УДК 629.7.018.7

Повышение качества проведения анализа и оценки характеристик связи линии управления и контроля беспилотного летательного аппарата по результатам летных испытаний

Растегаев И. Г.

Постановка задачи: неснижаемый интерес к беспилотным летательным аппаратам (БпЛА) со стороны различных государственных структур, расширение области применения и высокая эффективность применения комплексов с БпЛА обуславливают постоянное совершенствование требований к ним и увеличение работ по созданию перспективных комплексов с БпЛА. Существующие методическое и программное обеспечения летных испытаний линий управления и контроля (ЛУК) БпЛА не обеспечивает объективность оценки соответствия задаваемым требованиям при одновременном сокрашении сроков испытаний и возрастании количества выполняемых опытноконструкторских работ. Целью работы является повышение качества проведения анализа и оценки характеристик связи ЛУК БпЛА по результатам летных испытаний за счет вновь разработанных информационных моделей процессов обработки полетных данных, анализа и оценки характеристик связи ЛУК БnЛA, обеспечивающих внедрение OLAP (On-line Analytical Processing) технологий в систему обработки и анализа результатов летных испытаний. Предлагается учесть в моделях особенности современных и перспективных линий управления и контроля БпЛА, повысить оперативность и информативность анализа результатов летных экспериментов за счет разработанной модели хранения обработанных полетных данных, математического и алгоритмического аппаратов оперативного анализа и форм представления результатов. Используемые методы: при решении задач оценки характеристик связи линий управления и контроля Бп.ЛА используется метод экспертной оценки выполняемой внешними пилотами БпЛА. Задачи повышения оперативности и информативности анализа результатов летных экспериментов решаются методами, основанными на использовании отдельных элементов теории планирования эксперимента, математической статистики, системного анализа и теории баз данных. Новизна: элементами новизны являются: 1) Новые алгоритмы послеполетной обработки и анализа полетной информации, в которых учитывается показатель непрерывности связи, а также обеспечивается оперативный подбор критериев оценки характеристик связи без повторной обработки первичной полетной информации; 2) Использование в процессе оценки характеристик связи ЛУК БпЛА экспертных оценок для уточнения критериев оценки готовности и непрерывности связи; 3) Включение в процесс анализа описательных и непараметрических статистик для выявления влияющих факторов; 4) Модель данных, реализующая предметную ориентированность полетных данных, разработанная для упрощения создания аналитических запросов. Результат: использование предлагаемых информационных моделей повышает технические характеристики технологических процессов обработки и анализа результатов летного эксперимента и позволяет снизить объем трудозатрат в 4,8 раза по сравнению с использованием существующего программного обеспечения технологической линии обработки испытательной информации. Практическая значимость: представленное решение предлагается реализовать в виде специального программного обеспечения. Включение реализованного программного обеспечения на основе предложенных решений в линию технологической обработки и анализа результатов испытаний позволит повысить оперативность и достоверность выполняемой оценки характеристик связи ЛУК

Библиографическая ссылка на статью:

Растегаев И. Г. Повышение качества проведения анализа и оценки характеристик связи линии управления и контроля беспилотного летательного аппарата по результатам летных испытаний // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 4. С. 103-136. DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

Reference for citation:

Rastegaev I. G. Improving the Quality of Analysis and Evaluation of the Communication Performance of the Command and Control Data Link of an Unmanned Aerial Vehicle Based on the Results of Flight Tests. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 4, pp. 103-136 (in Russian). DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

ISSN 2410-9916

БпЛА в условиях сокращения сроков испытаний и возрастания количества выполняемых опытноконструкторских работ.

Ключевые слова: характеристики связи, оценка соответствия, технологическая линия обработки и анализа результатов летных испытаний, линия управления и контроля БпЛА.

Введение

Неснижаемый интерес к беспилотным летательным аппаратам (БпЛА) со стороны различных государственных структур, расширение области применения и высокая эффективность применения комплексов с БпЛА обуславливают постоянное совершенствование требований к ним и увеличение работ по созданию перспективных комплексов с БпЛА. Дальнейшее развитие беспилотной авиации предполагает совместное применение групп разнотипных БпЛА, смешанных авиационных групп, состоящих из пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов, а также интеграцию БпЛА в несегрегированное воздушное пространство при соблюдении установленных требований к безопасности полетов. Одной из важнейших систем, обеспечивающих реализацию безопасной и эффективной интеграции БпЛА в воздушное пространство и совместного применения с пилотируемыми летательными аппаратами, является линия управления и контроля (ЛУК) БпЛА. В соответствии с [1] ЛУК БпЛА является линией передачи данных между дистанционно пилотируемым воздушным судном и станцией внешнего пилота в целях управления полетом. Линия управления и контроля БпЛА обеспечивает взаимодействие внешнего пилота с БпЛА для решения задач контроля и управления полетом БпЛА и режимами работы его бортовых систем, а также для решения задач пилотирования БпЛА. «Отдаленный» статус внешнего пилота накладывает на ЛУК высокие требования, а предназначение ЛУК определяет отличительные особенности от других систем связи. Совершенствование предъявляемых требований к эксплуатационным характеристикам ЛУК БпЛА и увеличение работ по созданию перспективных комплексов с БпЛА обуславливают необходимость разработки соответствующего методического и программного обеспечений испытаний, которые позволяют сохранить качество выполняемых оценок с сокращением определённых ресурсов выделяемых на проведение испытаний.

