Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

STANDARDIZATION AND QUALITY

UDC 004.94:519.6

Egorchev A.A. Criteria for quality control of synthetic and real measurement information

Критерии контроля качества синтетической и реальной измерительной информации

Egorchev Anton Alexandrovich,
Candidate of Technical Sciences, Director of the Institute, Leading Researcher, Kazan (Volga Region) Federal University, Institute of Computational Mathematics and Information Technology, Kazan, Russia
Егорчев Антон Александрович,
кандидат технических наук, директор Института, ведущий научный сотрудник, Казанский (Приволжский) федеральный университет, Институт вычислительной математики и информационных технологий, г. Казань, Россия

Abstract. *The paper considers criteria for quality control of synthetic and real measurement information used in the development and testing of intelligent information systems. Within the framework of the developed methodology, special attention is paid to the integrated assessment of the suitability of measurement data and the software and algorithmic pipeline. The assessment includes estimation accuracy, resistance to noise and artifacts, transferability between devices and registration conditions, reproducibility of results, and compliance with processing time constraints. The necessity of aligning synthetic and real measurements both in the feature space and according to domain-specific metrics reflecting measurement-relevant properties of particular modalities is considered. The main quality indicators for infrared photoplethysmography, acoustic-vibration and inertial measurements, ultrasound imaging, microscopy, and synthetic measurement information are identified. Rules for admitting data to testing and training, as well as principles for correcting generation scenarios when mismatches are detected, are formulated. It is shown that quality control should not be based on a single indicator but should be implemented as a set of interrelated criteria and constraints covering the entire measurement and information pipeline of an intelligent information system.*

Keywords: *measurement information, synthetic data, quality control, suitability criterion, measurement alignment, domain-specific metrics, intelligent information system.*

Аннотация. *В статье рассматриваются критерии контроля качества синтетической и реальной измерительной информации, используемой при разработке и испытаниях интеллектуальных информационных систем. В рамках разработанной методологии основное внимание уделяется интегральной оценке пригодности измерительных данных и программно-алгоритмического тракта, включающей точность оценивания, устойчивость к шумам и артефактам, переносимость между устройствами и условиями регистрации, воспроизводимость результатов и соответствие ограничениям по времени обработки. Рассматривается необходимость согласования синтетических и реальных измерений как в признаковом пространстве, так и по доменным метрикам, отражающим измерительно значимые свойства конкретных модальностей. Определяются основные показатели качества для каналов инфракрасной фотоплетизмографии, акустико-вибрационных и инерциальных измерений, ультразвуковой визуализации, микроскопии и синтетической измерительной информации. Формулируются правила допуска данных к использованию в испытаниях и обучения, а также принципы корректировки сценариев генерации при выявлении рассогласования. Показано, что контроль качества должен осуществляться не по одному показателю, а как совокупность взаимосвязанных критериев и ограничений, распространяющихся на весь измерительно-информационный тракт интеллектуальной информационной системы.*

Ключевые слова: *измерительная информация, синтетические данные, контроль качества, критерий пригодности, согласование измерений, доменные метрики, интеллектуальная информационная система.*

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Рецензент: Торопцев Василий Владимирович - кандидат технических наук, доцент.
ФГБОУ ВО «РГАУ-МСХА им. К.А. Тимирязева»

Введение и постановка задачи

Современные интеллектуальные информационные системы функционируют на основе измерительной информации, поступающей от различных устройств и каналов регистрации. К такой информации относятся изображения, видеопоследовательности, аудиосигналы, временные ряды инерциальных измерений, данные инфракрасной фотоплетизмографии, ультразвуковой визуализации и микроскопии. В зависимости от решаемой задачи измерительная информация используется для оценивания параметров, классификации объектов и событий, обнаружения нарушений, сегментации изображений или контроля состояния исследуемой системы.

Качество исходных данных непосредственно влияет на результат работы программно-алгоритмического тракта интеллектуальной информационной системы [1-3]. При этом качество измерений определяется не только характеристиками первичного устройства. Существенное влияние оказывают условия регистрации, положение объекта, особенности конкретного прибора, режимы настройки, шумы, артефакты, пропуски, изменение ориентации устройства и различия между доменами регистрации.

В разработанной методологии предусмотрено использование синтетической измерительной информации наряду с реальными измерениями. Синтетические данные позволяют формировать воспроизводимые испытательные серии, управляемо изменять уровни шумов и артефактов, моделировать различия между устройствами и условиями регистрации, а также проверять устойчивость программно-алгоритмических решений в заданном диапазоне воздействий. Однако синтетическая информация может быть допущена к обучению и испытаниям только после проверки её согласованности с реальными измерениями.

