

Труды МАИ. 2025. № 143
Trudy MAI. 2025. No. 143. (In Russ.)

Научная статья
УДК 621.396.96
URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185646>
EDN: <https://www.elibrary.ru/ELRDТМ>

ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ СТАТИСТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРИ ЦИФРО-НАТУРНЫХ ИСПЫТАНИЯХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Александр Анатольевич Безуглов¹, Константин Юрьевич Гаврилов²✉

¹Открытое акционерное общество «ОКБ Сухого»,
Москва, Россия

²Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

¹bezuglov_70@mail.ru

²gvrk61@mail.ru✉

Аннотация. Разработана методика оценки достоверности статистического моделирования параметров метеорологических явлений (МЯ) при цифро-натурных испытаниях радиолокационных комплексов (РЛК). Поскольку математическое моделирование позволяет существенно сократить сроки испытаний метеорологических РЛК (МРЛК), то вопрос о достоверности его результатов становится весьма актуальным.

Предложенная методика оценки достоверности состоит из двух этапов. На первом этапе с помощью правила Томпсона оценивается достоверность результатов

экспериментов, полученных как при натуральных испытаниях, так и при статистическом моделировании. При этом недостоверные результаты экспериментов отбраковываются, т.е. удаляются из дальнейшего анализа.

На втором этапе вычисляется оценка достоверности результатов статистического моделирования МЯ путем проверки гипотезы об идентичности распределения вероятностей двух выборок – выборки на основе моделирования и выборки на основе натуральных испытаний. Проверка данной гипотезы выполняется на основе критерия согласия Колмогорова-Смирнова.

В работе приводится пример анализа цифро-натурных испытаний, соответствующих результатам статистического моделирования и натуральных экспериментов. Описаны условия проведения натуральных испытаний МРЛК, а также виды и параметры исследуемых МЯ. Показано, какие результаты экспериментов подлежат отбраковке и насколько справедлива гипотеза об идентичности двух выборок при заданном уровне значимости.

Ключевые слова: метеорологический радиолокационный комплекс, цифро-натурный эксперимент, метеорологические явления, статистическое моделирование, критерий согласия

Для цитирования: Безуглов А.А., Гаврилов К.Ю. Оценка достоверности статистического моделирования параметров метеорологических явлений при цифро-натурных испытаниях радиолокационных комплексов // Труды МАИ. 2025. № 143.

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=185646>

Original article

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF STATISTICAL MODELING OF METEOROLOGICAL PHENOMENON PARAMETERS DURING DIGITAL FIELD TESTS OF RADAR SYSTEMS

Alexander A. Bezuglov¹, Konstantin Yu. Gavrilov²✉

¹Aviation corporation SUKHOI,

Moscow, Russia

²Moscow Aviation Institute (National Research University),

Moscow, Russia

¹bezuglov_70@mail.ru

²gvrk61@mail.ru✉

Abstract. The assessment of the main functional characteristics of meteorological radar systems (MRS) in the near-airfield zone is associated with the need to conduct numerous field tests under various operating conditions. Conducting field tests leads to long testing periods and significant financial costs.

One of the most effective ways to reduce the testing time of radar systems is the digital-natural method of evaluating the characteristics of systems based on statistical modeling of input signals corresponding to various types of meteorological phenomena. This article describes the developed methodology for assessing the reliability of statistical modeling of meteorological phenomena parameters during digital-natural testing of radar systems. Since mathematical modeling can significantly reduce the testing time for MRS, the issue of the reliability of its results becomes very important.

It is assumed that the results of the measurements are such parameters of meteorological phenomena as radar reflectivity of meteorological objects, their radial velocity, the width of the Doppler spectrum of radial velocities, the specific rate of attenuation of turbulent energy, etc. Under the conditions of conducting experiments, in other words, the conditions of testing the MRS, the geographical location of the MRS, the season of the time of year of the test, etc.

The proposed method of assessing the reliability consists of two stages. In the first stage, the reliability of the experimental results is assessed separately for each combination of factors (conditions). The purpose of this stage is to discard outliers, or anomalous data, using the Thompson rule. In this process, unreliable experimental results are discarded and removed from further analysis. It is important to note that the reliability assessment of experimental results is performed for data obtained from both field tests and statistical modeling. In the first stage of data processing, it is assumed that the simulation results have a Gaussian distribution characterized by two parameters: the mean value and the variance, for which sample estimates are calculated. According to the Thompson rule, abnormal measurements are discarded by thresholding the normalized statistics.

At the second stage, the reliability of the results of statistical modeling of meteorological phenomena is estimated by testing the hypothesis of the identity of the probability distribution of two samples – a sample based on modeling and a sample based on field tests. The test of this hypothesis is performed based on the Kolmogorov-Smirnov test of goodness of fit, which compares the statistics in the form of the norm of the difference

between two empirical distributions with a threshold selected based on a given significance level.

