

ТРАНСПОРТ

05.22.01 – Транспортные и транспортно-технологические системы страны, ее регионов и городов, организация производства на транспорте;

05.22.08 – Управление процессами перевозок;

05.22.13 – Навигация и управление воздушным движением;

05.22.14 – Эксплуатация воздушного транспорта

УДК: 656.021

DOI: 10.26467/2079-0619-2019-22-4-8-20

МОДЕЛИРОВАНИЕ «ТОНКОЙ» СТРУКТУРЫ ВЕРОЯТНОСТНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕВЯЗОК В ПОКАЗАНИЯХ АЗН-В И ВОРЛ. НЕКОМПЕНСИРОВАННАЯ ЗАДЕРЖКА

В.И. АЛИПОВ¹, В.Л. КУЗНЕЦОВ²

¹*Филиал ГосНИИГА «Аэронавигация», г. Москва, Россия*

²*Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия*

Предстоящий переход на новое поколение элементов системы управления воздушным движением – АЗН-В – поставил ряд задач, связанных с подтверждением целостности получаемых данных, с определением их точностных характеристик. Используемые до настоящего времени системы радиолокационного наблюдения хорошо зарекомендовали себя, и вопрос преемственности, естественно, ассоциируется с сопоставлением данных этих двух регистрирующих систем. Невязки (различия) в показаниях АЗН-В и радиолокационных данных являются дополнительным источником информации о надежности и точности их измерений. Здесь вопрос заключается в том, как извлечь эту информацию. В статье анализируются устойчивые особенности вероятностного распределения (гистограммы) этих невязок, полученных в «Филиале ГосНИИ ГА «Аэронавигация» при анализе наблюдений за полетами ВС в московском регионе. Наличие асимметрии в этих гистограммах предлагается трактовать как присутствие некомпенсированной задержки при передаче данных АЗН-В, характерное для определенной доли ВС в воздушном пространстве России. Акцент на «территориальную принадлежность» эффекта связан с тем, что о зарубежных работах, посвященных рассматриваемому феномену, нам неизвестно. В соответствии с высказанной гипотезой была построена математическая модель процедуры измерения, где в качестве параметров, подлежащих оценке, были выбраны: среднее значение величины некомпенсированной задержки и ожидаемая доля ВС, характеризующая этим дефектом. Значения искомых параметров были найдены из условия минимума «расстояния» между экспериментальной гистограммой и соответствующей модельной аналитической зависимостью. Проведенные оценки показали, что порядка 30 % ВС из общего числа наблюдавшихся передают свои координаты с дополнительной средней ошибкой в 75 м.

Ключевые слова: невязки данных АЗН-В и ВОРЛ, асимметрия распределения, некомпенсированная задержка.

ВВЕДЕНИЕ

Система автоматического зависимого наблюдения в вещательном режиме (АЗН-В) является одной из наиболее перспективных технологий наблюдения за воздушной обстановкой. Знание с высокой точностью и частотой обновления положений воздушных судов (ВС) повышает безопасность и эффективность управления воздушным движением. В системе АЗН-В воздушное судно транслирует информацию о своем положении, определяемом на борту с помощью GNSS-приемника. Предполагается, что к 2020 году эта система будет принята в Европе, в Соединенных Штатах и в России как обязательная система наблюдения за воздушной обстановкой, применяемая в целях выдерживания норм горизонтального эшелонирования – минимальных расстояний между ВС.

АЗН-В представляет собой элемент следующего поколения системы УВД, и поэтому крайне важным становится вопрос об обеспечении достаточного уровня качества его данных. Этим определяется повышенный интерес к изучению точностных характеристик новой системы наблюдений^{1,2} [1–3].

Высокая точность определения пространственного положения ВС с помощью GNSS-приемника, к сожалению, отчасти нивелируется в системах передачи и приема этой информации (транспондерах) как на земле, так и на борту участников воздушного движения: пользователь АЗН-В не может получать в полной мере точные данные, поскольку передаваемые наземной станцией АЗН-В данные о местоположении ВС не содержат момента времени регистрации этого положения. Наземная станция АЗН-В может регистрировать только время прибытия сообщения, измеренное по собственным часам.

Таким образом, общее время задержки информации о местоположении ВС – интервал времени между моментом измерения местоположения ВС и моментом получения этого сообщения пользователем АЗН-В – один из важных факторов, ограничивающих *производительность* системы, поскольку общая задержка напрямую влияет на точность определения пространственных координат ВС. Учитывая высокую скорость ВС, нетрудно убедиться в том, что большие задержки становятся причиной серьезных координатных ошибок.

В работах³ [4] общая задержка оценивалась путем суммирования значений, регулируемых международными стандартами системы АЗН-В. Однако фактическое значение этой общей задержки сложно измерить и оценить. Это можно сделать, например, фиксируя данные положения на борту ВС и сравнивая их затем с данными наземной системы АЗН-В [5]. Но этот подход можно реализовать только после установки специального оборудования на борту ВС. Единичные же измерения на специально оборудованных бортах не позволяют провести оценку точности для всей совокупности ВС, задержки специфичны для каждого из них.

Следует отметить, что в настоящий момент для наблюдения за воздушной обстановкой во всем мире используются преимущественно радиолокационные станции – обычно система вторичных обзорных радиолокаторов (ВОРЛ), эффективность работы которых доказана. Поэтому часто при анализе целостности данных АЗН-В опираются на их сравнение с данными радиолокационных наблюдений [3, 5–8].

