УДК 621.396.933.25 ; 629.7.058.53
DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-50-63

# Метод стробирования данных АЗН-В и его вероятностные модели

**Е.А. Рубцов[1], С.А. Кудряков[1], Я.М. Далингер[1], А.С. Калинцев[2]**
*[1]Российский университет транспорта (МИИТ), г. Москва, Россия*
*[2]ФГУП «Госкорпорация по организации воздушного движения», Архангельский центр ОВД, г. Мезень, Россия*

**Аннотация:** В статье разработан метод стробирования, который позволяет оценить достоверность данных АЗН-В без необходимости проверки с помощью вторичного радиолокатора или многопозиционной системы наблюдения. Предложены вероятностные модели метода стробирования данных АЗН-В, а также алгоритм применения данных моделей. Проанализированы типовые ситуации, возникающие при определении местоположения воздушного судна с помощью систем АЗН-В, определяемые пороговыми значениями погрешностей навигации и пилотирования. Первая типовая ситуация предполагает невыход погрешностей пилотирования и навигации за пределы допуска, что позволяет сделать вывод о подтверждении достоверности данных АЗН-В. Вторая типовая ситуация предполагает выход погрешности пилотирования за пределы допуска при допустимой погрешности навигации, при этом диспетчер получает сообщение о корректной работе АЗН-В и о необходимости выдачи команды пилоту на корректировку полета. Третья типовая ситуация предполагает выход погрешности навигации за пределы допуска при допустимой или недопустимой погрешности пилотирования; в этом случае диспетчер получает сообщение о том, что достоверность данных АЗН-В не подтверждается и применять эти системы нельзя. Выполнено моделирование этих типовых ситуаций, при этом для реализации метода стробирования данных АЗН-В применялись распределения Рэлея и Райса. Результаты моделирования позволяют оценить требуемое количество накопленных данных АЗН-В для проведения достоверной оценки. Так, было установлено, что при выполнении оценки с применением распределения Рэлея достаточно накопления 15–20 измерений, что при передаче двух сообщений в секунду и при условии штатной работы оборудования АЗН-В потребует 8–10 с. При выполнении оценки с применением распределения Райса достаточно накопления 25–30 измерений, что потребует 13–20 с. Разработанный метод позволит применять системы АЗН-В на региональных аэродромах с низкой интенсивностью полетов как основное или единственное средство наблюдения.

**Ключевые слова:** безопасность полетов, АЗН-В, строб, распределение Рэлея, распределение Райса, оценка параметров распределения, погрешность навигационных измерений, погрешности пилотирования.

**Для цитирования:** Рубцов Е.А. Метод стробирования данных АЗН-В и его вероятностные модели / Е.А. Рубцов, С.А. Кудряков, Я.М. Далингер, А.С. Калинцев // Научный Вестник МГТУ ГА. 2023. Т. 26, № 4. С. 50–63. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-50-63

# ADS-B data gating technique and its probabilistic models

**E.A. Rubtsov[1], S.A. Kudryakov[1], I.M. Dalinger[1], A.S. Kalintsev[2]**
*[1] Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russia*
*[2] FSUE "State Air Traffic Management Corporation of the Russian Federation", Arkhangelsk Air Traffic Management Center, Mezen, Russia*

**Abstract:** The article developed a gating technique that allows us to validate ADS-B data without the necessity to verify using the secondary surveillance radar or multilateration. Probabilistic models of the ADS-B data gating technique, as well as the algorithm for applying these models were proposed. Benchmark cases that occur when aircraft (A/C) positioning by ADS-B systems, determined by threshold values of navigation and pilot's errors, were analyzed. The first benchmark case assumes not exceeding of navigation and pilot's errors the bounds of the tolerance limits, which allows us to draw up a conclusion concerning the ADS-B data validation. The second one assumes exceeding of a pilot's error the bounds of the tolerance limits under an allowable

navigational error. Herewith, the air traffic controller (ATC) obtains a message about the proper ADS-B operation and the necessity to issue instructions to the pilot to correct a flight. The third benchmark case assumes exceeding of a navigation error the bounds of the tolerance limits under an allowable or not allowable pilot's error. In this case, the ATC obtains a message about not valid ADS-B data and the incapability to use these systems. The simulation of the given benchmark cases was performed. In addition, the Rayleigh and Rice distributions were applied to implement the ADS-B data gating technique. The simulation results allow us to assess the required amount of accumulated ADS-B data for the evaluation. Thus, it was found that during the estimate based on the Rayleigh distribution, it is sufficient to accumulate 15–20 measurements, which, when transmitting 2 messages per second and under the condition of the normal ADS-B equipment operation, will take 8–10 s. During the estimate, using the Rice distribution, an accumulation of 25–30 measurements is sufficient, which will take 13–20 s. The developed method will allow the use of ADS-B systems at regional aerodromes with the low intensity of air traffic as the primary or sole surveillance means.

**Key words:** flight safety, ADS-B, gate, Rayleigh distribution, Rice distribution, distribution parameter estimate, error of navigational measurements, pilot's errors.

**For citation:** Rubtsov, E.A., Kudryakov, S.A., Dalinger, I.M., Kalintsev, A.S. (2023). ADS-B data gating technique and its probabilistic models. Civil Aviation High Technologies, vol. 26, no. 4, pp. 50–63. DOI: 10.26467/2079-0619-2023-26-4-50-63

## Введение

Автоматическое зависимое наблюдение вещательного типа (АЗН-В) отнесено Международной организацией гражданской авиации (ИКАО) к перспективным технологиям наблюдения, что отражается в положениях Глобального аэронавигационного плана[1].

К достоинствам АЗН-В относят небольшую стоимость внедрения наземных станций по сравнению с затратами на развертывание вторичных радиолокаторов (ВРЛ) и многопозиционных систем наблюдения (МПСН). Эксплуатационная стоимость также значительно ниже. При наличии на борту высокоточных навигационных датчиков (как правило, приемников глобальных навигационных спутниковых систем – ГНСС) АЗН-В обеспечивает точность наблюдения не хуже, чем у радиолокационных средств [1–3].

Однако в Руководстве по авиационному наблюдению[2] отмечается необходимость подтверждать достоверность получаемых от АЗН-В данных с помощью ВРЛ или МПСН. Это связано с возможностью возрастания погрешности навигации (при использовании автономных инерциальных систем и азимутально-дальномерных систем навигации). Таким образом, необходимость подтверждения данных нивелирует экономическую привлекательность технологии АЗН-В.

Задача подтверждения данных АЗН-В без применения дополнительных средств наблюдения может быть решена с применением методов алгоритмического подтверждения данных. В работе [4] были предложены методы алгоритмического подтверждения данных АЗН-В для обеспечения наземного движения на аэродроме. Методы, представленные в работе [4], основаны на накоплении измерений координат воздушного судна (ВС) с последующим статистическим анализом полученных данных. В настоящей работе предлагается модифицировать методы, описанные в [4], и применять при обработке данных АЗН-В метод стробирования, который уже нашел применение в радиолокации [5, 6].