All numerical calculations were performed in the Matlab environment using standard functions for the Thompson and Kolmogorov-Smirnov criteria.

The paper provides an example of the analysis of digital-field tests corresponding to the results of statistical modeling and field experiments. The conditions for conducting field tests of the MRS, as well as the types and parameters of the meteorological phenomena studied, are described. The significance level values were set in the range of 0.01...0.1. It is shown which experimental results should be discarded and how valid the hypothesis of the identity of two samples is at the specified significance level. The obtained modeling results indicate the adequacy of the signal models to the real values. Thus, by statistical modeling of signals of various meteorological phenomena, it is possible to evaluate various tactical and technical characteristics of the MRS, such as the probabilities of detecting various meteorological phenomena and the accuracy of estimating their parameters. The degree of adequacy of the modeling results depends on the selected threshold values in the first stage of the reliability assessment and the significance level in the second stage of the reliability assessment.

Keywords: meteorological radar complex, digital field experiment, meteorological phenomena, statistical modeling, criterion of agreement

For citation: Bezuglov A.A., Gavrilov K.Yu. Assessment of the reliability of statistical modeling of meteorological phenomenon parameters during digital field tests of radar

Введение

Оценка основных функциональных характеристик сложных технических систем, как правило, связана с необходимостью проведения многочисленных натурных испытаний в различных условиях функционирования этих систем. Проведение натурных испытаний обычно приводит к длительным срокам тестирования комплексов и большим материальным затратам, необходимым для его выполнения.

В значительной степени это относится к испытаниям метеорологических радиолокационных комплексов (МРЛК) ближней аэродромной зоны, в связи с необходимостью оценки множества параметров различных метеорологических явлений (МЯ), степень повторяемости которых является случайной величиной. Вопросы натурных испытаний МРЛК и возникающие при этом трудности описаны в [1-4].

Одним из наиболее эффективных способов сокращения сроков испытаний МРЛК является цифро-натурный метод оценки характеристик комплексов, основанный на статистическом моделировании входных сигналов, соответствующих различным видам МЯ [5]. Достоинства такого подхода, подробно описанного в [5, 6], могут быть реализованы лишь в случае, когда результаты статистического моделирования имеют высокую степень достоверности, т.е. адекватны реальным измерениям параметров МЯ, полученным в ходе натурных испытаний.

Оценке достоверности статистического моделирования результатов натуральных испытаний посвящена данная работа.

Целью работы является разработка методики оценки достоверности статистического моделирования параметров МЯ результатам натуральных испытаний МРЛК, основанная на предварительной отбраковке данных с помощью правила Томпсона и использовании критерия согласия Колмогорова-Смирнова для верификации выборки, полученной путем моделирования.

В работе приводится пример анализа цифро-натурных испытаний, соответствующих результатам статистического моделирования и натуральных экспериментов.

Вопросы моделирования радиолокационных сигналов, основные принципы которых использованы при проведении моделирования МЯ в данной работе, изложены в [7-10].

1. Постановка задачи

Оценку параметров МЯ, получаемых в результате работы МРЛК, будем обозначать как $z_j^{(i)}$, где верхний индекс $i \in I_n$ соответствует виду условий проведения испытаний, а нижний индекс – порядковому номеру эксперимента $j = 1, \dots, K_i$, проведенному в условиях с номером i . Под условиями проведения экспериментов понимается, например, географическое месторасположение МРЛК, сезон времени года проведения испытаний и т.д. Обычно число различных условий множества I_n невелико и, как правило, не превышает числа 5 6, см. [11-16].

Результатами измерений $z_j^{(i)}$ являются такие параметры МЯ, как радиолокационная отражаемость, радиальная скорость, ширина доплеровского спектра радиальных скоростей, удельная скорость затухания турбулентной энергии и др. [5, 6, 11-14, 17]. Значения $z_j^{(i)}$ вычисляются на основе обработки сигналов в МРЛК, полученных в ходе проведения натуральных испытаний – это записи реальных сигналов для j -го эксперимента в i -х условиях.

Значения параметров МЯ, полученные в результате статистического моделирования радиолокационных сигналов и при использовании той же обработки в МРЛК, будем обозначать как $\tilde{z}_j^{(i)}$, где индексы i и j имеют тот же смысл, что и для значений $z_j^{(i)}$.

Оценка достоверности результатов статистического моделирования заключается в определении факта принадлежности выборок $\mathbf{Z} = \{z_j^{(i)}, j = 1, \dots, K_i, i = 1, \dots, I_n\}$ и $\tilde{\mathbf{Z}} = \{\tilde{z}_j^{(i)}, j = 1, \dots, \tilde{K}_i, i = 1, \dots, I_n\}$ одному и тому же распределению при заданной вероятности ошибки (уровне значимости) α .

2. Метод оценки результатов моделирования

Оценка достоверности результатов моделирования состоит из двух этапов. На первом этапе оценивается достоверность каждого результата эксперимента $z_k^{(i)}$ отдельно для каждой комбинации факторов (условий) $i \in I_n$. Целью этого этапа является отбраковка резко выделяющихся, иначе говоря, аномальных данных, с помощью правила Томпсона.