В этой работе мы проведем анализ экспериментальных данных – гистограмм вероятностного распределения невязок (разностей) координатных положений ВС по данным АЗН-В и ВОРЛ, полученных в Филиале ГОСНИИ ГА «Аэронавигация»⁴. Структура этого распределения при наблюдении невязок, измеренных вдоль направления полета ВС, имеет устойчивую аномалию – некоторую специфическую асимметрию. Как показывают измерения, проведенные в нескольких регионах России, эти особенности имеют устойчивый характер.

На основании моделирования процедуры сравнения данных наблюдений и гипотезы о том, что бортовая аппаратура ряда ВС лишь частично компенсирует указанную задержку, мы постараемся оценить среднюю величину этой некомпенсированной задержки и, соответственно, долю таких ВС.

¹ RTCA SC-186. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TIS-B); RTCA/DO-260B, Washington DC. 2009. December 2; Appendix U. Total and Uncompensated Latency 1090MHz Extended squitter ADS-B.

² Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Enhanced Visual Separation on Approach (ATSA-VSA), RTCA DO-314 / EUROCAE ED-160 // Tech. Rep. 2011. Post-FRAC Version.

³ Там же.

⁴ Проведение исследований и разработка методов обеспечения целостности функции наблюдения для различных приложений и технологий реализации АЗН-В: отчет о НИР. М.: «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, 2015. 529 с.

ЗАДЕРЖКИ ПЕРЕДАЧИ СООБЩЕНИЙ АЗН-В

Рассмотрим схематично структуру механизма возникновения временной задержки при передаче данных в системе АЗН-В.

Следуя работам⁵ [2, 4], представим функциональную схему, описывающую возникновение задержки при обработке информации в АЗН-В, в следующем виде (рис. 1).

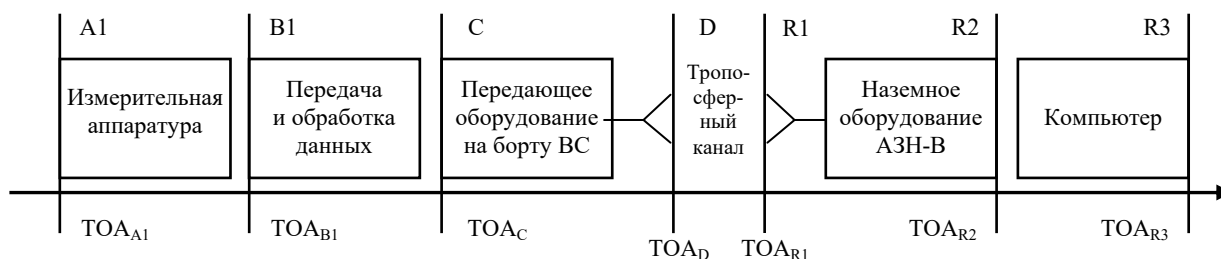


Рис. 1. Структура формирования задержки
Fig. 1. Latency formation structure

На рис. 1 каждый блок обозначает компоненты систем АЗН-В, где происходит задержка. Заглавные буквы вверху обозначают интерфейсы соответствующих компонент. Например, А1 указывает входной интерфейс бортового измерительного оборудования (как правило, GNSS). Соответствующий момент времени TOA_{A1} (TOA – Time of Applicability) – это время, когда последний сигнал GNSS, используемый для определения местоположения ВС, поступает на приемную антенну ВС.

Задержки в наземных системах АЗН-В характеризуются интерфейсами R_1 , R_2 и R_3 . Отметим, что даже если задержки в наземных системах пренебрежимо малы, важно понимать связь между временем, измеренным на борту, и временем наземных измерений. T_x – это истинное время применимости данных в сечении интерфейса X. Общее время задержки информации о местоположении ВС – T_Σ – это разность между временем применимости данных о местоположении ВС и временем прибытия декодированного отчета по этой позиции.

$$T_\Sigma = T_{R_3} - T_{A_1}.$$

Согласно рекомендациям⁶ анализ общей задержки должен включать максимальную асинхронную задержку, вызванную обновлениями информации о местоположении ВС, поступающей на оборудование АЗН-В несинхронно с тем, как сама система АЗН-В позиционируется. Эта задержка зависит от частоты/периода обновления положения источника, а не от частоты/периода передачи информации оборудованием АЗН-В. Так, при частоте обновления положения в 1 Гц эта позиция будет экстраполироваться до 1 секунды, пока не поступит следующее обновление. Таким образом, источник позиционирования с частотой в 1 Гц может увеличивать общую задержку на 1 секунду, и эта секунда должна быть включена в расчет общей задержки. Подробно соотношения между текущим временем и задержкой в подсистемах обсуждаются в работах [2, 4]⁷.

⁵ RTCA SC-186. Minimum Operational Performance Standards (MOPS) for 1090 MHz Extended Squitter Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) and Traffic Information Services-Broadcast (TISB); RTCA/DO-260B. Washington DC. 2009. December 2; Appendix U. Total and Uncompensated Latency 1090MHz Extended Squitter ADS-B.

⁶ Там же.

⁷ Там же.

Для компенсации временных задержек используются различные алгоритмы, позволяющие повысить точность передаваемых данных. Однако эта компенсация оказывается неполной, имеет место некомпенсированная задержка.

Принято считать, что некомпенсированная задержка – это любая задержка в системе АЗН-В, которая не компенсируется экстраполяцией. Некомпенсированная задержка может быть представлена как разность между временем применимости позиции и фактическим временем передачи.