Вопросы, связанные с ЛУК БпЛА, рассматривались в работах многих авторов. В работах В.И. Меркулова, А.И. Канащенкова, В.С. Вербы, В.С. Моисеева, В. Слюсара, Н.М. Боева [2-10] исследовались принципы построения и особенности функционирования авиационных систем радиоуправления [2-4], теоретические и прикладные проблемы разработки систем управления БпЛА [5, 6], проведен анализ требований, предъявляемых к радиолиниям связи с БпЛА [7-10]. В работах С.И. Макаренко, М.С. Иванова рассмотрены вопросы помехоустойчивости командных радиолиний управления БпЛА [11-12]. Вместе с тем вопросы летных испытаний линии управления и контроля БпЛА в этих работах не исследовались.

Статьи R. Jain, F. Templin [13], D.G. Depoorter, O. Lücke [14] затрагивают проблемные вопросы оценки характеристик связи ЛУК БпЛА. В работах рассмотрена проблема применения требований к показателю готовности ЛУК

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

БпЛА и предложения по введению альтернативного показателя – непрерывности связи. Вопросы летных испытаний системы передачи данных БпЛА рассмотрены A. Jara-Olmedo, W. Medina-Pazmiño, E.E. Galarza, F.M. Silva, E.D. Galarza, C.A. Naranjo [15], R.E. Mcshea [16]. В работах представлен объем летных испытаний, необходимый для проверки выполнения требований к летной годности системы связи. Рассмотрены вопросы оценки электромагнитной совместимости, контроля состояния каналов связи внешними пилотами, допустимых значений задержек передачи данных, обеспечения выполнения заданной программы полета при потере связи с БпЛА, отсутствия в конструкции затенений антенных систем, приводящих к потере связи, обеспечения безопасности при передаче управления с одной станции управления на другую. Следует отметить, что в этих работах не раскрыты вопросы, связанные с обработкой, анализом и оценкой результатов летных испытаний ЛУК БпЛА.

Процессы обработки и анализа полетных данных являются наиболее объемной частью летных испытаний, а от качества выполнения этих процессов зависит решение о степени соответствия объекта испытаний заданным характеристикам. Выполнение оценки характеристик образца возможно только после значительной обработки измерительной информации, регистрируемой в процессе полета. Кроме обеспечения выполнения множества операций, таких как фильтрация погрешностей и выбросов, синхронизация источников данных, расчет вычисляемых параметров и др., в задачи обработки и анализа входят представление результатов в удобном для инженера-испытателя виде, совмещение результатов разных полетов, оперативность получения результатов оценки, сортировка и объединение данных по различным признакам. Поэтому постоянные требования по существенному сокращению сроков испытаний, одновременное увеличение объема получаемых полетных данных в результате усложнения систем объектов испытаний и возрастания интенсивности проводимых испытаний приводят к повышению трудоемкости и продолжительности этих процессов, и, как следствие, к снижению качества и достоверности выполняемых оценок. Это обуславливает постоянную актуальность повышения качества и степени автоматизации процессов анализа и оценки результатов летных испытаний ЛУК БпЛА.

Вопросами автоматизированной обработки результатов летных испытаний занимались М.И. Хейфиц, Ю.Е. Махонькин, З.А. Павлова, А.И. Фальков, В.И. Корачков [17, 18]. В работах [17, 18] рассмотрены общие принципы построения систем обработки, описания их функционирования, организации и обработки экспериментальных данных. Вместе с тем процессы обработки и анализа полетных данных тесно связаны с оцениваемой системой и требует индивидуального подхода в каждом конкретном случае. Объем и удобство форм представления результатов, алгоритмы оперативного и полного анализа, формы отчетности зависят от особенностей функционирования и предназначения образца, состава его оцениваемых характеристик, характера выявляемых неисправностей. Поэтому вопросы, связанные непосредственно с проведением анализа результатов летных испытаний ЛУК БпЛА, в этих работах не рассматривались. Другие работы по исследованию этих вопросов автору неизвестны.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

В настоящее время выделяют три концепции построения аналитических систем [19]:

- On-line Transaction Processing (OLTP). Предназначена для построения информационно-поисковых систем. Сфера детализированных данных;
- On-line Analytical Processing (OLAP). Обеспечивает выполнение задач обобщения, группировки и агрегации данных с целью оперативной аналитической обработки. Сфера агрегированных показателей;
- Data Mining. Обеспечивает выполнение задач поиска закономерностей в данных и прогноза развития исследуемого процесса. Интеллектуальный анализ данных.

При создании аналитических систем могут использоваться как отдельные концепции, так и их сочетания при построении многоуровневых систем анализа. Системы ОLTР эффективно применяются для учета и хранения первичной информации, тогда как системы OLAP и Data Mining работают с обработанными данными ориентированными на определенную предметную область. При этом следует отметить, что наиболее эффективно задачи анализа решают технологии OLAP и Data Mining.

Программное обеспечение (ПО), используемое для анализа результатов летных испытаний ЛУК БпЛА в технологической линии обработки испытательной информации, обладает признаками OLTP систем. В виду обеспечения универсальности при работе с полетными данными, без направленности на какую-либо специализацию системы, применяемое ПО не ориентировано на выполнение задач OLAP систем, несмотря на широкие функциональные возможности. Предлагается для повышения качества проведения анализа и оценки результатов испытаний ЛУК БпЛА разработать программный комплекс, построенный на принципах OLAP технологий.