Само по себе визуальное сходство синтетических данных с реальными измерениями не является достаточным основанием для признания их пригодными. Синтетические данные должны сохранять измерительно значимые свойства соответствующей модальности, воспроизводить особенности домена устройства и изменяться под воздействием заданных стресс-факторов в ожидаемом направлении. При этом необходимо отличать целенаправленное ухудшение характеристик в рамках испытательного сценария от нежелательного рассогласования, при котором синтетические данные выходят за область допустимых реальных распределений.

Дополнительная сложность связана с многокритериальным характером оценки качества. Высокая точность алгоритма на одной выборке не гарантирует его устойчивости к шумам и артефактам, переносимости на другое устройство или

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

воспроизводимости результатов при повторной регистрации. Аналогично, соответствие данных формальным требованиям не означает автоматического выполнения ограничений по времени обработки, вычислительным ресурсам и качеству конечного решения.

Поэтому в рамках настоящей работы контроль качества рассматривается применительно ко всему измерительно-информационному тракту интеллектуальной информационной системы — от формирования и отбора измерительной информации до получения итогового результата обработки. Основное внимание уделяется критериям пригодности данных, правилам согласования синтетических и реальных измерений, а также условиям допуска измерительной информации к дальнейшему использованию [2,3,5].

Для количественной оценки качества разработанных программно-алгоритмических трактов в работе введён интегральный критерий пригодности. Он объединяет точность оценивания параметров, устойчивость к деградации измерительной информации, переносимость между устройствами и условиями регистрации, воспроизводимость результатов и выполнение ограничений по времени обработки. При этом для отдельных измерительных каналов могут использоваться различные частные показатели, соответствующие специфике конкретной модальности.

В общем случае требования к качеству задаются не одним показателем точности, а системой взаимосвязанных ограничений. К ним относятся требуемые значения целевых показателей качества при различных уровнях деградации, допустимое время обработки, предельное расстояние между распределениями синтетических и реальных данных, а также допустимое падение качества при переходе на другое устройство, пресет или условия измерения.

Целью статьи является изложение критериев контроля качества синтетической и реальной измерительной информации, а также условий, при которых данные могут быть признаны пригодными для обучения, испытаний и эксплуатации интеллектуальных информационных систем.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

– определить состав основных характеристик, учитываемых при оценке пригодности измерительной информации;

– рассмотреть интегральный критерий оценки качества программно-алгоритмического тракта;

– определить частные показатели качества для различных измерительных каналов и модальностей;

– описать способы согласования синтетических и реальных измерений;

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

– сформулировать правила корректировки сценариев при выявлении рассогласования;

– определить роль обратных связей в контроле качества измерительной информации и настройке алгоритмического тракта.

1. Формирование и предварительный контроль синтетической измерительной информации

В разработанной методологии имитационное моделирование используется для построения воспроизводимой среды испытаний программно-алгоритмического тракта ИИС. Синтетическая измерительная информация рассматривается не как произвольное дополнение к реальным данным, а как управляемое воздействие, параметры которого задаются сценарием и проверяются перед включением в испытательную серию [4,5].

Спецификация измерительной ситуации включает модальность, доменный профиль устройства или режима регистрации, целевой тип измерения, параметры качества, стресс-факторы и форматные ограничения. Для различных модальностей фиксируются разрешение, битность, частота кадров, длительность, частота дискретизации, состав каналов и другие параметры, необходимые для последующей обработки. Обязательным параметром является Seed, обеспечивающий воспроизводимость генерации и трассируемость результатов валидации.

Контроль синтетических данных включает проверку соответствия заданной спецификации, формата, доменного профиля и установленных ограничений. Оцениваются не только наличие заданного артефакта или стресс-фактора, но также его интенсивность, локализация и влияние на измерительно значимые характеристики. Некорректные выпуски отклоняются, а параметры сценария уточняются.

Согласование синтетических и реальных измерений выполняется в признаковом пространстве и по доменным метрикам [2-4]. Для оценки близости распределений используются MMD, EMD, расстояние Вассерштейна и модифицированные расстояния Фреше. Дополнительно контролируются характеристики, специфичные для конкретной модальности: отношения (AC/DC) и спектральные показатели для ИК-ФПГ, спектральная плотность мощности и межосевые зависимости для IMU, характеристики артефактов и спекл-структуры для ультразвука, а также морфометрические и топологические параметры для микроскопии.