Для нашей модели введем два типа некомпенсированной задержки τ_{Σ} : постоянную – τ_0 и быстро осциллирующую $\tilde{\tau}$, полагая, что $\tau_{\Sigma} = \tau_0 + \tilde{\tau}$. Заметим, что хотя τ_0 не меняется во времени, но специфично для каждой реализации оборудования на борту ВС.

Результаты исследования быстро осциллирующей компоненты задержки – $\tilde{\tau}$ опубликованы в работе [2]. На рис. 2 приведен график вариации во времени этой компоненты задержки.

Согласно нашим представлениям, эту часть задержки можно учесть феноменологически при моделировании путем уширения распределения координатных ошибок системы АЗН-В.

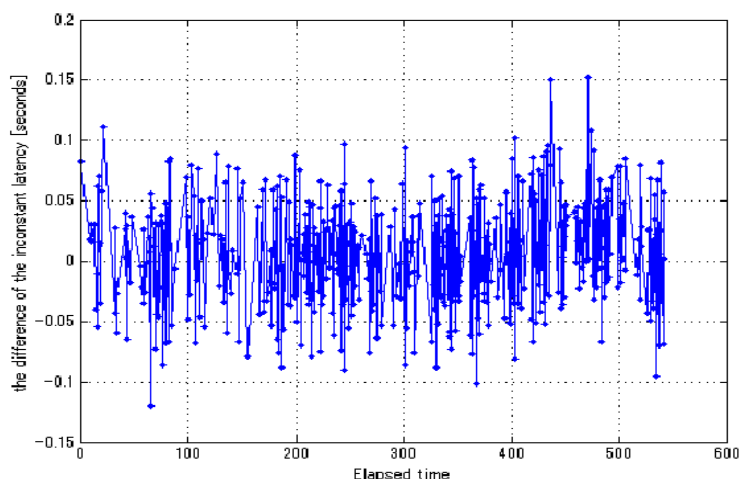


Рис. 2. Вариации во времени быстро осциллирующей компоненты задержки [2]
Fig. 2. Time variations of the fast oscillating latency component [2]

Гистограмма вариации постоянной составляющей задержки, согласно результатам работы [9], приведена на рис. 3. На нем указана зависимость доли сообщений АЗН-В как функция величины задержки.

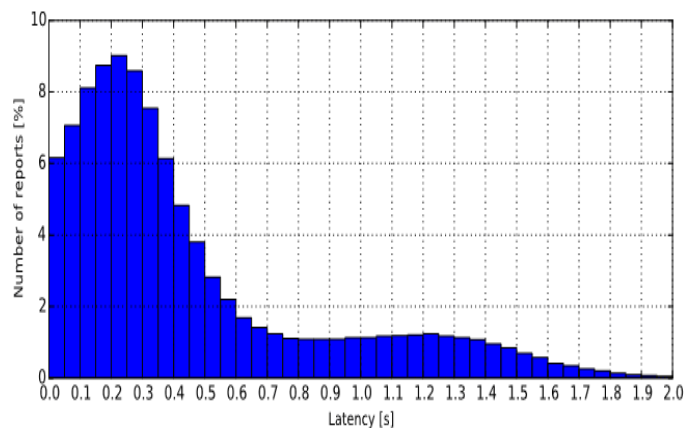


Рис. 3. Гистограмма распределения постоянной составляющей задержки [9]
Fig. 3. Histogram showing the distribution of the constant latency component [9]

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ СОПОСТАВЛЕНИЯ КООРДИНАТНЫХ ДАННЫХ АЗН-В И ВОРЛ

Один из способов контроля целостности системы АЗН-В базируется на сопоставлении координатных данных ВС, поступающих от АЗН-В и ВОРЛ. Разность этих показаний будем далее именовать невязкой. Такие невязки – случайные величины, и для их описания используют вероятностные распределения.

Координатные ошибки удобно подразделять на «продольные» и «боковые». Первые – это ошибки, получающиеся при измерениях положения ВС вдоль направления его движения, а боковые описывают ошибки, зарегистрированные в направлении, перпендикулярном его траектории.

Точность данных АЗН-В, особенно в отношении боковых ошибок, где временные задержки несущественны, стимулировало разработку методов, использующих данные АЗН-В в качестве опорной траектории для оценки статистических характеристик основного средства диспетчерского наблюдения при управлении воздушным движением – радиолокационных систем [7, 8].

Для апробации разрабатываемых методов с целью оценки качества мультирадарной обработки в автоматизированной системе УВД «Синтез АР4» Московского центра автоматизации УВД (МЦ АУВД) были собраны данные параллельного измерения координат воздушного судна на основе радиолокационной информации (РЛИ) и с использованием АЗН-В⁸. Данные РЛИ и АЗН-В привязывались к единой временной сетке с использованием сглаживания траектории ВС полиномами третьей степени и учетом его оценочной скорости. За месяц наблюдения и предварительной обработки информации была сформирована база данных по Московской воздушной зоне, включающая в себя 6636912 измеренных невязок.

Результаты обработки собранных данных, приведенных в⁹, представлены на рис. 4, *a* и *б* отдельно по боковой и продольной составляющим.