Представленная работа является продолжением исследований автора вопросов совершенствования методического и программного обеспечения испытаний ЛУК БпЛА [20-22]. В частности, в работах [20-22] предложены уточненные определения технических характеристик связи ЛУК БпЛА, расчетные соотношения и критерии оценки характеристик связи [20], а также методический аппарат оценки влияния факторов на ЛУК БпЛА с использованием экспертного метода и методов статистического анализа [21-22]. В [23] исследованы вопросы планирования летных испытаний ЛУК БпЛА. Применение предложенного в этих работах методического аппарата летных испытаний ЛУК БпЛА невозможно без разработки соответствующих моделей процессов обработки, анализа и оценки результатов испытаний, что также обуславливает актуальность проводимого исследования.

Целью представленной работы является повышение качества проведения анализа и оценки характеристик связи ЛУК БпЛА по результатам летных испытаний за счет вновь разработанных информационных моделей процессов обработки полетных данных, анализа и оценки характеристик связи ЛУК БпЛА, учитывающих вновь разработанный методический аппарат планирования и проведения летной оценки ЛУК БпЛА и обеспечивающих внедрение OLAP технологий в систему обработки и анализа результатов летных испытаний.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

ISSN 2410-9916

Постановка задачи

Для формальной постановки и решения задачи в работе введены обозначения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Обозначения

Обозначение	Физический смысл обозначения
K_{Γ}	 коэффициент готовности канала связи
C(t)	– функция непрерывности связи
$\left\{c_i\right\}_{i=1}^N = C(iT_0)$	— дискретная функция непрерывности связи или массив значений функции непрерывности связи для дискретных моментов времени iT_0
T_0	 интервал времени оценки коэффициента ошибок или качества связи
$T_{ m o 6 m}$	количество наблюдаемых интервалов времени
К _{о.п.}	– значение порогового уровня коэффициента ошибок;
T	 интервал времени, в течение которого допускается снижение качества связи ниже требуемого уровня
$\{x_i\}_{i=1}^{T_{\text{общ}}}$	— дискретная функция состояния канала связи или массив значений функции состояния канала связи для дискретных моментов времени iT_0
$\{k_i\}_{i=1}^{T_{\text{общ}}}$	— массив значений коэффициента ошибок для дискретных моментов времени iT_0
$\{q_i\}_{i=1}^{T_{\mathrm{O}\mathrm{GHI}}}$	$-$ массив значений качества связи для дискретных моментов времени iT_0
$\delta_{ m HIIY}$	 угол направления прихода сигнала с БпЛА на НПУ в горизонтальной плоскости относительно северного направления
εнпу	– угол направления прихода сигнала с БпЛА на НПУ в вертикальной плоскости относительно горизонтальной плоскости
δ _{БпЛА}	 угол направления прихода сигнала с НПУ на БпЛА в гори- зонтальной плоскости относительно продольной оси БпЛА
ε _{БпЛА}	 угол направления прихода сигнала с НПУ на БпЛА в верти- кальной плоскости относительно горизонтальной плоскости
D	– расстояние между НПУ и БпЛА
γ	– угол крена БпЛА
θ	угол тангажа БпЛА
h	– высота полета БпЛА
$Z = \{z_1, z_2,\}$	 – множество значений режимов работы целевого оборудования
$R = \{r_1, r_2,\}$	– множество таблиц с полетными данными
$r = \{f_1, f_2,\}$	– множество строк с данными (таблица данных)
$f = \{a_1, a_2,\}$	– строка (запись) со значениями параметра

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136
URL: https://sccs.intelgr.com/archive/2022-04/05-Rastegaev.pdf

Обозначение	Физический смысл обозначения					
$A = \{A_1, A_2,\}$	– множество имен столбцов (атрибутов) или наименований					
	регистрируемых параметров					
A,B,E	– множества с именами столбцов (атрибутов) или наименова-					
	ний регистрируемых параметров					
s, p	– формируемые отношения (таблицы) в процессе синхрониза-					
	ции и ввода в базу данных					

Входными данными являются обработанные (с проведенной фильтрацией погрешностей и выбросов) полетные данные бортовых и наземных накопителей R, а также анкеты операторов управления БпЛА экспертной оценки ЛУК БпЛА [22]. Требуется разработать:

- расчетные соотношения и формы представления результатов анализа характеристик связи;
- функциональную модель процесса анализа и оценки характеристик связи;
- модель данных, реализующую предметную ориентированность полетных данных для упрощения создания аналитических запросов;
- алгоритмы обработки первичных полетных данных, обеспечивающие ввод в базу данных в соответствии с разработанной моделью.
- алгоритмический аппарат оперативного анализа.

Разрабатываемые информационные модели должны обеспечивать:

1) Выполнение расчетов характеристик связи в соответствии со следующими определениями коэффициента готовности и непрерывности связи ЛУК БпЛА.

Коэффициент готовности канала связи – вероятность того, что канал связи окажется в работоспособном состоянии в произвольный момент времени. Определяется формулой

$$K_{\Gamma} = \frac{\overline{T}_{\mathrm{H}}}{\overline{T}_{\mathrm{H}} + \overline{T}_{\mathrm{B}}},$$

где $\overline{T}_{\rm H}$ – среднее время наработки до отказа канала радиосвязи, с; $\overline{T}_{\rm B}$ – среднее время до восстановления работоспособности канала радиосвязи, с.