Базовая подсерия каждого домена должна воспроизводить статистику реальных измерений и выступать «якорем домена». После этого вводятся стресс-факторы, а их влияние сопоставляется с ожидаемым изменением показателей. При превышении допустимых порогов корректируются диапазоны факторов, локализация артефактов, параметры профиля устройства или правила их композиции. Затем выпуск повторяется

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

при фиксированном протоколе воспроизводимости, а результаты валидации журналируются.

Таким образом, предварительный контроль синтетической информации обеспечивает проверку её формата, воспроизводимости, соответствия доменному профилю и согласованности с реальными измерениями. Только после прохождения этой проверки данные могут использоваться для последующей оценки пригодности программно-алгоритмического тракта.

2. Критерий пригодности измерительной информации и контроль согласованности данных

Для количественной оценки качества программно-алгоритмических трактов ИИС в работе введён интегральный критерий пригодности, учитывающий точность оценивания, устойчивость к шумам и артефактам, переносимость между устройствами и условиями регистрации, воспроизводимость результатов и соответствие ограничениям по времени обработки.

$$K_{\text{ИИС}} = \sum_{m=1}^{M} \omega_m \left(\lambda_1 \widehat{Q_m} + \lambda_2 \widehat{R_m} + \lambda_3 \widehat{P_m} + \lambda_4 \widehat{B_m} + \lambda_5 \widehat{T_m}\right), \text{(1.1)}$$

В формуле (1.1) m обозначает измерительный канал или модальность; $\hat{Q}_m$ — нормированную целевую точность оценивания, классификации или сегментации; $\hat{R}_m$ — устойчивость к шумам, артефактам и другим деградирующим воздействиям; $\hat{P}_m$ — переносимость между устройствами, пресетами и условиями регистрации; $\hat{B}_m$ — воспроизводимость результатов при повторных измерениях и вычислительных запусках; $\hat{T}_m$ — выполнение ограничений по времени обработки и вычислительным ресурсам. Коэффициенты ω_m и λ_i задают значимость измерительных каналов и отдельных характеристик качества в целевом сценарии применения ИИС.

В такой постановке разработка методов рассматривается как задача многокритериальной оптимизации программно-алгоритмического тракта ИИС.

$$(A^*, \alpha^*, S^*) = \arg\max_{A,\alpha,S} K_{\text{ИИС}}(A, \alpha, S), \text{(1.2)}$$

В формуле (1.2) учитываются структура программно-алгоритмического тракта, его настраиваемые параметры и конфигурация формирования и использования синтетической измерительной информации. Структура тракта включает состав методов обработки и контроля качества, последовательность их применения и связи между ними. Параметры α охватывают настройки фильтрации, пороги принятия решений, параметры сегментации и других процедур. Конфигурация синтетических данных определяется сценариями генерации, диапазонами деградирующих факторов, профилями устройств и составом синтетических выборок.

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

Требования к качеству задаются системой ограничений, а не одним показателем точности [2,3,5].

$$Q_m(\theta) \geq Q_m^{min}, \qquad T_m \leq T_m^{max}, \qquad D_m^{\text{syn-real}} \leq \varepsilon_m, \qquad \Delta Q_m^{\text{domain}} \leq \delta_m, \quad (1.3)$$

В формуле (1.3) $Q_m(\theta)$ — значение целевого показателя качества при векторе деградации θ; T_m — время обработки; $D_m^{syn-real}$ — расстояние между распределениями синтетических и реальных данных; ΔQ_m^{domain} — падение качества при переносе на другое устройство, пресет или условия измерения.

Для инфракрасной фотоплетизмографии используются MAE оценок частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, насыщения крови кислородом и артериального давления, а также расстояние DTW между оцениваемыми и эталонными временными рядами. Для акустико-вибрационных и инерциальных каналов применяются F1-мера, Recall, Precision, ROC-AUC, доля ложных срабатываний, задержка обнаружения событий и показатели устойчивости к изменению ориентации устройства и шумам.

Для ультразвуковой визуализации используются MSE, PSNR, SSIM, UQI, ERGAS, Dice, IoU, а также точность локализации артефактов и контуров. Для микроскопии контролируются Dice, IoU, ошибка локализации границ, воспроизводимость морфометрических параметров и согласие с экспертной разметкой. Для синтетической информации оцениваются MMD, EMD, расстояние Вассерштейна, модифицированные расстояния Фреше и другие статистические показатели, учитывающие специфику канала и условий регистрации [4].