Применение метода стробирования при обработке данных АЗН-В позволит оценить достоверность информации о местоположении ВС и применять недорогие наземные станции АЗН-В как единственное или основное средство наблюдения, что актуально для региональных аэродромов с низкой интенсивностью воздушного движения.

Согласно анализу данных АЗН-В [7] большинство ВС выполняет полет в штатном режиме по прямолинейной траектории, без тенденции к нарушению границ воздушных трасс, при этом доля таких воздушных судов в общем потоке составляет порядка 76 %.

Маневр в горизонтальной или вертикальной плоскости характерен для 9 % ВС. Стоит

[1] The Global Air Navigation Plan [Электронный ресурс] // ICAO GANP Portal. URL: https://www4.icao.int/ganpportal (дата обращения: 17.03.2023).

[2] Doc. 9924 AN/474: Aeronautical Surveillance Manual. 3rd ed. // ICAO, 2020. 432 p.

отметить, что маневр может быть выполнен с отклонением от маршрута (схемы) полета из-за ошибок экипажа, связанных с неправильной интерпретацией достоверной навигационной информации. Вероятность такого события может достигать $10^{-3}$ [8].

Примерно для 6 % ВС наблюдается тенденция к нарушению границ воздушных трасс или норм эшелонирования либо выявляется нарушение границ воздушной трассы. Это может быть вызвано наличием больших погрешностей навигационных систем. Ситуацию могут усугубить ошибки пилотирования, что приведет к еще большему отклонению от номинальной траектории полета ВС [7].

Таким образом, описанные возможные ситуации при полете ВС и при определении местоположения воздушного судна с помощью АЗН-В можно представить в виде следующих типовых ситуаций:

1) выполнение полета по схеме, при этом ошибки пилотирования и навигации находятся в пределах допуска;

2) выполнение полета с отклонением от схемы (вследствие больших ошибок пилотирования) при допустимых погрешностях навигации;

3) недопустимо большие погрешности пилотирования и навигации.

Первую ситуацию можно считать штатной, при этом значения навигационной ошибки бортового навигационного комплекса малы, а экипаж выполняет полет строго по схеме с малыми погрешностями пилотирования. Схемы выполнения маневров, а также требования по организации воздушного движения в районе аэродрома регламентированы и содержатся в сборниках аэронавигационной информации (AIP).

Ситуации 2 и 3 можно считать нештатными, причем в ситуации 2 данные АЗН-В соответствуют требованиям по точности и являются достоверными, а в ситуации 3 – превышают допустимые значения и не являются достоверными. В реальной практике необходимо выявлять все перечисленные варианты и предоставлять диспетчеру УВД информацию о том, являются ли данные АЗН-В достоверными.

В работе [9] при решении задачи подтверждения данных от АЗН-В описаны особенности применения метода стробирования при обработке данных АЗН-В. В радиолокации этот метод применяется для выявления ложных координат, при построении траектории движения [5]. Применительно к поставленной задаче примем, что строб – область пространства вокруг точки экстраполяции траектории движения ВС с центром в точке экстраполированных координат ВС, в пределах которой оценка координат ВС будет считаться достоверной.

Для ВС с максимальной взлетной массой более 5 700 кг или с максимальной крейсерской истинной скоростью полета более 250 узлов исполнительным регламентом Европейской комиссии № 1207/2011[3] и первой поправкой к нему 1028/2014[4] установлены требования наличия бортовой аппаратуры расширенного наблюдения режима S (EHS) и АЗН-В режима 1090 ES. Расширенное наблюдение режима S (EHS) представляет собой набор расширенных функций режима S и включает отчеты о выбранном намерении в вертикальной плоскости (BDS 4.0), отчет о треке и повороте (BDS 4.0), а также отчет о треке и повороте (BDS 5.0). Перечисленные типы отчетов содержат информацию о значениях скорости изменения путевого угла, магнитном курсе, приборной скорости (indicated airspeed, IAS) и выбранном намерении в вертикальной плоскости.

В Российской Федерации бортовая аппаратура расширенного наблюдения режима S (EHS) и АЗН-В режима 1090 ES устанавливается на различных моделях самолетов (DA-42, L-410, Ан-148 и др.) и вертолетов (Ми-8 и др.).

Использование ответчика режима S позволяет на наземной станции АЗН-В получать

[3] 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.

[4] 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.

текущие и планируемые координаты ВС (намерения), однако погрешность навигационной информации остается неизвестной. Для решения этой проблемы предлагается применять метод стробирования [9], для чего необходимо на наземной станции АЗН-В накопить достаточное количество измеренных значений координаты ВС для определения центра строба методом экстраполяции. После этого по полученной выборке накопленных измерений, выполняется интервальная оценка параметров распределения ошибки определения местоположения ВС и вычисляется вероятность попадания ВС в область строба. Важной задачей является обеспечение соответствия оценки параметров распределения выборки накопленных значений параметрам генеральной совокупности. Интервальная оценка выполняется с заданным уровнем надежности. Размеры строба задаются исходя из требований к допустимым погрешностям систем наблюдения. Вероятность попадания ВС в область строба может быть найдена с использованием распределений Рэлея и Райса.

## Методы исследования

В авиационных правилах Межгосударственного авиационного комитета «Сертификационные требования к оборудованию аэродромов и воздушных трасс» (АП-170, том 2) допустимые значения среднеквадратической ошибки (СКО) аэродромного обзорного радиолокатора (ОРЛ-А) составляют 150 м при максимальной дальности 100 км.

Требования к точности (СКО) аэродромного радиолокационного комплекса (АРЛК), приведенные в Сертификационных требованиях (Базисе) составляют 120 м для первичного канала и 70 м для вторичного (при вероятности объединения координатной и дополнительной информации не менее 0,95).

В спецификациях систем наблюдения Eurocontrol[5] приводится рекомендуемое значение СКО для определения координат ВС в горизонтальной плоскости, равное 300 м, при минимуме эшелонирования 3 морские мили.

Как видим, требования отечественных и международных стандартов к точности определения местоположения ВС в аэродромной зоне несколько разнятся и составляют от 70 до 300 м. Для задания размеров области строба и решения задачи оценки достоверности данных АЗН-В целесообразно выбрать некоторое усредненное значение. Предлагается принять радиус области строба равным допустимому значению СКО 150 м (что соответствует требованиям Межгосударственного авиационного комитета, изложенным в АП-170, том 2).