Непрерывность связи – функция зависимости от времени доли принятых пакетов информации, удовлетворяющих условиям целостности, от общего объема переданных пакетов в пределах указанного времени. Определяется формулой

$$C(t) = \frac{I_{[t;t+T]}}{N_{[t;t+T]}},$$

где $I_{[t;t+T]}$ — количество принятых пакетов информации, удовлетворяющих условиям целостности, за время $[t;t+T];\ N_{[t;t+T]}$ — количество переданных пакетов информации за время [t;t+T].

- 2) Выполнение оперативного анализа коэффициента готовности и непрерывности для произвольно выбранного участка полета и полета в целом.
- 3) Выполнение оперативного анализа коэффициента готовности и непрерывности при изменении критериев оценки данных показателей.

- 4) Выполнение оперативного анализа несоответствий характеристик связи заданным требованиям. Оперативный анализ должен включать следующие функции:
 - оценка влияния воздействующих факторов по результатам летных экспериментов, спланированных в соответствии с [23];
 - сортировка и объединение данных по времени, параметрам полета БпЛА, режимам работы ЛУК и целевого оборудования (ЦО);
 - совмещение результатов разных полетов.
 - 5) Визуализацию результатов расчетов и анализа в удобном виде.

Расчетные соотношения и формы представления результатов анализа характеристик связи

Для вычисления готовности и непрерывности канала связи необходимо определить критерий нарушения работоспособности канала связи и критерий перехода из неработоспособного состояния в работоспособное, т.е. критерии требуемого качества связи. Для оценки качества связи применяется метод на основе анализа статистических характеристик потока ошибок. Качество канала связи определяется коэффициентом ошибок, который равен отношению количества принятых дискретных элементов или блоков информации с ошибками к общему числу элементов или блоков (пакетов), переданных за единичный интервал времени наблюдения T_0 . Экспериментально коэффициент ошибок, k, определяется как

$$k=\frac{n}{N}$$
,

где n — число ошибочно принятых единичных элементов (блоков) за интервал времени наблюдения; N — общее число элементов (блоков) переданных за интервал времени наблюдения.

Для применения данного показателя в качестве критерия нарушения работоспособности канала связи, интервал времени наблюдения должен быть достаточно мал. Удобно принять интервал времени наблюдения равным одной секунде, $T_0 = 1$, т.е. осуществлять подсчет коэффициента ошибок каждую секунду, и, соответственно определять состояние канала также каждую секунду. Тогда, с учетом того, что в полетных данных регистрируется признак правильности принятого пакета информации, расчетные соотношения для определения K_{Γ} примут вид:

$$K_{\Gamma} = \frac{\sum_{i=1}^{T_{\text{OOIII}}} x_i}{T_{\text{OOIII}}},$$
(1)

$$x_i = \begin{cases} 1, \text{ при } k_i \leq K_{\text{O.П.}}; \\ 0, \text{ при } k_i > K_{\text{O.П.}}, \end{cases}$$
 (2)

$$k_i = \frac{n_i}{N},\tag{3}$$

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

$$n_{i} = \sum_{j=(i-1)N+1}^{iN} m_{j} \mid \forall i = \overline{1, T_{\text{OGIII}}}, m_{j} = \{0,1\}, j = \overline{1, iN},$$
(4)

где $T_{\text{общ}}$ — общее время наблюдения, с, $T_{\text{общ}} \in \mathbb{N}$; x_i — признак состояния канала связи (работоспособный или неработоспособный), $x_i = \{0,1\}$, $i = \overline{1,T_{\text{общ}}}$; k_i — коэффициент ошибок вычисленный для i-й секунды; $K_{\text{о.п.}}$ — значение порогового уровня коэффициента ошибок; n_i — количество отброшенных (непринятых или неудовлетворяющих условиям целостности) пакетов в течение i-й секунды; m_j — признак целостности принятого пакета; N — количество передаваемых пакетов в секунду.

При превышении порогового уровня $K_{\rm o.n.}$ качество связи становиться неприемлемым и канал переходит в неработоспособное состояние. С учетом того, что единичный интервал времени наблюдения T_0 принят равным одной секунде, при неработоспособном состоянии канала секунда считается пораженной ошибками и обозначается SES (Severely Error Second). В противном случае считается секундой без ошибок и обозначается EFS (Error Free Second). Значение порогового уровня $K_{\rm o.n.}$ зависит от класса БпЛА с учетом возможных эксплуатационных опасностей и их последствий, и, в соответствии с предлагаемой методикой, определяется экспертно.

Для удобства представления расчетных соотношений непрерывности связи введем параметр обратный по смыслу коэффициенту ошибок. Качество связи — доля принятых дискретных элементов или блоков информации без ошибок от общего числа элементов или блоков (пакетов), переданных за единичный интервал времени наблюдения T_0 . Т.е. качество связи определяется по формуле

$$q_i = \left(1 - k_i\right) = \left(1 - \frac{n_i}{N}\right). \tag{5}$$

Тогда непрерывность связи представим как массив значений функции непрерывности связи для дискретных моментов времени:

$$\{c_i\}_{i=1}^{T_{\text{OOIII}}} = C(iT_0) \mid c_i = \frac{\sum\limits_{i=T}^{i} q_i}{NT}, T_0 < T << T_{\text{OOIII}}, \forall i = \overline{1, T_{\text{OOIII}}} \,,$$

где T — значение интервала времени, в течение которого допускается снижение качества связи, с, $T \in \mathbf{N}$.