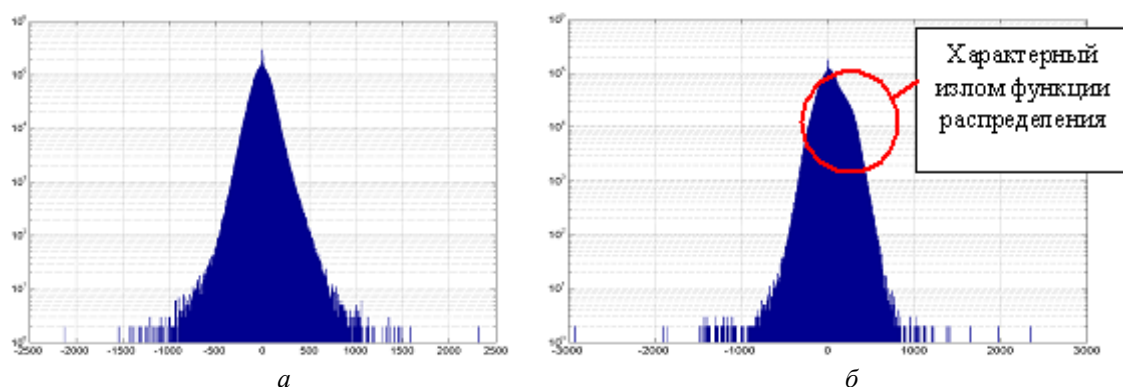


Рис. 4. Гистограммы невязок между данными АЗН-В и РЛ-измерений¹⁰:

a – боковая составляющая; *б* – продольная составляющая

Fig. 4. Histograms of discrepancies between ADS-B data and radar measurements¹¹:

a – lateral component; *b* – longitudinal component

⁸ Проведение исследований и разработка методов обеспечения целостности функции наблюдения для различных приложений и технологий реализации АЗН-В: отчет о НИР. М.: «НИИ Аэронавигации» ФГУП ГосНИИ ГА, 2015. 529 с.

⁹ Там же.

¹⁰ Там же.

¹¹ Там же.

Распределение боковой составляющей невязок можно рассматривать как распределение ошибок ВОРЛ, поскольку их дисперсия практически на порядок больше дисперсии соответствующих ошибок АЗН-В. Оценка величины математического ожидания и стандартного отклонения составили соответственно: $\hat{m}_y = -6,8 \text{ м}$, $\hat{\sigma}_y = 94,4 \text{ м}$.

Соизмеримость продольных погрешностей АЗН-В, обусловленных некомпенсированной временной задержкой, и ВОРЛ не позволяет, по аналогии с боковой составляющей, трактовать невязки как относящиеся исключительно к погрешности радиолокационной системы.

По данным [10], некомпенсированная задержка может составлять 0,8 с. При этом у отдельных ВС наблюдаются задержки до 2,5 с, и отдельные редкие сообщения АЗН-В передаются с задержкой до 5–10 с.

В исследовании¹² некомпенсированные задержки рассматриваются как имеющие систематическую составляющую 0,6 с и случайную составляющую со стандартным отклонением 0,3 с.

Из приведенных на рис. 4 гистограмм видно, что если распределение невязок боковых составляющих с высокой степенью можно считать симметричным, то в распределении продольной компоненты явно просматривается асимметрия. Следует отметить, что представленные распределения носят устойчивый характер и качественно подтверждаются по собираемой в настоящее время базе невязок в Самарском укрупненном центре ЕС ОрВД.

Для объяснения этого феномена асимметрии рассмотрим следующую гипотезу: полученные от СНС данные обрабатываются на борту ВС и затем передаются наземным службам. Время обработки T_{Σ} на некоторых ВС может быть некорректно скомпенсировано. Из-за этого возникает регулярная некомпенсированная задержка τ_0 . Понятно, что на боковое смещение эта ошибка влияния не оказывает, а вот продольная ошибка Δ , зависящая от скорости ВС ($\Delta = v \cdot \tau_0$), может внести заметный вклад в величину ошибки.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НЕВЯЗОК ДАННЫХ АЗН-В И ВОРЛ

Задача дальнейшего исследования заключается в том, чтобы методами математического моделирования показать адекватность гипотезы и на ее основе получить дополнительную информацию о состоянии бортового оборудования АЗН-В.

В процессе моделирования предполагается построить иерархическую цепочку усложняющихся моделей, детализирующих отображение описанной особенности распределения невязок.

На первом шаге будет показано, что некомпенсированность временной задержки действительно может привести к распределениям отмеченного вида. При этом будет использовано приближение, основанное на том, что средняя точность данных радарных систем существенно уступает точности СНС. Будем полагать, что всю совокупность ВС можно разделить на две группы: те, чье бортовое оборудование не дает регулярной погрешности (их доля $1 - \alpha$), и те, чьи данные содержат регулярную погрешность Δ , которая соответствует регулярной временной ошибке τ ($\Delta = v \cdot \tau$, v – *путевая скорость ВС*).

На следующем этапе мы будем исходить из того, что стандартные отклонения распределений ошибок как АЗН-В, так и ВОРЛ имеют конечную величину $\sigma_{АЗН-В}$ и $\sigma_{ВОРЛ}$ соответственно. Параметры распределения невязок в показаниях АЗН-В и ВОРЛ будем определять из условия минимума «расстояния» между экспериментальной гистограммой и модельной зависимостью.

¹² Safety, Performance and Interoperability Requirements Document for Enhanced Air Traffic Services in Radar-Controlled Areas Using ADS-B Surveillance (ADS-D-RAD). DO-318 / RTCA. Washington, 2009. 582 с.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Будем полагать, что на определенной части ВС, доля которых составляет величину α , компенсация регулярной ошибки, связанной с несовпадением времени регистрации положения ВС и его приемом другими участниками движения или наземным пользователем этой информации, реализована не полностью. То есть все ВС можно разделить на два класса: те, данные которых не дают регулярной погрешности, и те, что содержат погрешность Δ , которая соответствует регулярной задержке ($\Delta = v \cdot \tau_0$).