Условие достоверности данных АЗН-В выполняется в случае, когда оценка параметров совместно с доверительными интервалами, с заданной надежностью, не превышает установленные размеры строба. Таким образом, когда значения доверительного интервала оценки случайной величины не превышают значение радиуса области строба, принятые данные считаются достоверными. Если интервальная оценка превышает радиус области строба, условие достоверности данных не выполняется.

Поскольку немаловажным является и время выполнения оценки достоверности данных АЗН-В, целесообразно установить такой уровень надежности, который обеспечит подтверждение достоверности за приемлемое время. Согласно [9] для уровня надежности 0,95 информация о попадании или непопадании ВС в область строба будет достоверной.

Ошибки отклонения ВС от заданной траектории (схемы полета) могут быть описаны законом нормального распределения [3]. Для прямоугольной декартовой системы координат плотность распределения двумерного нормального закона с параметрами $m_x$, $m_y$, $\sigma_x$, $\sigma_y$, определяется как [10, 11]

$$f(x,y)=\frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}}e^{-\frac{1}{2(1-\rho^2)}\left[\frac{(x-m_x)^2}{\sigma_x^2}-2\rho\frac{(x-m_x)(y-m_y)}{\sigma_x\sigma_y}+\frac{(y-m_y)^2}{\sigma_y^2}\right]}, \quad (1)$$

где $m_x$, $m_y$ – математическое ожидание слу-

[5] Eurocontrol specification for ATM surveillance system performance (Volume 1), 2021. 92 p.

чайной величины по оси *Ox* и *Oy* соответственно;

$\sigma_x$, $\sigma_y$ – СКО случайной величины по оси *Ox* и *Oy* соответственно;

ρ – коэффициент корреляции.

Задача определения вероятности нахождения ВС в стробе может быть сформулирована как задача вычисления вероятности попадания случайной величины в круг радиуса *R* (определяется требованиями к погрешностям систем наблюдения) с центром в точке экстраполяции, координаты которой принадлежат схеме маневрирования.

В зависимости от значений параметров случайной величины, характерных для различных типовых ситуаций, ошибки определения местоположения ВС могут быть охарактеризованы различными законами распределения.

Рассмотрим решение задачи для типовых ситуаций определения местоположения воздушного судна с помощью АЗН-В. В простейшем случае примем, что ошибки определения местоположения по осям *Ox*, *Oy* прямоугольной декартовой системы координат одинаковы.

Первая типовая ситуация характеризуется малой погрешностью пилотирования, для формализации задачи примем ее нулевой. Таким образом, математическое ожидание (МО) ошибки определения местоположения ВС равно нулю, СКО по осям *Ox*, *Oy* равны друг другу: $m = 0$, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. В данном случае ошибка АЗН-В зависит только от погрешности бортового навигационного комплекса. Такая ситуация наиболее характерна для случая прямолинейного движения ВС.

При выполнении условия $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ распределение случайной величины называется круговым нормальным распределением [10–12]. Тогда случайная величина $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$, где *X, Y* – независимые нормально распределенные случайные величины, при условии кругового нормального распределения случайной величины и отсутствии систематической ошибки, подчиняется закону Рэлея. Тогда вероятность выхода ВС из области строба радиуса *R* может быть найдена как вероятность промаха [13–15]:

$$F(r) = P(R < r) = \begin{cases} 1 - e^{-\frac{r^2}{2b^2}}, & r \geq 0, \\ 0, & r < 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$f(r) = \frac{r}{b^2} e^{-\frac{r^2}{2b^2}}, \quad r > 0, \quad (3)$$

где *b* – параметр масштаба.

Вторая типовая ситуация характеризуется наличием погрешности пилотирования и навигационной ошибки. Подобная ситуация может возникнуть при отклонении ВС от траектории движения. При этом система АЗН-В может работать корректно при условии непревышения навигационной ошибки выше допустимого уровня. Если же ошибки бортового навигационного комплекса выше допустимого уровня, то мы получаем третью типовую ситуацию, при которой применять АЗН-В нельзя.

В данном случае возникает задача оценивания систематической и навигационной ошибок. Отличительной особенностью рассматриваемой ситуации от предыдущей является наличие систематической ошибки, то есть МО не равно нулю. Для рассматриваемого простейшего случая СКО равны друг другу: $m \neq 0$, $\sigma_x = \sigma_y$. Тогда случайная величина $r = \sqrt{X^2 + Y^2}$, где *X, Y* – независимые нормально распределенные случайные величины, имеет распределение Райса с плотностью распределения [13, 16]

$$f(x \mid s, \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-(x^2 + s^2)}{2\sigma^2}\right) I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right), \quad (4)$$

где $I_0$ – модифицированная функция Бесселя первого рода нулевого порядка;

*s* – смещение, равное $s = \sqrt{\mu_1^2 + \mu_2^2}$, где $\mu_1^2$, $\mu_2^2$ – математические ожидания *Ox* и *Oy*;

σ – параметр масштаба.

Функция распределения имеет вид

$$F(\alpha)=\int_0^{\alpha}\frac{x}{\sigma^2}\exp\left(\frac{-(x^2+s^2)}{2\sigma^2}\right)I_0\left(\frac{xs}{\sigma^2}\right). \quad (5)$$

Вероятность попадания ВС в область строба ($P_{in}$) может быть найдена как вероятность непревышения случайной величины r заданного радиуса строба и может быть вычислена с помощью (5). Тогда вероятность отклонения от траектории может быть найдена как

$$P_{out}=1-P_{in}, \quad (6)$$

где $P_{out}$ – вероятность отклонения ВС от заданной траектории;

$P_{in}$ – вероятность нахождения ВС в области строба.

Для практической реализации предлагается двухэтапный алгоритм применения вероятностных моделей метода стробирования данных АЗН-В. На первом этапе анализа выполняется оценка параметров распределения Рэлея. Если верхний доверительный интервал оценки параметра *b* не превышает допустимую величину, делается вывод о подтверждении достоверности данных АЗН-В (первая типовая ситуация). В случае превышения оценки параметра *b*, выполняется оценка параметров распределения Райса. Если в ходе анализа будет выявлена большая погрешность пилотирования при допустимой погрешности навигации, диспетчер УВД получает сообщение о корректной работе АЗН-В и о необходимости выдачи команды экипажу ВС (вторая типовая ситуация). Если в ходе анализа будут выявлены большие погрешности пилотирования и навигации, превышающие допустимые значения, диспетчер УВД получает сообщение о том, что достоверность данных АЗН-В не подтверждается и необходимо применять иные методы УВД (третья типовая ситуация). В качестве оцениваемых параметров в рассматриваемых простейших случаях выступает параметр *b* распределения Рэлея и параметры *s* и σ распределения Райса.

Необходимо отметить, что скорость движения ВС и частота передачи сообщений о местоположении накладывают ограничения на количество наблюдений. Принимая во внимание ограниченное количество наблюдений, оценка параметров выполняется по выборке из генеральной совокупности. Интервальная оценка параметров выполняется с заданным уровнем надежности.