Критерием оценки непрерывности связи примем отсутствие снижения ниже заданного уровня, $C_{3ал}$, в течение общего времени наблюдения:

$$C_i \ge C_{33\text{Д}} \mid \forall i = \overline{1, T_{06\text{III}}}. \tag{6}$$

Значения T и $C_{\rm 3ag}$ зависят от класса БпЛА с учетом возможных эксплуатационных опасностей и их последствий и в, соответствии с предлагаемой методикой, также определяется экспертно.

Для обеспечения удобства анализа и оценки результатов оперативного расчета характеристик связи разработаны следующие формы анализа и представления результатов расчетов.

1) Сводные данные по параметрам полета и полученным значениям коэффициентов готовности для восходящего и нисходящего каналов (ВК и НК) связи и для радиолинии (РЛ) в целом в табличном виде (таблица 2). Направление передачи для ВК – от наземного пункта управления (НПУ) к БпЛА, для НК соответственно БпЛА-НПУ.

Таблица 2 – Пример табличной формы представления результатов анализа

Временной	Удаление	Высота	Высота Канал Скорость средняя, к			Коэ	ффици	ент
участок	БпЛА от	БпЛА, м (номер			ГОТ	говност	ГИ	
полета	НПУ, км		литеры)	НК	ВК	НК	ВК	РЛ
c 13:14:57	от 0,09	от 114	23	112	50,46	0,89	0,99	0,89
по 14:56:52	до 68	до 2111	23	112	50,40	0,89	0,99	0,89

- 2) Синхронизированные по времени интерактивные графики изменения параметров качества и непрерывности связи в процессе полета (рис. 1). Интерактивность выводимых графиков заключается в возможности аналитика изменения масштаба временной шкалы и перемещения вдоль временной шкалы с автоматическим расчетом коэффициентов готовности каналов связи для выбранного временного участка. На графиках также автоматически строятся линии (обозначены красным пунктиром), соответствующие выбранным значениям пороговых уровней качества связи, $1 - K_{\text{о.п.}}$, и непрерывности, $C_{3\text{ал}}$.
- 3) Сводные данные по параметрам полета с участками времени, в течение которого не обеспечивается выполнение условия (6), в табличной форме (таблица 3) для определения возможных причин ухудшения качества связи.
- 4) Графическое представление распределения параметра качества связи в виде гистограммы для наглядной оценки преобладания значений качества связи относительно порогового значения $(1-K_{0,\Pi})$. Гистограмма отображает количество попаданий полученных значений q_i в интервалы [0; 0,1), [0,1; 0,2), ...,[0,9; 1] (рис. 2). Расчет выполняется по формуле

$$n_{j} = \sum_{i=1}^{T_{\text{ofin}}} \{q_{i} \in (a_{j-1}, a_{j})\}, \tag{7}$$

где n_j — число элементов попавших в интервал $j,\ j=\overline{1,\!10}\,;\ q_i$ — значение качества связи рассчитанное для i-й секунды, $i = \overline{1, T_{\text{общ}}}$; a_j — граница интервала, $a_i \in [0;1], a_i - a_{i-1} = 0.1.$

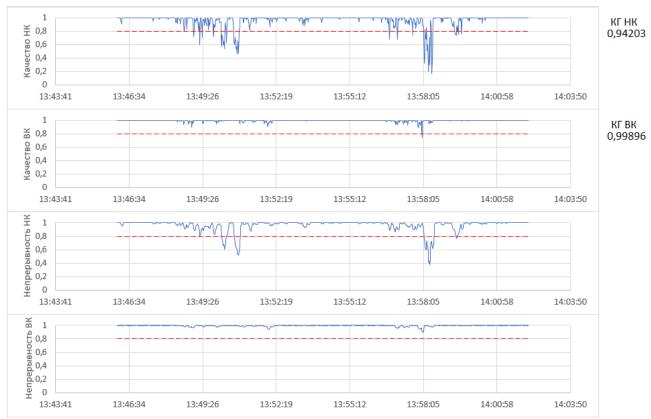


Рис. 1. Пример формы представления результатов оперативного расчета характеристик связи

Таблица 3 – Пример табличной формы представления результатов анализа непрерывности связи

Продол-	Время	Удале-	Высота	Канал	Ракурс НПУ		Ракурс БпЛА		Режим
житель-		ние	БпЛА,				c		работы ЦО
ность, с		БпЛА от	M		δ_{HIIY}	$\epsilon_{H\Pi Y}$	$\delta_{ ext{БпЛA}}$	$\epsilon_{ m БпЛA}$	
		НПУ, км							
11	c 13:50:12	от 1,5	от 1108	23	от 230°	от 40°	от 282°	от -40°	Включено
	по 13:50:22	до 1,8	до 1109		до 231°	до 33°	до 284°	до -33°	Biolio iolio
14	c 13:50:41	от 2,4	от 1109	23	от 232°	от 24°	от 285°	от -24°	Включено
	по 13:50:54	до 2,7	до 1108		до 231°	до 20°	до 247°	до 8°	Diano ieno

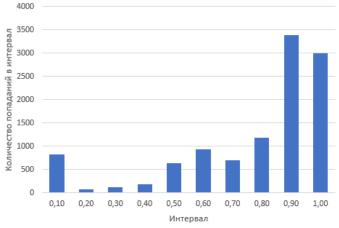


Рис. 2. Пример формы представления результатов анализа качества связи в виде гистограммы

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

5) Синхронизированные по времени интерактивные графики изменения качества связи и основных параметров полета БпЛА совмещенные с траекторией полета БпЛА, построенной в прямоугольных координатах с центром соответствующим координатам НПУ (рис. 3). При масштабировании временной шкалы отображается соответствующий выбранному промежутку времени участок траектории полета БпЛА. Привязка графиков к траектории полета по времени упрощает поиск соответствующих временных участков полета.