Следует отметить, что подобная процедура отбраковки данных, называемая предварительной обработкой, применяется как к результатам статистического моделирования, так и к данным, полученным при проведении натуральных испытаний.

На втором этапе проводится общая оценка достоверности моделирования для всех условий $i \in I_n$ с целью проверки гипотезы об идентичности распределения вероятностей двух выборок – выборки данных на основе статистического моделирования и выборки данных натуральных испытаний. На этом этапе для решения указанной задачи используется критерий согласия Колмогорова-Смирнова.

Рассмотрим подробнее каждый из указанных этапов обработки данных.

При обработке данных на первом этапе предполагается, что результаты моделирования $\mathbf{Z}^{(i)} = \{z_k^{(i)}, k = 1, \dots, K_i\}$ имеют гауссовское распределение со средним значением $m_k^{(i)}$ и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_k^{(i)}$. На основании числа $N = K_i$ выборочных значений $\mathbf{Z}^{(i)}$ вычисляются оценки среднего значения $\hat{m}_k^{(i)}(N) = \hat{m}_k^{(i)}$ и СКО $\hat{\sigma}_k^{(i)}$, которые затем используются для формирования статистик

$$t_k^{(i)} = \frac{z_k^{(i)} - \hat{m}_k^{(i)}}{\hat{\sigma}_k^{(i)}} . \quad (1)$$

Согласно правилу Томпсона [18], резко выделяющимися наблюдениями $z_k^{(i)}$, подлежащими отбраковке, считаются те, для которых выполняется условие

$$|t_k^{(i)}| > T_{\text{кр}} , \quad (2)$$

где $T_{\text{кр}}$ – порог отбраковки выборочных значений. Критические значения $T_{\text{кр}}$ вычисляются через квантили $t_{m,q}$ порядка $q = 1 - (\alpha / 2)$ распределения Стьюдента с $m = N - 2$ степенями свободы по формуле

$$T_{\text{кр}} = \frac{\sqrt{t_{m,q}^2 (m+1)}}{\sqrt{t_{m,q}^2 + m}}. \quad (3)$$

Здесь α – заданный уровень значимости – вероятность ошибки первого рода, состоящая в отбраковке презентативного выборочного значения. Критические значения $T_{\text{кр}}$ приводятся в справочной литературе [20], однако их удобнее вычислять в математическом пакете Matlab, где величина t –распределения задается обратной T -кумулятивной функцией распределения Стьюдента с помощью функции **tinvs** [21].

Заметим, что процедура отбраковки аномальных значений применяется как к результатам статистического моделирования, так и к данным натуральных испытаний. Во втором случае в соотношении (1) вместо $z_k^{(i)}$ следует использовать значения $\tilde{z}_k^{(i)}$, $k = 1, \dots, \tilde{K}_i$. В этом случае статистики вида (1), полученные на основе результатов натуральных испытаний $\tilde{z}_k^{(i)}$, будем обозначать $\tilde{t}_k^{(i)}$.

Если гипотеза принятия выборочного значения отвергается, то необходимо провести дополнительные исследования входных сигналов для данных условий i и детализировать модели сигналов. Если после проведенных мероприятий данная гипотеза вновь отвергается, то необходимо провести повторный натуральный эксперимент в этих же условиях i .

На втором этапе проводится общая оценка достоверности моделирования для всех условий $i \in I_n$ по критерию согласия Колмогорова-Смирнова, который служит для проверки гипотезы H_0 о принадлежности двух выборок одной и той же генеральной совокупности при условии непрерывности ее функции распределения [19]. Иначе говоря, гипотеза H_0 , подлежащая проверке, заключается в предположении, что непрерывные функции распределений двух генеральных совокупностей, из которых извлечены две выборки, идентичны друг другу.

Задачей второго этапа является проверка гипотезы H_0 об идентичности двух генеральных совокупностей, из которых извлечены выборки $\mathbf{t}_k = (t_k^{(1)}, \dots, t_k^{(I_n)})$ и $\tilde{\mathbf{t}}_k = (\tilde{t}_k^{(1)}, \dots, \tilde{t}_k^{(M)})$. Для проверки гипотезы H_0 используем критерий согласия Колмогорова-Смирнова [19], в котором вычисляется статистика

$$D_{I_n, M} = \max |F_{I_n}(t_k^{(i)}) - G_M(\tilde{t}_k^{(i)})|, \quad (4)$$

где F_{I_n} , G_M – эмпирические функции распределений, построенные по выборкам \mathbf{t}_k и $\tilde{\mathbf{t}}_k$ соответственно.