Требуется смоделировать распределение продольных невязок в показаниях АЗН-В и ВОРЛ и оценить долю α воздушных судов, требующих доработки алгоритмов компенсации бортового оборудования, и характерное среднее время τ некомпенсированной задержки.

В процессе решения задачи мы будем моделировать собственные ошибки АЗН-В и ВОРЛ с помощью DE-распределения:

$$f(x) = \frac{\lambda}{2} \exp\{-\lambda \cdot |x|\},$$

где λ – параметр задачи ($\lambda = \lambda_1$ для АЗН-В и $\lambda = \lambda_2$ для ВОРЛ), x – величина ошибки.

Это распределение принято как базовое для описания позиционных ошибок систем регистрации на большом ансамбле реализаций различных типов ВС.

БАЗОВАЯ МОДЕЛЬ СТАТИСТИКИ НЕВЯЗОК

Невязка в показаниях измерительных систем, определяемая как разность этих показаний, – случайная величина, функция распределения которой может быть найдена как интеграл типа свертки от функций распределения погрешностей АЗН-В и ВОРЛ, обозначаемых далее как $f_1(x)$ и $f_2(x)$ соответственно.

$$F(x_1 - x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} f_1(x_1 - x_2 + \xi) \cdot f_2(\xi) d\xi. \quad (1)$$

Согласно предложенной гипотезе функция распределения ошибок АЗН-В может быть представлена в виде

$$f_1(\xi) = (1 - \alpha) \frac{\lambda_1}{2} \exp\{-\lambda_1 |\xi|\} + \alpha \frac{\lambda_1}{2} \exp\{-\lambda_1 |\xi - \Delta|\}. \quad (2)$$

Будем полагать, что в силу большей точности спутниковой навигации λ_1 системы АЗН-В значимо больше, чем соответствующее значение λ_2 для ВОРЛ. Тогда в первом приближении по малому параметру $\left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1}\right) \ll 1$ распределение ошибок АЗН-В можно заменить δ -функцией Дирака, определяемой через функциональное соотношение

$$\int_a^b \varphi(x) \cdot \delta(x - x_0) dx = \begin{cases} \varphi(x_0) & \text{при } x_0 \in (a, b), \\ 0 & \text{при } x_0 \notin [a, b]; \end{cases} \quad (3)$$

δ -функцию Дирака иногда определяют менее строго, но более наглядно:

$$\delta(x-a) = \begin{cases} \infty & \text{при } x = a \\ 0 & \text{при } x \neq a \end{cases}.$$

Использование соотношения (3) существенно упростит выкладки базовой модели. Действительно, определяя $f_1(\xi)$, в соответствии с (2), в виде

$$f_1(\xi) = (1-\alpha) \cdot \delta(\xi) + \alpha \cdot \delta(\xi - \Delta) \quad (4)$$

и подставляя (4) в (1) с учетом (3), получаем

$$\begin{aligned} F(x_1 - x_2) &= \int_{-\infty}^{\infty} [(1-\alpha) \cdot \delta(x_1 - x_2 + \xi) + \alpha \cdot \delta(x_1 - x_2 + \xi - \Delta)] \cdot f_2(\xi) d\xi = \\ &= (1-\alpha) \cdot f_2(x_2 - x_1) + \alpha \cdot f_2(\Delta + x_2 - x_1) = \\ &= (1-\alpha) \frac{\lambda_2}{2} \exp\{-\lambda_2 |x_1 - x_2|\} + \alpha \cdot \frac{\lambda_2}{2} \exp\{-\lambda_2 |(x_1 - x_2) - \Delta|\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Из полученного соотношения видно, что распределение невязок представляет собой суперпозицию двух DE -распределений, смещенных на величину некомпенсированной задержки Δ . Вид этого распределения представлен на рис. 5. На графике хорошо виден характерный излом при положительных значениях ξ , характерный для экспериментальных гистограмм (рис. 4, б).

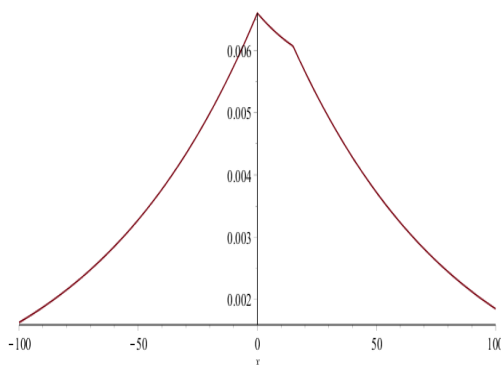


Рис. 5. График распределения невязок $F(\xi)$ в показаниях АЗН-В и ВОРЛ, при $\alpha = 0,3$, $\Delta = 15 \text{ м}$, $\lambda_2 = 0,014 \text{ м}^{-1}$

Fig. 5. The plot of the discrepancy distribution $F(\xi)$ in the indication of ADS-B and SSR,

with $\alpha = 0.3$, $\Delta = 15 \text{ m}$, $\lambda_2 = 0.014 \text{ m}^{-1}$

РАСШИРЕНИЕ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ

Замена реального распределения ошибок АЗН-В δ -функцией Дирака фактически означает пренебрежение случайными ошибками, которые тем не менее существуют, поэтому на следующем шаге мы скорректируем вид распределения ошибок АЗН-В, не связанных с постоянной частью некомпенсированной задержки, и учтем конечность величины λ_1 .