Для удобства восприятия анализируемой информации интерактивно обеспечивается возможность подсветки (на рисунке выделено красным цветом) значений параметров полета соответствующих тем временным участкам, где зафиксированы снижения качества связи ниже требуемого уровня. График изменения отношения сигнал/шум (С/Ш) на входе приемника дает при анализе представление о возможном наличии (появлении) помех в приемном канале путем сравнения значений С/Ш при одних и тех же параметрах полета (дальности, высоте, скорости), а также об энергетическом запасе для текущих условий полета относительно уровня С/Ш, при котором наблюдается снижение качества связи ниже требуемого уровня.

- 6) Графическое представление распределения параметра качества связи в виде гистограмм, рассчитанных в зависимости от ракурсов НПУ и БпЛА для оценки влияния затенений антенных систем и их диаграмм направленности. Расчет выполняется по формуле (7) для выборки данных с параметрами полета БпЛА, значения которых удовлетворяют соответствующей ориентации БпЛА и НПУ относительно друг друга. На рис. 4 представлен пример визуализации результатов расчета гистограмм распределения качества связи в зависимости от ракурса БпЛА. Области возможных направлений источника сигнала (направлений на НПУ) поделены на четыре части в горизонтальной (азимутальной) и четыре части в вертикальной плоскостях в соответствии с представленным рисунком.
- 7) Для оценки влияния воздействующих факторов по результатам летных экспериментов, спланированных в соответствии с [23], разработаны две формы представления результатов расчета (рис. 5):
 - описательная статистика в виде графического агрегирования данных типа круговой диаграммы;
 - непараметрическая статистика в виде текста с заключением о наличии влияния или его отсутствии.

Круговые диаграммы визуализируют процентное соотношение секунд с ошибками (SES) и секунд без ошибок (EFS), или по-другому процентное соотношение времени неработоспособности и работоспособности канала связи. Диаграммы позволяют наглядно сравнить результаты, полученные при воздействии фактора и без воздействия фактора. На рис. 5 для примера представлены диаграммы результатов расчета качества связи для выборки данных с включенным и выборки данных с выключенным целевым оборудованием.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

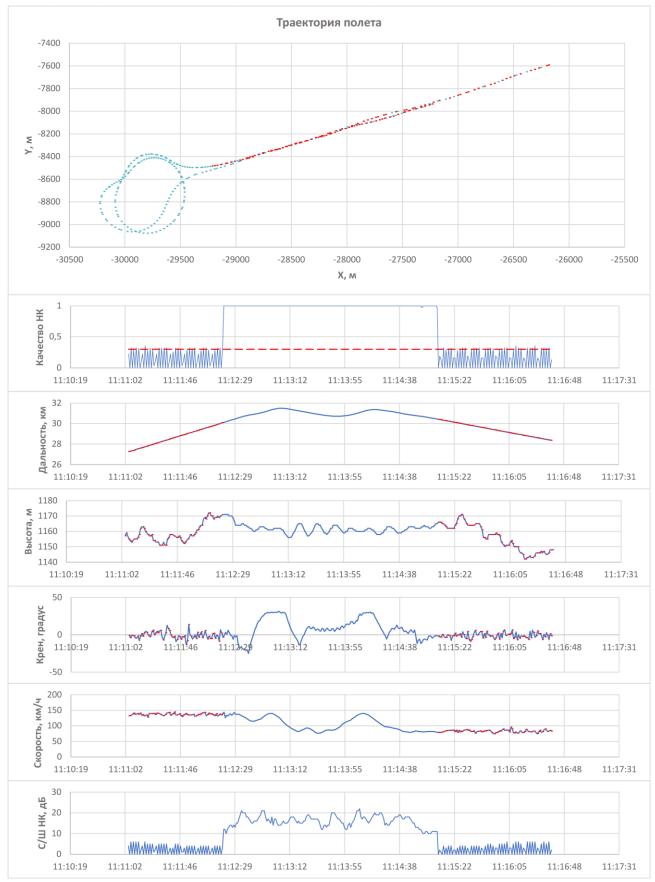


Рис. 3. Пример формы представления результатов анализа влияния параметров полета БпЛА на качество связи

114

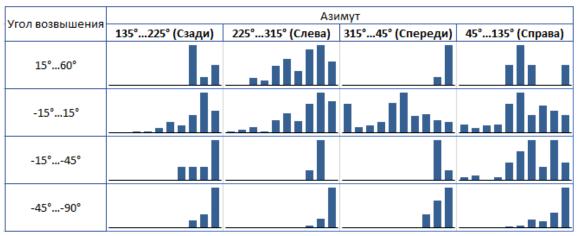
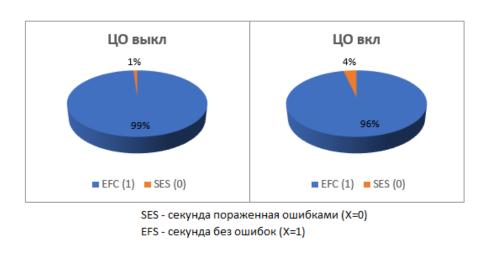


Рис. 4. Пример формы представления результатов анализа влияния ракурсов БпЛА на качество связи ЛУК БпЛА



p= 0,00013				p-value=	0,05
	χ=				
	Влияние:	Ļ	ļа		
		Выкл		Вкл	Σ строк
	EFC (1)	94	19	1146	2095
	SES (0)	:	10	43	53
	Σгрупп	95	59	1189	2148

Рис. 5. Пример формы представления результатов анализа влияния ЦО на готовность канала связи

В качестве непараметрической статистики используем критерий Пирсона χ^2 . Проверяемая гипотеза H_0 : выборки независимы, эффект воздействия отсутствует.