Типовые ситуации были рассмотрены при допущении о равенстве ошибок определения местоположения по осям *Ox*, *Oy* прямоугольной декартовой системы координат. Указанное упрощение позволило в качестве примера использовать распределения Рэлея и Райса.

На практике значения ошибок по осям *Ox*, *Oy* будут отличаться друг от друга. Поэтому для оценки достоверности информации следует использовать более сложные распределения: распределение Хойта [17, 18] и распределение Бекманна [19–22].

## Результаты исследования

Для моделирования типовых ситуаций применялось программное обеспечение *MATLAB* и *Wolfram*. Было выполнено имитационное моделирование ошибки определения местоположения. Ошибка определения местоположения была задана как случайная величина, распределенная по законам Рэлея и Райса. По выборке из генеральной совокупности выполнена интервальная оценка параметров распределения с уровнем надежности 0,95. Оценка параметров выполнена методом максимального правдоподобия.

В результате моделирования были получены зависимости оценки параметров распределений от количества измерений *N*, то есть данных, получаемых наземной станцией АЗН-В. На рис. 1 приведены результаты оценки параметра *b* распределения Рэлея (соответствует погрешности определения местоположения ВС). На рис. 1 и последующих пунктирной линией показаны моделируемые значения параметров распределения (входные данные), красной линией показана оцен-

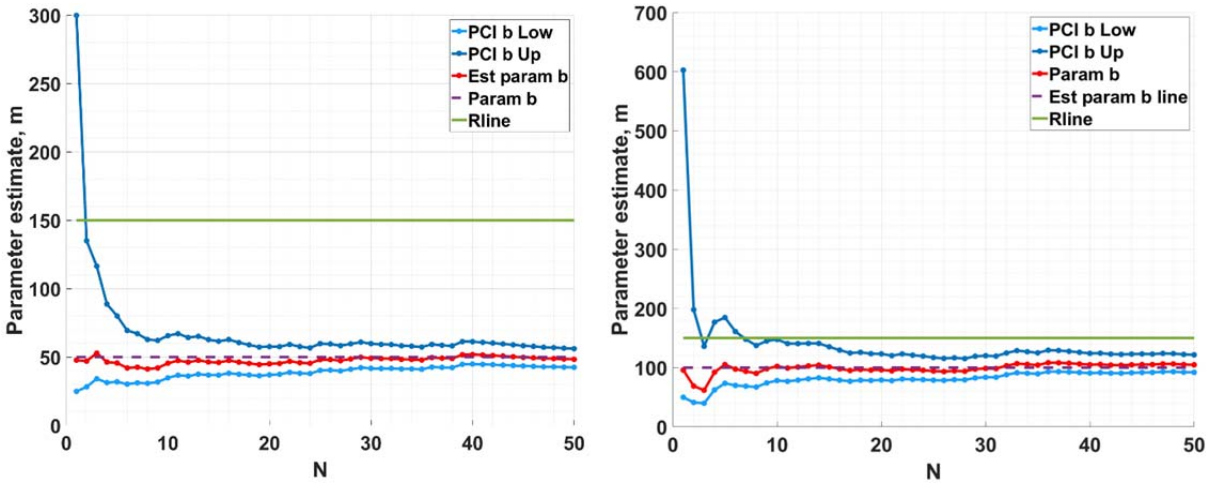


**Рис. 1.** Графики оценки параметров распределения Рэлея для входных значений: $b = 50$ и $b = 100$
**Fig. 1.** Graphs for the estimate of the Rayleigh distribution parameters for the input values: $b = 50$ and $b = 100$

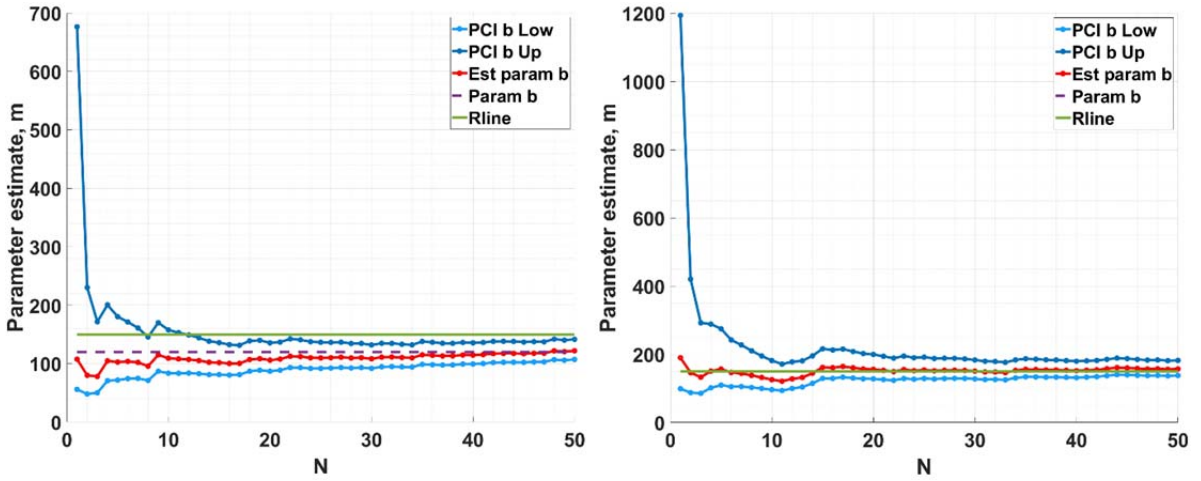


**Рис. 2.** Графики оценки параметров распределения Рэлея для входных значениях: $b = 120$ и $b = 150$
**Fig. 2.** Graphs for the estimate of the Rayleigh distribution parameters for the input values: $b = 120$ and $b = 150$

ка параметра входных данных, линиями синего и голубого цвета показаны верхний и нижний 95%-ный доверительные интервалы соответственно.

На рис. 1 значения параметра $b$ распределения Рэлея составляют 50 и 100, что соответствует значениям СКО 50 и 100 м. На рис. 2 входные параметры величины $b$ распределения Рэлея составляют 50 и 100, что соответствует значениям СКО 50 и 100 м. На рисунках приняты следующие обозначения: PCI b Up и PCI b Low – верхний и нижний 95%-ный доверительный интервал оценки параметра $b$ распределения Рэлея; Param b – заданное исходное значение параметра $b$; Est param b – оценка параметра $b$; Rline – граница области строба (условие достоверности данных АЗН-В).