Согласование «синтетика — реальные измерения» является обязательным условием допуска синтетики к обучению и испытаниям. Оно выполняется в признаковом пространстве и по доменным метрикам. Для оценки близости распределений используются MMD, модифицированные Fréchet-подобные дистанции и EMD/Wasserstein. Дополнительно контролируются измерительно значимые характеристики: отношения AC/DC и спектральные показатели для ИК-ФПГ, PSD-характеристики и межосевые зависимости для IMU, параметры артефактов и спекл-структуры для ультразвука, а также морфометрические и топологические свойства для микроскопии.

Базовая подсерия каждого домена должна выступать «якорем домена» и воспроизводить статистику реальных измерений. Стресс-подсерии должны изменять показатели в ожидаемом направлении, сохраняя доменную правдоподобность. Поэтому необходимо различать стресс-фактор как контролируемое ухудшение в допустимом

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

диапазоне и нежелательное рассогласование как выход синтетики за область реальных доменных распределений.

При превышении допустимых порогов корректируются диапазоны факторов, локализация артефактов, параметры профиля устройства и правила композиции воздействий. После этого выпуск повторяется при фиксированном протоколе воспроизводимости, а результаты валидации журналируются [3,5].

В разработанных ИИС реализованы три уровня обратной связи: корректировка сценариев формирования синтетических данных, контроль качества отдельных измерительных фрагментов и настройка параметров алгоритмического тракта. В результате данные могут отбраковываться, направляться на повторную обработку или регистрацию, а параметры фильтрации, сегментации, восстановления и принятия решений — изменяться с учётом выявленных шумов, артефактов и доменного сдвига.

Приемлемым считается программно-алгоритмический тракт, который выполняет установленные требования к качеству, времени обработки, согласованности синтетических и реальных данных, переносимости и воспроизводимости результатов.

Обсуждение

Предложенный подход рассматривает качество измерительной информации как совокупность взаимосвязанных характеристик: точности, устойчивости к деградации, переносимости между устройствами, воспроизводимости и соответствия временным ограничениям. Интегральный критерий позволяет учитывать различный вклад измерительных каналов и адаптировать оценку к целевому сценарию применения ИИС. При этом высокая точность не компенсирует существенное рассогласование синтетических и реальных данных, недопустимое время обработки или значительное падение качества при смене устройства и условий регистрации.

Контроль согласованности выполняется одновременно в признаковом пространстве и по доменным метрикам конкретной модальности. Это позволяет отличать допустимый стресс-фактор от нежелательного рассогласования. Трёхуровневые обратные связи обеспечивают корректировку сценариев генерации, отбраковку непригодных измерительных фрагментов и настройку алгоритмического тракта, благодаря чему контроль качества становится частью воспроизводимого измерительно-информационного процесса.

Выводы

В статье рассмотрены критерии контроля качества синтетической и реальной измерительной информации в составе программно-алгоритмического тракта ИИС. Показано, что пригодность данных определяется совокупностью точности, устойчивости, переносимости, воспроизводимости и вычислительной эффективности,

Professional science applies the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0) license to the materials published-
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru|

а интегральный критерий должен применяться совместно с ограничениями по согласованности данных, времени обработки и сохранению качества при изменении домена.

Предложенный подход позволяет допускать к обучению и испытаниям только те измерительные данные и программно-алгоритмические тракты, которые соответствуют установленным требованиям. При выявлении рассогласования выполняется корректировка сценариев и повторная валидация, что обеспечивает воспроизводимость оценки и повышает надёжность применения ИИС в различных условиях регистрации.

References

1. ГОСТ 34100.3–2017 (ISO/IEC Guide 98–3:2008). Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения. М.: Стандартинформ, 2018.

2. ISO/IEC 5259-1:2024. Data quality for analytics and machine learning (ML). Part 1: Overview, terminology, and examples. Geneva: International Organization for Standardization, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/81088.html

3. ISO/IEC 5259-2:2024. Data quality for analytics and machine learning (ML). Part 2: Data quality measures. Geneva: International Organization for Standardization, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/81860.html

4. Nikolenko S.I. Synthetic Data for Deep Learning. Cham: Springer, 2021. DOI: 10.1007/978-3-030-75178-4. URL: https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-75178-4

5. National Institute of Standards and Technology. Artificial Intelligence Risk Management Framework: Generative Artificial Intelligence Profile. NIST AI 600-1. Gaithersburg: NIST, 2024. DOI: 10.6028/NIST.AI.600-1. URL: https://doi.org/10.6028/NIST.AI.600-1