В этом случае выражение для функции распределения продольных невязок становится более громоздким:

$$F(x_1 - x_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[(1 - \alpha) \cdot \frac{\lambda_1}{2} \exp\{-\lambda_1 |x_1 - x_2 + \xi|\} \right] \cdot \frac{\lambda_2}{2} \exp\{-\lambda_2 |\xi|\} d\xi + \int_{-\infty}^{\infty} \left[\alpha \cdot \frac{\lambda_1}{2} \exp\{-\lambda_1 |x_1 - x_2 + \xi - \Delta|\} \right] \cdot \frac{\lambda_2}{2} \exp\{-\lambda_2 |\xi|\} d\xi. \quad (6)$$

Интегралы, фигурирующие в (6), конечно, можно вычислить аналитически, но на данном этапе для нас основной интерес представляет график полученной зависимости. Прделанные численные расчеты представлены на рис. 6.

На графике (в логарифмической шкале по оси ординат) представлены полученные результаты.

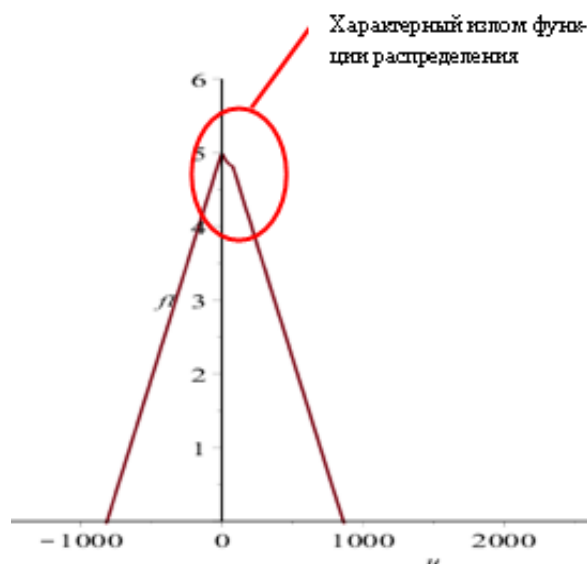


Рис. 6. График функции распределения невязок $F(\xi)$, рассчитанный в соответствии с (6)
Fig. 6. The plot of the discrepancy distribution function $F(\xi)$, calculated in accordance with (6)

Получив качественное соответствие модельного графика и экспериментальной гистограммы, можно перейти к оценке параметров распределения, заложенных в (6). Для этого необходимо найти значения параметров α и Δ , при которых экспериментальная и теоретическая зависимости будут максимально близки. Математически постановка такой задачи выглядит следующим образом. Необходимо найти такие α^* и Δ^* , что

$$(\alpha^*, \Delta^*) = \arg \min_{\alpha, \Delta} \left\{ \left\| F_{\text{эксн}}(\xi) - F_{\text{мод}}(\xi | \alpha, \Delta) \right\| \right\}. \quad (7)$$

Здесь символ $\|\bullet\|$ означает норму разности двух функций («расстояние» между функциями). Выберем эту норму в следующем виде:

$$\left\| F_{\text{эксн}}(\xi) - F_{\text{мод}}(\xi | \alpha, \Delta) \right\| = \int_{-\infty}^{\infty} W(\xi) \cdot \left| F_{\text{эксн}}(\xi) - F_{\text{мод}}(\xi | \alpha, \Delta) \right| d\xi. \quad (8)$$

Введенная здесь весовая функция $W(\xi) = \exp\{-\xi^{2n}/\Sigma^{2n}\}$, $n = 4$, учитывает то обстоятельство, что при анализе исследуемой тонкой структуры распределения невязок наиболее значимо поведение графика вблизи «излома», который мы хотим наиболее подробно описать. Шероховатости экспериментальной гистограммы на хвостах распределения связаны с недостаточностью набранной статистики. Поэтому эти шероховатости учитывать не следует.

Принимая во внимание возможную неустойчивость решения (7), определим (α^*, Δ^*) , рассчитав численно двумерный график зависимости

$$Z(\alpha, \Delta) = \int_{-\infty}^{\infty} W(\xi) \cdot |F_{\text{эксн}}(\xi) - F_{\text{мод}}(\xi|\alpha, \Delta)| d\xi \quad (9)$$

и найдя его абсолютный минимум.

На рис. 7 представлены результаты расчета «расстояния» между экспериментальной гистограммой (рис. 4, б) и модельной зависимостью распределения невязок (выражение (6)) как функции параметров α и Δ .

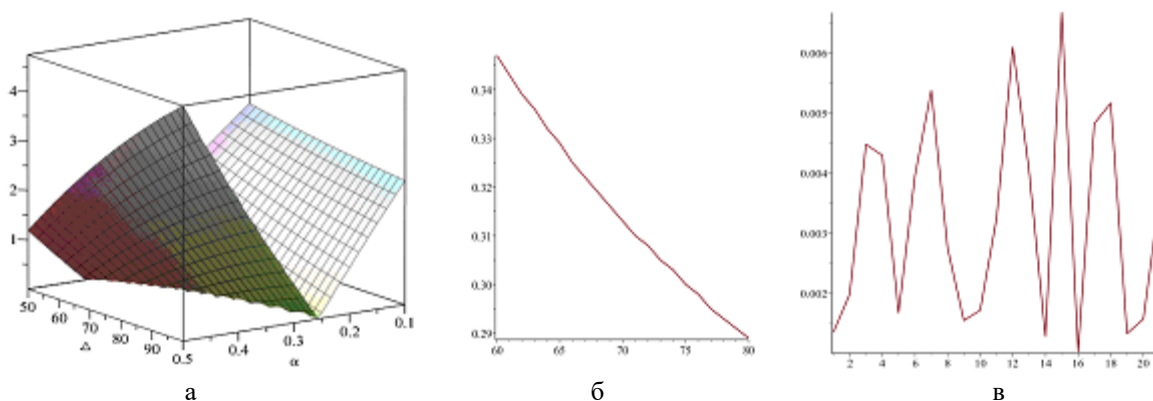


Рис. 7. График зависимости $Z(\alpha, \Delta)$: *a* – общий вид функции; *б* – координаты «лощины» в плоскости (α, Δ) ; *в* – значение функции $Z(\alpha, \Delta)$ в дискретном наборе точек вдоль «лощины»