На рис. 3 приведены результаты оценки параметров распределения Райса при входных параметрах распределения $s = 100$, $\sigma = 50$, что соответствует МО 100 м, СКО 50 м. На рис. 4 приведены результаты оценки параметров распределения Райса по выборке из генеральной совокупности случайной величины, распределенной по закону Райса, при входных параметрах распределения $s = 200$, $\sigma = 100$, что соответствует МО 200 м,

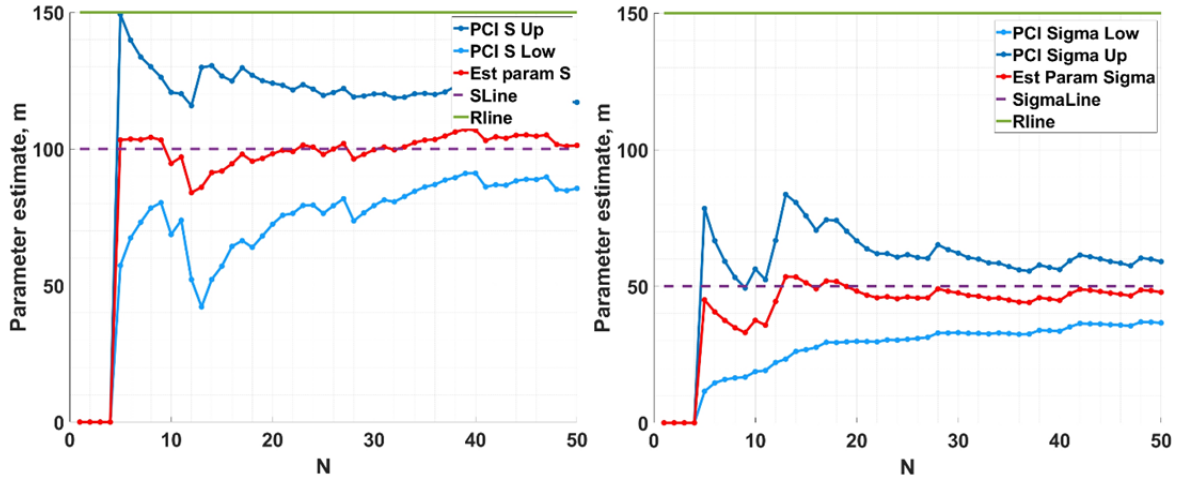


**Рис. 3.** Графики оценки параметров распределения Райса для входных значений $s$ = 100, σ = 50
**Fig. 3.** Graphs for the estimate of the Rice distribution parameters for the input values $s$ = 100, σ = 50

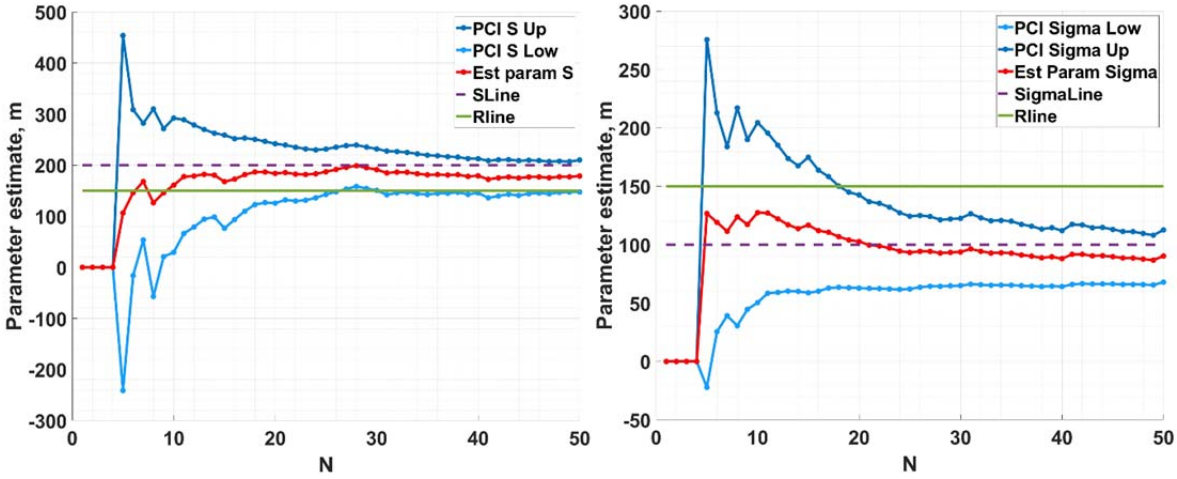


**Рис. 4.** Графики оценки параметров распределения Райса для входных значений $s$ = 200, σ = 100
**Fig. 4.** Graphs for the estimate of the Rice distribution parameters for the input values $s$ = 200, σ = 100

СКО 100 м. На рис. 5 приведены результаты оценки параметров распределения Райса при входных параметрах распределения $s$ = 300, σ = 150, что соответствует МО 300 м, СКО 150 м. Оценка параметров входных данных по накопленным значениям начинается после 5 измерений. На рисунках приняты следующие обозначения: PCI Sigma Up и PCI Sigma Low – верхний и нижний 95%-ный доверительный интервал оценки параметра σ; PCI S Up и PCI S Low – верхний и нижний 95%-ный доверительный интервал оценки параметра $s$; Est param Sigma и Est param S – оценка параметров σ и $s$; SigmaLine и Sline – заданные значения параметров σ и $s$; Rline – граница области строба (условие достоверности данных АЗН-В).

В результате моделирования было установлено, что для выполнения условия достоверности, оценка параметров случайной величины, распределенной по закону Рэлея, может быть выполнена за 15–20 измерений, что при условии передачи бортовым оборудованием АЗН-В двух сообщений в секунду соответствует 8–10 с. Для выполнения условия достоверности оценка параметров случайной величины, распределенной по закону распределения Райса, может быть

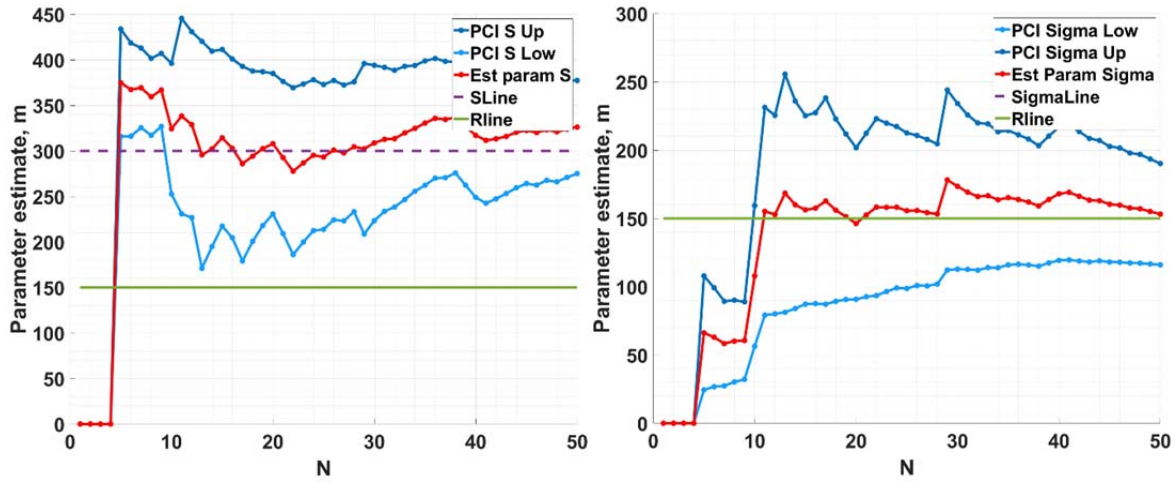


**Рис. 5.** Графики оценки параметров распределения Райса для входных значений $s$ = 300, σ = 150
**Fig. 5.** Graphs for the estimate of the Rice distribution parameters for the input values $s$ = 300, σ = 150