Если гипотеза H_0 верна, т.е. выборки \mathbf{t}_k и $\tilde{\mathbf{t}}_k$ можно считать идентичными, то при $I_n M / (I_n + M) \rightarrow \infty$ функция распределения величины

$$D_{I_n, M} \sqrt{\frac{I_n M}{I_n + M}} \quad (5)$$

сходится к функции распределения Колмогорова. Это обстоятельство позволяет при использовании критерия Колмогорова-Смирнова отвергать гипотезу H_0 на уровне значимости α , если

$$K_{1-\alpha} > D_{I_n, M} \sqrt{\frac{I_n M}{I_n + M}} . \quad (6)$$

Значения квантилей $K_{1-\alpha}$ распределения Колмогорова табулированы и приведены в таблицах [20].

Оценка достоверности результатов моделирования проиллюстрирована на примере статистической обработки данных МРЛК в разделе 5 статьи. При этом проведение численных расчетов выполнено в среде Matlab с использованием стандартной функции **kstest2** [21]. Отметим, что команда **H = kstest2(X1,X2)** выполняет проверку теста Колмогорова-Смирнова (KS - test), чтобы определить, взяты ли независимые случайные выборки **X1** и **X2** из одной и той же основной непрерывной совокупности. При этом выходной параметр **H** содержит результат проверки гипотезы H_0 :

- **H = 0** означает принятие гипотезы при уровне значимости 5%;
- **H = 1** означает отклонение гипотезы при уровне значимости 5%.

При выполнении команды для каждой из выборок **X1** и **X2** выполняется расчет их эмпирических функций распределения.

4. Условия проведения натуральных испытаний

В качестве исходных данных анализа натуральных испытаний использованы результаты измерений МРЛК ближней зоны (БЗ) радиолокационной отражаемости МЯ [3] (удельной эффективной площади отражения от метеообразований) и результаты моделирования радиолокационной отражаемости МЯ на полунатурном стенде.

Для проверки приемлемой идентификации метеорологических явлений и корректного определения величин метеорологических характеристик и параметров на одном из этапов испытаний МРЛК ближней аэродромной зоны проводилась непосредственная валидация метеорологических радиолокационных данных МРЛК БЗ с данными из априорно достоверных источников.

За достоверные источники принимались наземные метеорологические сертифицированные радиолокаторы (далее – СМРЛК) сети Росгидромет.

Для определения порядка и правил валидации перед натурными испытаниями МРЛК БЗ была разработана «Методика валидации данных метеорологических радиолокационных комплексов ближней зоны». В соответствии с разработанной методикой для сравнения нижней границы края облачности (НГКО) и нижней границы радиоэха (НГЭ) по данным двух МРЛК – испытуемого и сертифицированного, проводились следующие расчеты и сравнения:

– качественное сопоставление информации на основе плоской карты с цветовой кодировкой при полном соответствии цветового класса значениям НГКО и НГЭ на картах обоих МРЛК;

– расчет среднего значения и стандартного отклонения выборок разностей максимальных значений НГКО и НГЭ по данным МРЛК и СМРЛК.

Приоритетным способом валидации данных о НГКО и НГЭ являлся статистический расчет среднего значения и стандартного отклонения выборок разностей максимальных значений данных НГКО и НГЭ. В случае отсутствия непосредственных числовых данных для значений НГКО и НГЭ, выполнялось качественное сопоставление информации на основе плоской карты с цветовой кодировкой. При этом сравнении выдвигалось обязательное требование к плоской карте: горизонтальное разрешение должно быть не больше 4x4 км.

Сравнение НГКО и НГЭ проводилось по данным МРЛК и СМРЛК в соответствии со следующими правилами сопоставления двух источников информации.

Пространственное сопоставление двух видов информации на основе плоской карты НГКО и НГЭ проводилось в случае заполненности карты МРЛК не менее чем на 20% в зоне перекрытия.

Сопоставление двух видов информации на основе плоской карты проводилось для временных промежутков (или циклов обновления данных), полученных с интервалом времени не более 2-х минут.

При качественном сопоставлении двух видов информации на основе плоской карты проверялось условие наличия очагов метеорологических образований на обеих картах – МРЛК и СМРЛК. Также проводился анализ формы очага – вида и положения максимальных значений метеорологических образований.

Результаты сравнения получали оценку «отлично» при выполнении трех условий:

- 1) наличии одного и того же очага с максимальными значениями в пределах 10-километровой окрестности, выявленному по двум источникам информации;
- 2) сохранении одинаковой формы очага, определяемой путем сравнения максимальных значений параметров метеорологических образований;
- 3) одинаковое положение области цветового градиента очага для максимальных значений параметров метеорологических образований.

Результаты сравнения получали оценку «хорошо» при выполнении двух условий из трех.

Результаты сравнения получали оценку «удовлетворительно» при выполнении только первого из приведенных условий.

