a check is performed for compliance of the obtained interval estimates with the data validity condition. The check is performed sequentially for reliability levels 0.9, 0.95, and 0.999. On exit the values of estimate of the error beyond the limit of tolerance for a target level of reliability, information about the unreliability of the received data is displayed, which allows to detect large deviations of the measured coordinates for a smaller number of observations. When performing imitation modelling for the obtained data were set various inaccuracy values: the mathematical expectation from 10 to 48 m and the mean square deviation from 20 to 100 m. The error estimation for the reliability level of 0.999 required from 5 to 22 observations, which corresponds to a time interval of 3 to 11 s real time. At values systematic error of 10 m and mean square deviation of 70 m, the accepted coordinates will be identified as untrusted and will display the information on prohibiting the use of ADS-B and necessary to use other surveillance equipment.

**Keywords:** flight safety, aviation surveillance, ADS-B, interval estimation, extended surveillance of mode S, gating, aerodrome traffic zone

### References

1. On the Strategy for the development of the Arctic zone of the Russian Federation and ensuring national security for the period up to 2035: approved. By the Decree of the President of the Russian Federation of October 26, 2020 no. 645. Moscow, 2020. 40 p.
2. Global air navigation plan 2016-2030. Doc. 9750 AN/963, Fifth Edition. ICAO, 2016. 142 p.
3. Aeronautical Surveillance Manual. Doc. 9924 AN/474. ICAO, 2017. 372 p.
4. Plyasovskih A.P., Rubtsov E.A. Reliability estimation method of ADS-B information for surface movement guidance and control system // Vestnik Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 2019. No. 3(24). P. 90-102.
5. Saint-Petersburg's "Almanac". Aviation Explorer. URL: <https://www.aex.ru/docs/3/2018/2/5/2714>. (date of the application 21.01.2021).
6. Equipment supply Airport Surveillance Radar for airport "Central" (Saratov) // SCB "Kontur". URL: <https://zakupki.kontur.ru/31503146346>. (date of the application 21.01.2021).
7. A.P. Plyasovskih, E.A. Rubtsov. 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. P. 32-40.
8. Regulation 1207/2011. Requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the SES. *Official journal of the European Union*, 2011. P. 35-52.
9. Regulation 1028/2014. Requirements for the performance and the interoperability of surveillance for the SES. *Official journal of the European Union*, 2014. P. 7-8.
10. EUR Regional Supplementary Procedures (SUPPS). Doc. 7030. 5th Edition - ICAO, 2008. 300 p.
11. Aircraft transponders. *Navigator*. URL: <https://navigat.ru/products/samoletnye-otvetchiki/> (accessed 18.01.2020) или Navigator, available at: <https://navigat.ru/products/samoletnye-otvetchiki>. (date of the application 21.01.2021).
12. AIP Russia book 4 "Aerodromes of class G, D, E, heliports and landing sites of the Russian Federation". CAI. URL: <http://www.caiga.ru/common/AirClassGDE/?lang=ru> (date of the application 21.01.2021).
13. R.M. Akhmedov, A.A. Bibutov, A.V. Vasil'ev. Automated air traffic control systems: new information technologies in aviation. Saint Petersburg: Politekhnik 2004. 446 p.
14. Technical Provisions for Mode S Services and Extended Squitter. Doc 9871 AN/460, Second Edition. ICAO 2012. 352 p.
15. Certification Requirements (Basis) for wide area 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. 10 p.
16. 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.
17. Aeronautical telecommunications. Vol. IV. Surveillance and collision avoidance systems. Fifth Edition. ICAO, 2014. 216 p.
18. E.S. Ventzel, L.A. Ovcharov. Probability theory and its engineering applications. Textbook for technical colleges. 2nd edition. Moscow: High school, 2000. 480 p.
19. Yu.N. Saraiskii, I.I. Aleshkov Air navigation. Part I. Basics of navigation and the use of geotechnical tools: Textbook. 2nd ed. Saint Petersburg State University of Civil Aviation, 2013. 298 p.
20. I.A. Chekhov. Air navigation. Carrying out navigation calculations: a guide to conducting educational practice. Moscow, Moscow State Technical University of Civil Aviation, 2016. 32 p.
21. G. Korn, T. Korn. Mathematical handbook (for scientists and engineers). Moscow: publishing house "Nauka", 1974. 832 p.
22. V.N. Tyapkin, Ye.N. Garin Methods for determining the navigation parameters of mobile facilities using the GLONASS satellite radio navigation system: Krasnoyarsk: Siberian Federal University, 2012. 260 p.
23. Open Service Performance Standard. Edition 2.2. Korolev, 2019. 59 p.
24. Global navigation satellite system. Parameters of radionavigation field. Technical requirements and test methods, GOST 32454-2013. Moscow, Standarty, 2014. 20 p.