выполнена за 25–30 измерений, что при условии передачи бортовым оборудованием АЗН-В двух сообщений в секунду соответствует 13–15 с.

Полученные результаты позволяют сделать вывод о возможности применения наземных станций АЗН-В на региональных аэродромах с низкой интенсивностью полетов в качестве основного средства наблюдения. Например, на аэродромах Усть-Куйга, Чокурдах, Черский и других классов Г и Д целесообразно заменить выработавшие ресурс радиолокаторы (преимущественно ДРЛ-7СМ) станциями АЗН-В с модернизацией программного обеспечения (блок обработки сообщений АЗН-В) для обеспечения возможности подтверждения данных АЗН-В. По сравнению с вводом современных радиолокаторов (например, АОРЛ-1АС) это даст экономию порядка 120–150 млн руб. для каждого аэродрома.

## Обсуждение полученных результатов

Ошибка определения местоположения вычисляется относительно точки экстраполяции координат ВС, то есть относительно центра области строба. Для рассмотренных типовых ситуаций с принятым допущением о равенстве ошибок по осям *Ox*, *Oy* прямоугольной декартовой системы координат, целесообразно применять распределения Рэлея и Райса. Однако на практике более вероятны ситуации, выходящие за рамки рассмотренных. Погрешности по осям *Ox*, *Oy* могут отличаться, причем значительно. Так, при малой ошибке пилотирования может наблюдаться большая навигационная погрешность, то есть МО равно нулю, СКО навигации не равны друг другу: $m = 0$, $\sigma_x \neq \sigma_y$. В этом случае ошибка определения местоположения ВС имеет распределение Хойта (Накагами-q) [17, 23, 24]:

$$w\{r\} = \frac{r}{\sigma_x \sigma_y} \exp\left[-\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_x^2} + \frac{1}{\sigma_y^2}\right)\right] I_0\left[\frac{r^2}{4}\left(\frac{1}{\sigma_x^2} - \frac{1}{\sigma_y^2}\right)\right]. \quad (7)$$

При выполнении полета возможна еще одна ситуация, при которой наблюдается значительное отклонение от схемы полета (МО не равно нулю) и неравенстве СКО навигации $\sigma_x \neq \sigma_y$. В этом случае ошибка определения местоположения ВС имеет распределение Бекманна [20].

Законы распределения Рэлея, Райса и Хойта являются частными случаями распределения Бекманна. Таким образом, вероятность нахождения ВС в области строба может быть рассчитана с использованием распределения Бекманна, так как данное распределение включает все возможные типовые ситуации распределения ошибки определения местоположения ВС. Разработка моделей оценки параметров распределений Хойта и Бекманна для подтверждения достоверности данных АЗН-В методом стробирования является темой дальнейших исследований.

## Заключение

В работе рассмотрен алгоритмический метод подтверждения данных АЗН-В с использованием стробирования. Ошибки определения координат были найдены относительно точки экстраполяции, являющейся центром строба. Были рассмотрены три простейшие типовые ситуации, которые могут возникнуть при определении местоположения воздушного судна с помощью АЗН-В, и предложен алгоритм оценки достоверности получаемых данных. На первом этапе производится оценка с применением распределения Рэлея. В случае невыхода параметра $b$ за пределы допуска делается вывод о достоверности данных АЗН-В (первая типовая ситуация). В случае выхода погрешности за пределы допуска выполняется оценка с применением распределения Райса. При выявлении недопустимо больших ошибок пилотирования с допустимыми погрешностями навигации (вторая типовая ситуация) делается вывод о достоверности данных АЗН-В, диспетчер получает сообщение об отклонении ВС от схемы полета. При выявлении недопустимо больших погрешностей пилотирования и навигации диспетчер получает сообщение о недостоверности данных АЗН-В и необходимости применения иных методов УВД. В результате моделирования установлено, что при выполнении оценки с применением распределения Рэлея достаточно накопления 15–20 измерений, что при передаче двух сообщений в секунду и при условии штатной работы оборудования АЗН-В потребует 8–10 с. При выполнении оценки с применением распределения Райса достаточно накопления 25–30 измерений, что потребует 13–20 с.

Практическая значимость исследования заключается в возможности применения метода стробирования для оценки достоверности данных АЗН-В без необходимости проверки с помощью вторичного радиолокатора или МПСН. Для региональных аэродромов с низкой интенсивностью полетов это позволит заменить выработавшие ресурс радиолокаторы наземными станциями АЗН-В (с модернизацией программного обеспечения), что даст значительную экономию средств.

## Список литературы

1. **Kožović D.V.** Air traffic modernization and control: ADS-B system implementation update 2022: a review / D.V. Kožović, D.Ž. Đurđević, M.R. Dinulović, S. Milić, B.P. Rašuo // FME Transactions. 2023. Vol. 51, no. 1. Pp. 117–130. DOI: 10.5937/fme2301117K

2. **Rozel M.** Construction of a radar cross-section database using ADS-B data from the OpenSky network / M. Rozel, N. Gonçalves, A. Reygrobellet, P. Bruneel // Engineering Proceedings. The Netherlands, Delft, 10–11 November 2022. Vol. 28 (1), no. 4. Pp. 1–10. DOI: 10.3390/engproc2022028004

3. **Mba Andeme J.M.N., Liu Q., Hadi A.** FAA Transition away from radar and towards ADS-B aircraft communication-based on accuracy // Data Mining and Big Data. DMBD 2021. Communications in Computer and Information Science. 2021. Vol. 1454. Pp. 358–374. DOI: 10.1007/978-981-16-7502-7_35

4. **Kalintsev A., Rubtsov E., Povarenkin N.** Application of ADS-B for providing surveillance at civil aviation regional aerodromes // Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Lecture Notes in Mechanical Engineering, in O.A. Gorbachev, X. Gao, B. Li (eds). Springer, Singapore, 2023. Pp. 371–382. DOI: 10.1007/978-981-19-3788-0_33

**5. Левин Д.В., Паршуткин А.В., Тимошенко А.В.** Достоверность селекции целей в сети разнесенных радиолокационных станций при совместной обработке радиолокационной информации в условиях ретранслированных помех // Информационно-управляющие системы. 2022. № 3 (118). С. 55–66. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-3-55-66

**6. Zhou H.** Feature fusion based on Bayesian decision theory for radar deception jamming recognition / H. Zhou, C. Dong, R. Wu, X. Xu, Z. Guo [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2021. No. 9. Pp. 16296–16304. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052506 (дата обращения: 08.12.2022).