Также проводился расчет среднего значения и стандартного отклонения для разностей выборок максимальных значений параметров НГКО и НГЭ по данным МРЛК и СМРЛК при соблюдении указанных выше правил сопоставлений. После формирования указанных выборок строилась статистическая диаграмма выборки разностей для оценок НГКО и НГЭ в зависимости от их значений по данным испытуемого МРЛК. По статистической диаграмме графическим методом для 95% выборки оценивался характер и величина случайной составляющей разброса оценки НГКО и НГЭ. Затем проводился анализ полученных данных, который включал в себя подтверждение несмещенности оценок НГКО и НГЭ.

Путем пороговой обработки данных проводился отбор достоверных значений, удовлетворяющих условию несмещенности оценки. Все отобранные случаи и результат их статистического и качественного сопоставления вносились в таблицу, которая содержала разделы:

- дата проведения испытаний;
- срок проведения испытаний;
- заполненность карты в зоне перекрытия (в процентах);
- удаление рассматриваемого центра очага метеообразования от МРЛК;
- значение качественной оценки – «отлично», «хорошо» или «удовлетворительно»;
- максимальное значение нижней границы края облачности (НКГО) в км;
- разность значений НКГО, измеренная двумя комплексами.

Определены условия, допускающие возможность сравнения параметров МЯ, полученных на основе данных МРЛК и СМРЛК:

1. Удаление позиций размещения должно быть не больше максимального значения разрешения по дальности для них.
2. Разность позиций размещения комплексов по высоте должна быть минимизирована.
3. Одинаковая радиолокационная видимость МРЛК и СМРЛК.
4. К сопоставлению допускаются только те карты МРЛК и СМРЛК, заполненность которых в зоне перекрытия составляет не менее 20%. При этом заполненность карт МРЛК и СМРЛК должна быть одинаковой.

5. Коэффициенты заполнения луча диаграммы направленности МРЛК и СМРЛК должны быть близки к единице.

5. Примеры анализа цифро-натурных испытаний

В качестве исходных данных натурных и цифровых (компьютерных) испытаний использованы результаты измерений радиолокационной отражаемости МЯ мобильного МРЛК ближней аэродромной зоны и результатов имитационного моделирования соответственно.

Натурные эксперименты проводилось в соответствие с условиями и методикой, описанной в п. 4 данной статьи.

Компьютерное моделирование параметров МЯ проводилось путем имитации таких значений МЯ, как радиолокационная отражаемость, радиальная скорость, ширина спектра скоростей, интенсивность осадков и удельная скорость затухания турбулентной энергии при использовании статистических данных, полученных в результате обработки результатов натурных экспериментов.

На рис. 1 представлены результаты измерений верхней границы облачности в натурном эксперименте МРЛК ближней аэродромной зоны и результаты моделирования на полунатурном стенде (соответствующие результаты измерений обозначены на рисунках символами "o" и "+"). В рассматриваемом случае значения $z_k^{(i)}$ и $\tilde{z}_k^{(i)}$ представляют собой результаты измерений нижнего края облачности (в км), полученные путем статистического моделирования и путем проведения натурных испытаний соответственно. По этим результатам построены векторы нормированных

статистик t_k и \tilde{t}_k (см. соотношение (1)) и вычислены критические значения порогов $T_{кр}$ для разных уровней значимости α (см. рис. 2).

Тестирование по критерию Колмогорова-Смирнова на согласие распределений двух генеральных совокупностей, представленных на рис. 2, показывает, что гипотеза H_0 для критических уровней значимости $\alpha = 0,01 \dots 0,1$ выполняется, хотя, как видно из рис. 2, отдельные значения статистики $t_k^{(i)}$ превышают критические значения $T_{кр}$ соответствующих уровней значимости.

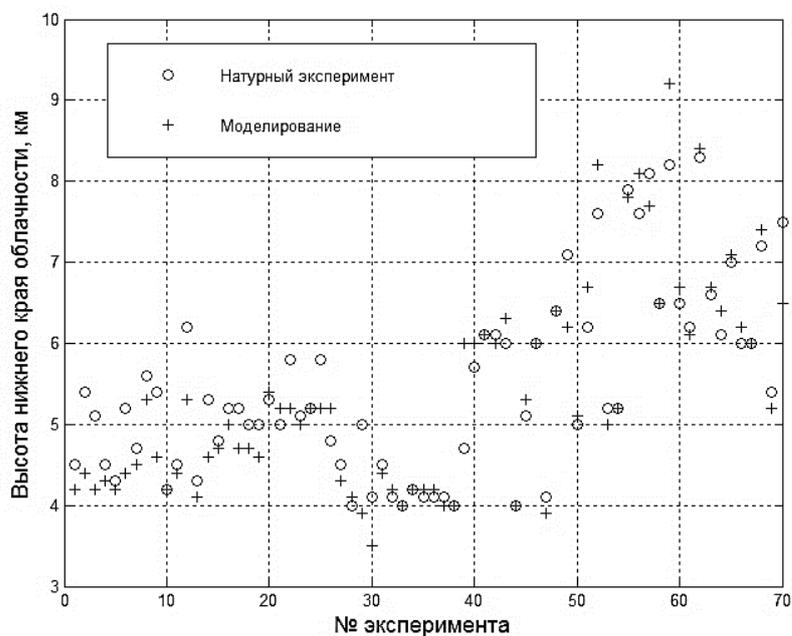


Рис. 1 – Измерение верхней границы облачности в натурном эксперименте МРЛК БЗ и по результатам моделирования на полунатурном стенде