Критерий χ^2 применяется для определения равенства пропорций секунд SES и EFS, взятых из выборок сравниваемых групп. Сравниваются выборки полетных данных сгруппированных по наличию/отсутствию воздействия фактора или по уровням фактора. Например, для оценки влияния работы целевого оборудования на канал связи сравниваются данные по качеству связи, полученные во время работы ЦО и при выключенном ЦО. Для сравнения влияния нескольких уровней одного фактора количественные значения этого фактора ко-

дируются в номинальные (категориальные) значения. Например, для фактора ракурса БпЛА в горизонтальной плоскости вводятся четыре номинальных значения: «Спереди» для углов в диапазоне [315°;360°) и [0°;45°), «Справа» для углов [45°;135°), «Сзади» для углов [135°;225°), «Слева» для углов [225°;315°).

Критерий χ^2 определяется по формулам:

$$\chi^{2} = \sum_{i=1}^{i=2} \sum_{j=1}^{j=a} \frac{(o_{ij} - e_{ij})^{2}}{e_{ij}},$$

$$e_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{a} o_{ij}}{\sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{a} o_{ij}},$$

$$\sum_{i=1}^{2} \sum_{j=1}^{a} o_{ij}$$

где a – количество сравниваемых групп; o_{ij} – наблюдаемые частоты появления секунд EFS и SES; e_{ij} – ожидаемые частоты появления секунд EFS и SES.

Гипотеза H_0 принимается на уровне значимости α , если $\chi^2_{\mathtt{B}} < \chi^2_{1-\alpha}$, где $\chi^2_{1-\alpha}$ – квантиль распределения хи-квадрат для соответствующей степени свободы порядка.

Использование критерия χ^2 , для обеспечения правильности статистических выводов, производится при соблюдении условий:

- оценку влияния рассматриваемого фактора следует производить по выборкам с совпадающими значениями уровней других факторов;
- количество проверяемых уровней фактора не должно превышать 4-х, а количество данных в сравниваемых группах должно быть не менее 50 [24-26].

Функциональная модель процесса анализа и оценки характеристик связи

Функциональная модель процесса анализа и оценки характеристик связи ЛУК БпЛА представлена на рис. 6. Схема построена в нотации BPMN (Business Process Model and Notation). Схема описывает взаимосвязи выполняемых задач, последовательность операций для каждой задачи, отображение потока сообщений и информации между действиями.

Процесс анализа и оценки предполагает использование результатов экспертной оценки характеристик связи по определению необходимых значений $K_{\mathrm{o.п.}}$ и T . После того, как заданы значения $K_{\mathrm{o.п.}}$ и T , производится предварительный расчет характеристик связи за весь полет с выводом результатов в табличном и графическом видах, позволяющих проводить оценку соответствия заданным требованиям и поиск необходимых временных участков полета. Далее, в зависимости от получаемых результатов, инженер группы анализа может либо работать с выбранными временными участками полета, либо выполнять выявление причин несоответствий.

Системы управления, связи и безопасности Systems of Control, Communication and Security

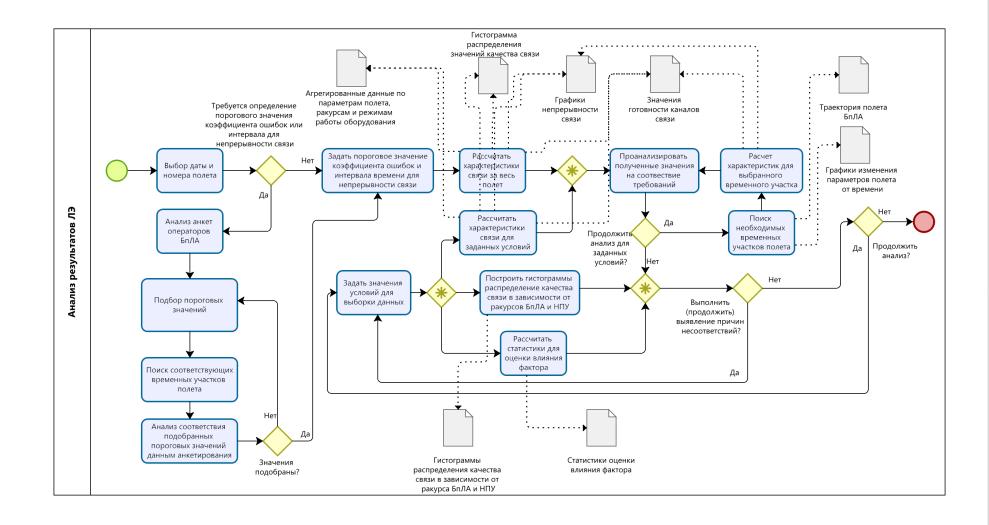


Рис. 6. Функциональная модель процесса анализа и оценки характеристик связи ЛУК БпЛА по результатам летных испытаний ЛУК БпЛА

Анализ производится в соответствии с представленными выше формами анализа и представления результатов расчета. Проведение анализа осуществляется с учетом задаваемых условий для выборки данных и расчетов в соответствии с таблицей 4.