**7. Ахмедов Р.М., Бибутов А.А., Васильев А.В. и др.** Автоматизированные системы управления воздушным движением: новые информационные технологии в авиации: учеб. пособие. СПб.: Политехника, 2004. 446 с.

**8. Богатюк А.С., Витушкин В.В., Затучный Д.А.** Алгоритмы выявления различных навигационных погрешностей во время полета воздушного судна на основе комплексного использования информации // Труды Международного симпозиума «Надежность и качество». 2018. Т. 1. С. 287–290.

**9. Калинцев А.С., Рубцов Е.А., Плясовских А.П.** Подтверждение данных АЗН-В в аэродромной зоне методом стробирования // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15, № 7. С. 39–49. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49

**10. Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.** Теория вероятностей и ее инженерные приложения. 2-е изд., стер. М.: Высшая школа, 2000. 480 с.

**11. Шерстнева А.А.** Оценка параметров одномерного и двумерного распределения случайных величин // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. 2020. № 5 (121). С. 63–67. DOI: 10.34680/2076-8052.2020.5(121).63-67

**12. Облакова Т.В.** Математические и инженерные примеры законов распределений случайных величин в ЦОС Nomotex / Т.В. Облакова, К.М. Зубарев, А.А. Сальникова, Д.С. Шинаков [Электронный ресурс] // Дневник науки. 2022. № 12 (72). ID: 58. DOI: 10.51691/2541-8327_2022_12_29 (дата обращения: 08.12.2022).

**13. Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2003. 400 с.

**14. Пицык В.В., Суховерхова Л.В., Дмитриев С.А.** Модель оценки точности управления робототехническим комплексом с использованием усеченного справа распределения Рэлея // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. 2020. № 1. С. 54–59. DOI: 10.25257/FE.2020.1.54-59

**15. Пахотин В.А.** Раздельное обнаружение сигналов в радиолокации / В.А. Пахотин, К.В. Власова, М.В. Богач, В. Бессонов // Цифровая обработка сигналов и ее применение (DSPA-2022): сборник трудов 24-й Международной конференции. Москва, 30 марта – 01 апреля 2022 г. М.: РНТОРЭС им. А.С. Попова, 2022. Т. XXIV. С. 192–196.

**16. Яковлева Т.В.** Свойство устойчивости статистического распределения Райса: теория и применение в задачах измерения фазового сдвига сигналов // Компьютерные исследования и моделирование. 2020. Т. 12, № 3. С. 475–485. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-475-485

**17. Das D., Subadar R.** Performance analysis of QAM for L-MRC receiver with estimation error over independent Hoyt fading channels // AEU-International Journal of Electronics and Communications. 2019. Vol. 107. Pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.aeue.2019.05.005

**18. Jia H.** Ergodic capacity analysis for FSO communications with UAV-equipped IRS in the presence of pointing error / H. Jia, J. Zhong, M.N. Janardhanan, G. Chen // 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT), 2020. Pp. 949–954. DOI: 10.1109/ICCT50939.2020.9295740

**19. Simon M.K., Alouini M.-S.** Digital communication over fading channels. A unified approach to performance analysis. John Wiley & Sons, 2000. 546 p.

**20. Beckmann P.** Statistical distribution of the amplitude and phase of multiply scattered field // Journal of Research of the National Bureau of Standards. 1972. Vol. 66D, no. 3. Pp. 231–240.

**21. Al-Hmood H., Al-Raweshidy H.** Performance analysis of physical-layer security over fluctuating Beckmann fading channels [Электронный ресурс] // IEEE Access. 2019. Vol. 7. Pp. 119541–119556. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937631 (дата обращения: 08.12.2022).

**22. Sawicki D.** Microfacet distribution function: To change or not to change, that is the question // Proceedings of the16th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2021), 2021. Vol. 1. Pp. 209–220. DOI: 10.5220/0010252 702090220

**23. Shawkat S.B.** Fundamental capacity analysis for identically independently distributed Nakagami-Q Fading / S.B. Shawkat, Md. Mazid-Ul-Haque, Md. Sohidul, B. Sarker // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. Vol. 11, no. 9. Pp. 659–663. DOI: 10.14569/ijacsa.2020.0110978

**24. Md. Mazid-Ul-Haque, Md. Islam S.** Data rate limit in low and high SNR regime for Nakagami-Q Fading Wireless Channel // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2020. Vol. 11, no. 7. Pp.636–641. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110776

## References

**1. Kožović, D.V., Đurđević, D.Ž., Dinulović, M.R., Milić, S., Rašuo, B.P.** (2023). Air traffic modernization and control: ADS-B system implementation update 2022: a review. *FME Transactions*, vol. 51, no. 1, pp. 117–130. DOI: 10.5937/fme2301117K

**2. Rozel, M., Gonçalves, N., Reygrobellet, A., Bruneel, P.** (2022). Construction of a radar cross-section database using ADS-B data from the OpenSky network. *In: Engineering Proceedings*, vol. 28 (1), no. 4, pp. 1–10. DOI: 10.3390/engproc2022028004

**3. Mba Andeme, J.M.N., Liu, Q., Hadi, A.** (2021). FAA Transition Away from Radar and Towards ADS-B Aircraft Communication-Based on Accuracy. *Data Mining and Big Data. DMBD 2021. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1454, pp. 358–374. DOI: 10.1007/978-981-16-7502-7_35

**4. Kalintsev, A., Rubtsov, E., Povarenkin, N.** (2023). Application of ADS-B for providing surveillance at civil aviation regional aerodromes. *In: Proceedings of 10th International Conference on Recent Advances in Civil Aviation. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, in Gorbachev, O.A., Gao, X., Li, B. (eds). Springer, Singapore, pp. 371–382. DOI: 10.1007/978-981-19-3788-0_33

**5. Levin, D.V., Parshutkin, A.V., Timoshenko, A.V.** (2022). Reliability of target selection in the network of geographically separated radar stations in joint processing of radar information in the conditions of relayed interference. *Information and Control Systems*, no. 3 (118), pp. 55–66. DOI: 10.31799/1684-8853-2022-3-55-66 (in Russian)

**6. Zhou, H., Dong, C., Wu, R., Xu, X., Guo, Z.** (2021). Feature fusion based on Bayesian decision theory for radar deception jamming recognition. *IEEE Access*, no. 9, pp. 16296–16304. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3052506 (accessed: 08.12.2022).