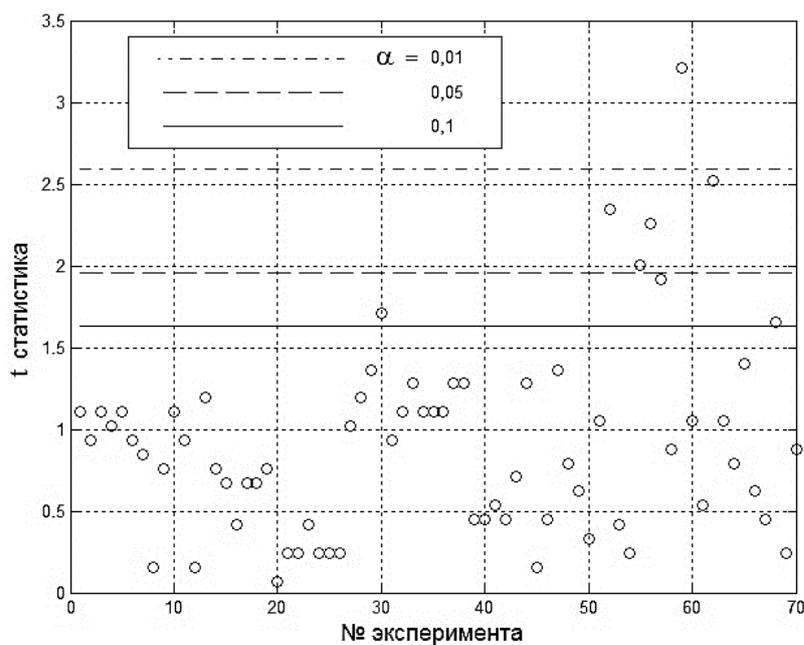


Рис. 2 – Статистика $t_k^{(i)}$ и критические значения $T_{кр}$ (прямые линии) для разных уровней значимости $\alpha = 0,01 \dots 0,1$

Как видно из рис. 2, при уровне значимости $\alpha = 0,1$ доля отбракованных выборок составляет 13%, а при $\alpha = 0,01$ – всего лишь 2%. Эти результаты получены в случае, когда общее число испытаний равно 60.

Таким образом, полученные результаты моделирования свидетельствуют об адекватности моделей сигналов реальным значениям. Следовательно, путем моделирования сигналов различных МЯ возможно оценивание различных тактико-технических характеристик МРЛК – вероятностей обнаружения различных МЯ и точности оценивания их параметров.

Очевидно, что степень адекватности результатов моделирования зависит от выбранных значений порога $T_{кр}$ (на первом этапе оценки достоверности) и уровня значимости α (на втором этапе оценки достоверности).

Заключение

Рассмотрена задача оценки достоверности результатов статистического моделирования параметров метеорологических явлений при цифро-натурных испытаниях радиолокационных комплексов. Получение таких оценок необходимо, когда результаты статистического моделирования сигналов различных МЯ используются для тестирования или оценки тактико-технических характеристик МРЛК при замене натуральных испытаний на цифро-натурные.

Описана методика и условия проведения натуральных испытаний с использованием сертифицированного МРЛК (СМРЛК). Для верификации и сравнения результатов испытаний, полученных на основе различных МРЛК (испытуемого и сертифицированного) введены оценки близости полученных данных, принимающие значения «отлично», «хорошо» и «удовлетворительно». Кроме качественных оценок близости данных используются также и другие параметры сравнения данных МРЛК и СМРК, на основе которых проводится отбраковка недостоверных результатов измерений, полученных с помощью несертифицированного МРЛК.

Описана методика получения оценки достоверности результатов моделирования, которая включает два этапа. На первом этапе проводится отбраковка аномальных результатов испытаний, полученных как при статистическом моделировании, так и при проведении натуральных испытаний – этап предварительной обработки данных. На этом этапе предполагается, что статистики измерений имеют

гауссовское распределение вероятностей, а в качестве критерия отбраковки используется правило Томпсона.

На втором этапе две выборки – значения результатов моделирования и результатов натуральных испытаний, – после процедуры нормировки и обнуления среднего значения, подвергаются проверке на предмет принадлежности одному и тому же распределению вероятностей. Для решения этой задачи на втором этапе используется критерий согласия Колмогорова-Смирнова. Проверка истинной гипотезы (т.е. принадлежность одному распределению) выполняется для фиксированного уровня значимости α – вероятности ошибочного решения.