Fig. 7. Dependency graph $Z(\alpha, \Delta)$: *a* – a general view of the function; *б* – "trench" coordinates in the plane (α, Δ) ; *в* – the values of function in a discrete set of points along the "trench"

В представленном масштабе положение минимума графика просматривается плохо – график функции (рис. 7, *a*) представляет собой «лощину», минимум которой на плоскости (α, Δ) имеет след, представленный на рис. 7, *б*). На этом следе были равномерно выбраны N точек ($N = 21$), в которых вычислены значения функции $Z(\alpha, \Delta)$. Из представленной на рис. 7, *в* зависимости видно, что абсолютный локальный минимум достигается при $N = 16$, что соответствует точке $\alpha = 0,3, \Delta = 75$ м.

Последний результат можно трактовать следующим образом: бортовое оборудование 30 % ВС характеризуется нескомпенсированной задержкой, среднее значение которой приводит к дополнительной координатной ошибке – 75 м.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе обсуждается гипотеза, основанная на анализе тонкой структуры функции распределения невязок в показаниях АЗН-В и ВОРЛ. Сравнение различий в данных этих измерительных систем в направлениях поперек и вдоль траектории движения ВС показало наличие характерной устойчивой особенности в гистограммах распределений, относящихся только к продольным измерениям. Наличие асимметрии в этих гистограммах предлагается трактовать как присутствие некомпенсированной задержки при передаче данных АЗН-В, характерное для определенной доли ВС в воздушном пространстве России. Акцент на «территориальную принадлежность» эффекта связан с тем, что зарубежных работ, посвященных рассматриваемому феномену, нам не известно.

В соответствии с высказанной гипотезой была построена математическая модель процедуры измерения невязки для продольных измерений. В качестве параметров, подлежащих оценке, в этой модели были выбраны среднее значение величины некомпенсированной задержки при передаче данных АЗН-В и ожидаемая доля ВС, характеризующая этим дефектом алгоритмов компенсации.

Величины искомым параметров были определены как значения, доставляющие минимум функционалу, определяющему «расстояние» между экспериментальной гистограммой и функцией, полученной на основе модельных представлений.

Сделанные оценки показали, что порядка 30 % ВС из общего числа наблюдавшихся в московском регионе передают данные о своем положении с дополнительной средней ошибкой, порождаемой некомпенсированной задержкой в 75 м.

Отметим два важных обстоятельства: во-первых, эта ошибка добавляется к ошибкам, присущим АЗН-В с корректными алгоритмами компенсации, и, во-вторых, это лишь средняя ошибка, а следовательно, есть ВС, характеризующие большей неточностью данных, и осторожные оценки, которые необходимо использовать в задачах обеспечения безопасности полетов, могут существенно превосходить полученные результаты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ali B.S., Schuster W., Ochieng W.Y.** Evaluation of the capability of automatic dependent surveillance broadcast to meet the requirements of future airborne surveillance applications // *The Journal of Navigation*. 2017. Vol. 70, Iss. 1, Jan. Pp. 49–66.
2. **Kakubari Y., Kosuge Y., Koga T.** [EN-A-060] ADS-B latency estimation technology for surveillance performance assessment [Электронный ресурс] // *EIWAC 2017 Conference, Tokyo, Japan*. Режим доступа: https://www.enri.go.jp/eiwac/eiwac_2017/special-site_eiwac2017/papers/1_frt_1/3_en-a-060_frt1_full_paper.pdf (дата обращения: 30.03.2019).
3. **Кузнецов В.Л., Тараканов А.А.** Аппроксимация закона распределения собственных ошибок АЗН-В на основе кумулянтного анализа невязок данных системы АЗН-В-ВОРЛ // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2017. Т. 20, № 2. С. 27–36.
4. **Thedford W.A.** ADS-B IN/OUT Technical issues // *CNS/ATM Conference, Florida*. 2011.
5. **Zhang Jun, Wei Liu., Zhu Yanbo.** Study of ADS-B data evaluation // *Chinese Journal of Aeronautics*. 2011. № 24(4). Pp. 461–466.
6. **Кузнецов В.Л., Дупиков В.В.** Аналитическая модель радарного мониторинга целостности информации азн-в // *Научный Вестник МГТУ ГА*. 2015. № 220. С. 64–72.
7. **Алипов И.В., Ещенко А.А., Далецкий С.В.** Оценка параметров распределения продольной составляющей погрешности АЗН-В // *Научный вестник ГосНИИ ГА*. 2017. № 18(329). С. 105–113.

8. **Фесенко С.В.** Точная оценка погрешностей радиолокационных измерений с использованием данных радиовещательного автоматического зависимого наблюдения // Научный вестник ГосНИИ ГА. 2017. № 17(328). С. 70–77.

9. **Verbraak T.L.** Large-scale ADS-B data and signal quality analysis [Электронный ресурс] / J. Ellerbroek, J. Sun, J.M. Hoekstra // 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017). Режим доступа: http://www.atmseminarus.org/seminarContent/seminar12/papers/12th_ATM_RD_Seminar_paper_83.pdf (дата обращения: 30.03.2019).