**7. Akhmedov, R.M., Bibutov, A.A., Vasiliev, A.V. et al.** (2004). Automated air traffic control systems: New information technologies in aviation: Tutorial. St. Petersburg: Politekhnika, 446 p. (in Russian)

**8. Bogatyuk, A.S., Vitushkin, V.V., Zatuchnyy, D.A.** (2018). Algorithms for identifying various navigation errors during an aircraft flight based on the integrated use of information. *Transactions of the International Symposium on Reliability and Quality*, vol. 1, pp. 287–290. (in Russian)

**9. 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.7, pp. 39–49. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-7-39-49 (in Russian)

**10. Ventzel, E.S., Ovcharov, L.A.** (2000). Probability theory and its engineering applications. 2nd ed. ster. Moscow: Vyshaya shkola, 480 p. (in Russian)

**11. Sherstneva, A.A.** (2020). Parameters estimation of one-dimension and two-dimension distribution of random variables. *Vestnik NOVSU*, no. 5 (121), pp. 63–67. DOI:

10.34680/2076-8052.2020.5(121).63-67 (in Russian)

**12. Oblakova, T.V., Zubarev, K.M., Salnikova, A.A., Shinakov, D.S.** (2022). Mathematical and engineering examples of random variable distribution law in DLS Nomotex. *Dnevnik Nauki*, no. 12 (72), ID: 58. DOI: 10.51691/2541-8327_2022_12_29 (in Russian)

**13. Perov, A.I.** (2003). Statistical theory of radio engineering systems: Tutorial for Universities. Moscow: Radiotechnika, 400 p. (in Russian)

**14. Pitsyk, V.V., Sukhoverkhova, L.V., Dmitriev, S.A.** (2020). Model for assessing the accuracy of controlling the robotic complex using Rayleigh's right truncated distribution. *Fire and Emergencies: Prevention, Elimination*, no. 1, pp. 54–59. DOI: 10.25257/FE.2020.1.54-59 (in Russian)

**15. Pakhotin, V.A., Vlasova, K.V., Bogach, M.V., Bessonov, V.A.** (2022). Separate detection of signals in radiolocation. *Digital signal processing and its applications (DASPA-2022)*. Moscow: RNTORES imeni A.S. Popova, vol. XXIV, pp. 192–196. (in Russian)

**16. Yakovleva, T.V.** (2020). Stable character of the rice statistical distribution: the theory and application in the tasks of the signals' phase shift measuring. *Computer research and modeling*, vol. 12, no. 3, pp. 475–485. DOI: 10.20537/2076-7633-2020-12-3-475-485 (in Russian)

**17. Das, D., Subadar, R.** (2019). Performance analysis of QAM for L-MRC receiver with estimation error over independent Hoyt fading channels. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 107, pp. 15–20. DOI: 10.1016/j.aeue.2019.05.005

**18. Jia, H., Zhong, J., Janardhanan, M.N., Chen, G.** (2020). Ergodic capacity analysis for FSO communications with UAV-equipped IRS in the presence of pointing error. *In: 2020 IEEE 20th International Conference on Communication Technology (ICCT)*, pp. 949–954. DOI: 10.1109/ICCT50939.2020.9295740

**19. Simon, M.K., Alouini, M.-S.** (2000). Digital communication over fading channels. A unified approach to performance analysis. John Wiley & Sons, 546 p.

**20. Beckmann, P.** (1972). Statistical distribution of the amplitude and phase of multiply scattered field. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 66D, no. 3, pp. 231–240.

**21. Al-Hmood, H., Al-Raweshidy, H.** (2019). Performance analysis of physical-layer security over fluctuating Beckmann fading channels. *IEEE Access*, vol. 7, pp. 119541–119556. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2937631 (accessed: 08.12.2022).

**22. Sawicki, D.** (2021). Microfacet distribution function: To change or not to change, that is the question. *In: Proceedings of the 16th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications (VISIGRAPP 2021)*, vol. 1, pp. 209–220. DOI: 10.5220/0010252702090220

**23. Shawkat, S.B., Md. Mazid-Ul-Haque, Md. Sohidul, Sarker, B.** (2020). Fundamental capacity analysis for identically independently distributed Nakagami-Q Fading. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 9, pp. 659–663. DOI: 10.14569/ijacsa.2020.0110978

**24. Md. Mazid-Ul-Haque, Md. Islam, S.** (2020). Data rate limit in low and high SNR regime for Nakagami-Q Fading Wireless Channel. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 11, no. 7, pp. 636–641. DOI: 10.14569/IJACSA.2020.0110776

## Сведения об авторах

**Рубцов Евгений Андреевич,** кандидат технических наук, специалист научно-образовательного центра воздушного транспорта Российского университета транспорта (МИИТ), rubtsov.rut.miit@gmail.com.

**Кудряков Сергей Алексеевич,** доктор технических наук, старший научный сотрудник, директор научно-образовательного центра воздушного транспорта Российского университета транспорта (МИИТ), psi_center@mail.ru.

**Далингер Яков Михайлович,** кандидат технических наук, доцент, проректор Российского университета транспорта (МИИТ), iakovdalinger@gmail.com.

**Калинцев Андрей Сергеевич,** инженер по радионавигации, радиолокации и связи, Архангельский центр ОВД филиала «Аэронавигация Северо-Запада» ФГУП «Государственная корпорация по организации воздушного движения в Российской Федерации», kas4job@gmail.com.

## Information about the authors

**Evgeny A. Rubtsov,** Candidate of Technical Sciences, Specialist of the Scientific and Educational Center of Air Transport, Russian University of Transport (MIIT), rubtsov.rut.miit@gmail.com.

**Sergey A. Kudryakov,** Doctor of Technical Sciences, Senior Researcher, Director of the Scientific and Educational Center of Air Transport, Russian University of Transport (MIIT), psi_center@mail.ru.

**Iakov M. Dalinger,** Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vice-Rector of the Russian University of Transport (MIIT), iakovdalinger@gmail.com.

**Andrey S. Kalintsev,** Radio Navigation, Radio Location and Communication Engineer, Arkhangelsk Air Traffic Management Center, North-West Air Navigation Branch, FSUE “State Air Traffic Management Corporation of the Russian Federation”, kas4job@gmail.com.

| | | | |
|---|---|---|---|
| Поступила в редакцию | 22.03.2023 | Received | 22.03.2023 |
| Одобрена после рецензирования | 20.04.2023 | Approved after reviewing | 20.04.2023 |
| Принята в печать | 20.07.2023 | Accepted for publication | 20.07.2023 |