Приведен пример оценки достоверности моделирования выборки сигналов, характеризующих значения оценок высоты нижнего края облачности. При этом проведено сравнение двух выборок – модельной и на основе натуральных испытаний, выполненное с помощью предложенной методики. Результаты сравнения показали, что при задании различного уровня значимости α от 0,01 до 0,1 имеет место высокая достоверность результатов моделирования, за исключением лишь числа выборок, составляющего долю от 13% при $\alpha = 0,1$ до 2% при $\alpha = 0,01$ от общего числа испытаний, равного 60.

Список источников

1. Безуглов А.А., Галаева К.И., Детков А.Н. Метеорологический радиолокационный комплекс обеспечения безопасности полётов авиации в различных климатических зонах // Полёт. 2017. № 4. С. 46-50.

2. Васильев О.В., Гевак Н.В., Колесников Е.С., Пешко А.С., Сеницын И.А. Разработка метеорологического радиолокационного комплекса ближней аэродромной зоны // Материалы Всероссийской научно-технической конференции «XI Научные чтения, посвященные памяти Н.Е. Жуковского»: сборник докладов. – М.: Издательский дом «Академия им. Н.Е. Жуковского», 2014. С. 455–459.
3. Денисенков Д.А., Жуков В.Ю., Первушин Р.В., Щукин Г.Г. Метод обнаружения сдвига ветра при помощи доплеровского метеорологического радиолокатора // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2016. № 3. С. 68-73.
4. Жуков В.Ю., Щукин Г.Г. Состояние и перспективы сети доплеровских метеорологических радиолокаторов // Метеорология и гидрология. 2014. № 2. С. 92-100.
5. Исаев С.А., Детков А.Н., Безуглов А.А. Цифро-натурный метод оценки характеристик метеорологических радиолокационных комплексов ближней аэродромной зоны // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 3. С. 116–120.
6. Детков А.Н., Сеницын И.А., Безуглов А.А. Математическая модель радиолокационного канала измерения вектора скорости опасных метеорологических явлений в ближней аэродромной зоне // Журнал радиоэлектроники. 2017. № 9. С. 35–38. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/12/text.pdf>
7. Брызгалов А.П., Ковальчук И.В., Хныкин А.В., Шевела И.А., Юсупов Р.Г. Моделирование радиолокатора с синтезированной апертурой при решении задач его

внутреннего и внешнего проектирования // Труды МАИ. 2011. № 43. URL:
<http://trudymai.ru/published.php?ID=24734>

8. Горбунова А.А. Разработка алгоритма получения точечного портрета сложной цели по комплексному радиолокационному изображению // Труды МАИ. 2011. № 45. URL: http://trudymai.ru/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2

9. Булыгин М.Л., Муллов К.Д. Формирователь зондирующего сигнала для радиолокатора с синтезированной апертурой // Труды МАИ. 2015. № 80. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=57040>

10. Гаврилов К.Ю., Каменский К.В., Малютина О.А. Моделирование траекторного сигнала в радаре с синтезированием апертуры на основе оптических изображений земной поверхности // Труды МАИ. 2021. № 118. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-1](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-1)

11. Мельников В.М. Обработка информации в доплеровских МРЛ // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 4. С. 35–43.

12. Довиак Р., Зрнич Д. Доплеровские радиолокаторы и метеорологические наблюдения / Пер. с англ. – Л.: Гидрометеиздат, 1988. – 511 с.

13. Рыжков А.В. Информативность поляризационных измерений в задачах радиолокационной метеорологии. Теоретическая модель // Радиоэлектроника и связь. 1991. № 2. С. 17-23.

14. Рыжков А.В. Поляризационные методы в метеорологической радиолокации // Зарубежная радиоэлектроника. 1993. № 4. С. 18-28.

15. Williams C.R., Beauchamp R.M., Chandrasekar V. Vertical Air Motions and Raindrop Size Distributions Estimated Using Mean Doppler Velocity Difference From 3- and 35-GHz Vertically Pointing Radars // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. 2016. V. 54, No. 10. P. 6048-6060. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2580526](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2580526)
16. Doviak R.J., Zrnić D.S. Doppler Radar and Weather Observations, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1993. 562 p.
17. Гусев С.Н., Сахно И.В., Хуббиев Р.В. Методика оценивания качества формирования виртуальных объектов на радиолокационных изображениях // Труды МАИ. 2019. № 104. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=102169>
18. Шуленин В.П. Дополнительные главы математической статистики. – Томск: Изд-во НТЛ, 2018. – 515 с.
19. Мицель А.А. Прикладная математическая статистика. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники. 2019. – 113 с.
20. Мюллер П., Нойман П., Шторм Р. Таблицы по математической статистике. – М: Финансы и статистика, 1982. – 278 с.
21. Список функций Statistics Toolbox. URL: <http://matlab.exponenta.ru/statist>

References

1. Bezuglov A.A., Galaeva K.I., Detkov A.N. Meteorological radar complex for ensuring aviation flight safety in various climatic zones. *Polet*. 2017. No. 4. (In Russ.). P. 46-50.