10. **Pchelintsev A.** Radar alignment and accuracy tool: rass-r radar comparator dual. IE-SUP-00042-002/2010. Intersoft Electronics, 2009. 60 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Алипов Иван Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, начальник отдела Филиала ГосНИИ ГА «Аэронавигация», alipov@atminst.ru.

Кузнецов Валерий Леонидович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики Московского государственного технического университета гражданской авиации, v.kuznetsov@mstuca.aero.

MODELING OF THE "THIN" STRUCTURE PROBABILITY DISCREPANCY DISTRIBUTION IN THE INDICATIONS OF ADS-B AND SSR. UNCOMPENSATED LATENCY

Ivan V. Alipov¹, Valeriy L. Kuznetsov²

¹*Branch of GosNII GA, "Air Navigation Research and Development Institute",
Moscow, Russia*

²*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

The upcoming transition to a new generation of the elements in the ATC system – AZN-B – has set a number of tasks related to confirming the integrity of the data received, and determining their accuracy characteristics. Radar surveillance systems which are used up to now have established a good reputation and the matter of succession is naturally associated with the comparison of these two recording systems data. Discrepancies (differences) in the AZN-B registrations and radar data are an additional source of information related to reliability and accuracy of their measurements. The problem lies in the method of information extraction. The article analyzes the stable features of discrepancy distribution (histograms) probability obtained in the "Air Navigation Research and Development Institute" branch of GosNII GA by analyzing the observations of aircraft operations in Moscow region. The presence of asymmetry in these histograms is supposed to be interpreted as the presence of uncompensated latency in the transmission of data from AZN-B, which is typical for a certain portion of aircraft in the airspace of Russia. The emphasis on the "territorial affiliation" of the effect is due to the fact that we don't have any information about the works abroad devoted to the phenomenon under discussion. In accordance with the hypothesis stated, a mathematical model of the measurement procedure with the following parameters to be estimated was constructed: the average value of the uncompensated delay and the expected share of aircraft, characterized by this defect. The values of the sought-for parameters were discovered according to the condition of minimum "distance" between the experimental histogram and the corresponding model analytical dependence. The estimates made revealed that about 30% of the aircraft, out of the total observed number, report their coordinates with an additional error of 75 m. at an average.

Key words: data discrepancy of ADS-B and SSR, distribution asymmetry, uncompensated latency.

REFERENCES

1. **Ali, B.S., Schuster, W. and Ochieng, W.Y.** (2017). Evaluation of the capability of automatic dependent surveillance broadcast to meet the requirements of future airborne surveillance applications. *The Journal of Navigation*, vol. 70, iss. 1, Jan., pp. 49–66.
2. **Kakubari, Y., Kosuge, Y. and Koga, T.** (2017). [EN-A-060] ADS-B latency estimation technology for surveillance performance assessment, EIWAC 2017 Conference, Tokyo, Japan [Electronic resource]. URL: https://www.enri.go.jp/eiwac/eiwac_2017/specialsite_eiwac2017/papers/1_frt_1/3_en-a-060_frt1_full_paper.pdf (accessed 30.03.2019).
3. **Kuznetsov, V.L. and Tarakanov, A.A.** (2017). Law distribution approximation on eigenstate errors of ADS-B based on cumulant analysis of ADS-B-RAD system data disparity. *Civil Aviation High Technologies*, vol. 20, no. 2, pp. 27–36. (in Russian)
4. **Theford, W.A.** (2011). ADS-B IN/OUT Technical issues. CNS/ATM Conference, Florida.
5. **Zhang, Jun, Wei, Liu and Zhu, Yanbo.** (2011). Study of ADS-B data evaluation. *Chinese Journal of Aeronautics*, no. 24(4), pp. 461–466.
6. **Kuznetsov, V.L. and Dupikov, V.V.** (2015). Analytical model of the ADS-B information integrity radar monitoring. *The Scientific Bulletin of the Moscow State Technical University of Civil Aviation*, no. 220, pp. 64–72. (in Russian)
7. **Alipov, I.V., Eshchenko, A.A. and Daleckij, S.V.** (2017). Accurate estimation of radar errors using automatic dependent surveillance-broadcast. *The Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 18(329), pp. 105–113. (in Russian).
8. **Fesenko, S.V.** (2017). Accurate estimation of radar errors using automatic dependent surveillance – broadcast. *The Scientific Bulletin of The State Scientific Research Institute of Civil Aviation (GosNII GA)*, no. 17(328), pp. 70–77. (in Russian)
9. **Verbraak, T.L., Ellerbroek, J., Sun, J. and Hoekstra, J.M.** (2019). Large-scale ADS-B data and signal quality analysis [Electronic resource]. 12th USA/Europe Air Traffic Management Research and Development Seminar (ATM2017). URL: http://www.atmseminarus.org/seminarContent/seminar12/papers/12thATM_RD_Seminar_paper_83.pdf (accessed 30.03.2019).
10. **Pchelintsev, A.** (2009). Radar alignment and accuracy tool: rass-r radar comparator dual. IE-SUP-00042-002/2010. Intersoft Electronics, 60 p.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivan V. Alipov, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Branch of GosNII GA "Air Navigation R&D Institute", Department Head, alipov@atminst.ru.

Valeriy L. Kuznetsov, Doctor of Technical Sciences, Professor, the Head of the Applied Mathematics Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, v.kuznetsov@mstuca.aero.

Поступила в редакцию 15.04.2019
Принята в печать 23.07.2019

Received 15.04.2019
Accepted for publication 23.07.2019