2. Vasil'ev O.V., Gevak N.V., Kolesnikov E.S., Peshko A.S., Sinitsyn I.A. Development of a meteorological radar complex for a near-airfield zone. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «XI Nauchnye chteniya, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo»*: sbornik dokladov. Moscow: Izdatel'skii dom «Akademiya im. N.E. Zhukovskogo» Publ., 2014. P. 455–459.
3. Denisenkov D.A., Zhukov V.Yu., Pervushin R.V., Shchukin G.G. Method of detecting wind shear using Doppler weather radar. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*. 2016. No. 3. P. 68-73. (In Russ.)
4. Zhukov V.YU., Shchukin G.G. Status and Prospects of the Doppler Weather Radar Network. *Meteorologiya i gidrologiya*. 2014. No. 2. P. 92-100. (In Russ.)
5. Isaev S.A., Detkov A.N., Bezuglov A.A. Digital-natural method for assessing the characteristics of meteorological radar systems of the near airfield zone. *Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii*. 2018. No. 3. P. 116–120. (In Russ.)
6. Detkov A.N., Sinitsyn I.A., Bezuglov A.A. Mathematical model of a radar channel for measuring the velocity vector of hazardous meteorological phenomena in the near airfield zone. *Zhurnal radioelektroniki*. 2017. No. 9. P. 35–38. (In Russ.). URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep17/12/text.pdf>
7. Bryzgalov A.P., Koval'chuk I.V., Khnykin A.V., Shevela I.A., Yusupov R.G. Simulation of Synthetic Aperture Radar Assigned to Solving the Problems of Its Internal and External Design. *Trudy MAI*. 2011. No. 43. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24734>

8. Gorbunova A.A. Design of the Complex Radar Image Processing Algorithm for Target Identification. *Trudy MAI*. 2011. No. 45. (In Russ.). URL: http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=25366&PAGEN_2=2
9. Bulygin M.L., Mullov K.D. Analysis of control algorithms of adaptive network data transmission by local parameters. *Trudy MAI*. 2015. No. 80. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=57040>
10. Gavrilov K.Yu., Kamenskii K.V., Malyutina O.A. Trajectory signal modelling in the aperture synthesis radar based on optical images of the Earth surface. *Trudy MAI*. 2021. No. 118. (In Russ.). URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=158252>. DOI: [10.34759/trd-2021-118-1](https://doi.org/10.34759/trd-2021-118-1)
11. Mel'nikov V.M. Information processing in Doppler MRL. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1993. No. 4. P. 35–43. (In Russ.)
12. Doviak R., Zrnich D. *Doplerovskie radiolokatory i meteorologicheskie nablyudeniya* (Doppler radars and meteorological observations). Leningrad: Gidrometeoizdat Publ., 1988. 511 p.
13. Ryzhkov A.V. Information content of polarization measurements in radar meteorology problems. Theoretical model. *Radioelektronika i svyaz'*. 1991. No. 2. P. 17-23. (In Russ.)
14. Ryzhkov A.V. Polarization methods in meteorological radar. *Zarubezhnaya radioelektronika*. 1993. No. 4. P. 18-28. In Russ.)
15. Williams C.R., Beauchamp R.M., Chandrasekar V. Vertical Air Motions and Raindrop Size Distributions Estimated Using Mean Doppler Velocity Difference From 3-

and 35-GHz Vertically Pointing Radars. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2016. V. 54, No. 10. P. 6048-6060. DOI: [10.1109/TGRS.2016.2580526](https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2580526)

16. Doviak R.J., Zrnić D.S. *Doppler Radar and Weather Observations*, 2nd ed. San Diego: Academic Press, 1993. 562 p.

17. Gusev S.N., Sakhno I.V., Khubbiev R.V. Evaluation technique for virtual objects on radar images formation quality. *Trudy MAI*. 2019. No. 104. (In Russ.). URL: <http://trudymai.ru/eng/published.php?ID=102169>

18. Shulenin V.P. *Dopolnitel'nye glavy matematicheskoi statistiki* (Additional chapters of mathematical statistics). Tomsk: Izd-vo NTL Publ., 2018. 515 p.

19. Mitsel' A.A. *Prikladnaya matematicheskaya statistika* (Applied mathematical statistics). Tomsk: Tomskii gosudarstvennyi universitet sistem upravleniya i radioelektroniki Publ., 2019. 113 p.

20. Myuller P., Noiman P., Shtorm R. *Tablitsy po matematicheskoi statistike* (Tables on mathematical statistics). Moscow: Finansy i statistika Publ., 1982. 278 p.

21. *List of Statistics Toolbox function*. URL: <http://matlab.exponenta.ru/statist>

Статья поступила в редакцию 14.02.2025

Одобрена после рецензирования 28.02.2025

Принята к публикации 25.08.2025

The article was submitted on 14.02.2025; approved after reviewing on 28.02.2025; accepted for publication on 25.08.2025