Таблица 4 – Задаваемые условия для выборки данных и расчетов

таолица 4 — Задавасмые условия для выоорки данных и расчетов											
Задаваемые условия для выборки данных и расчетов					Форма анализа и						
				представления							
		pe	зул	ьта	TOE	з ра	сче	та			
Задаваемые значения	Логическое выражение	1	2	3	4	5	6	7			
Границы временных участков	$t_1 \le t \le t_2$	+	+	+	+	+	+	+			
$[t_1;t_2],[t_3;t_4]$	$(t_1 \le t \le t_2) \land (t_3 \le t \le t_4)$	-	-	-	-	-	-	+			
Значение $K_{\text{o.п.}}$	$_{r}$ _ \int 1, при $k_{i} \leq K_{\text{о.п.}}$;	+	+	+	+	+	+	+			
	$x_i = egin{cases} 1, \text{ при } k_i \leq K_{\text{o.п.}}; \ 0, \text{ при } k_i > K_{\text{o.п.}} \end{cases}$										
Значение Т	$\sum_{i}^{i}q_{i}$	-	+	+	-	+	-	1			
	$c_i = \frac{i - T}{NT}$										
Границы диапазона удалений БпЛА от НПУ $\left[d_1;d_2\right]$	$d_1 \le D \le d_2$	+	+	+	+	+	+	-			
Границы диапазона значений углов крена	$\gamma_1 \le \gamma \le \gamma_2$	+	+	+	+	+	-	-			
БпЛА $[\gamma_1; \gamma_2], [\gamma_3; \gamma_4]$	$(\gamma_1 \le \gamma \le \gamma_2) \land (\gamma_3 \le \gamma \le \gamma_4)$	-	-	-	-	-	-	+			
Границы диапазона значений углов тангажа БпЛА $\left[\theta_1;\theta_2\right]$	$\theta_1 \le \theta \le \theta_2$	+	+	+	+	+	-	-			
Границы диапазона значений высот полета БпЛА $[h_1;h_2],[h_3;h_4]$	$(h_1 \le h \le h_2) \land (h_3 \le h \le h_4)$	_	-	-	_	-	-	+			
Режимы целевого оборудования z_1, z_2	$z = z_1$	+	+	+	+	+	-	-			
	$(z=z_1) \land (z=z_2)$	_	-	_	-	-	-	+			

Модель данных

ER-модель данных представлена на рис. 7. Состав отношений модели предметной области представлен в таблице 5.

Модель данных находится в 4-й нормальной форме, т.к. соблюдены следующие принципы:

- в таблицах отсутствуют дублирующие строки;
- в каждой ячейке таблицы хранится одно не составное значение;
- в столбцах хранятся данные одного типа;
- отсутствуют массивы и списки;
- каждая таблица имеет ключ, а все неключевые столбцы таблицы зависят от ключа или полного ключа, в случае если он составной;
- в таблицах отсутствует транзитивная зависимость (неключевые столбцы не зависят от значений других неключевых столбцов);
- в таблицах отсутствуют нетривиальные многозначные зависимости.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

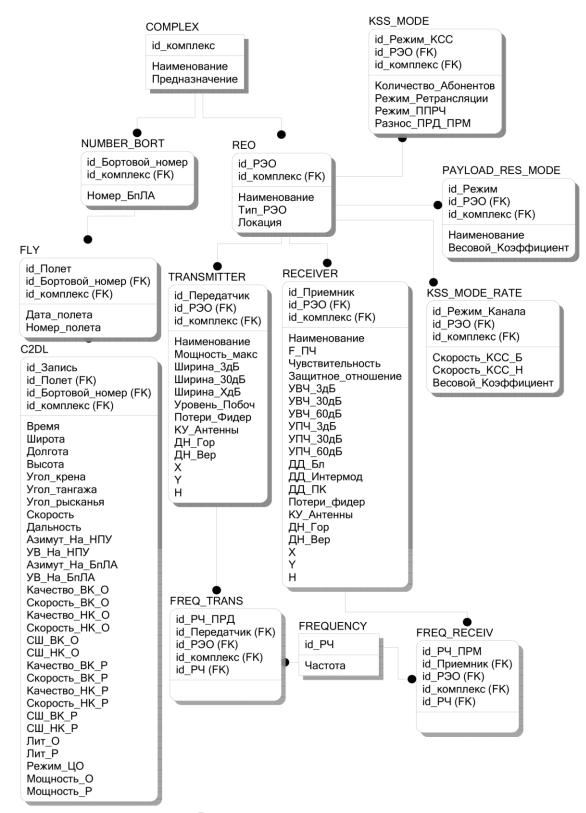


Рис. 7. ER-модель данных

Таблица 5 – Состав отношений модели предметной области

Имя отношения	Описание отношения				
COMPLEX	Наименование опытного образца комплекса с				
	БпЛА				
NUMBER_BORT	Бортовые номера летательных аппаратов				
FLY	Общие данные выполненных полетов				
C2DL	Синхронизированные бортовые и наземные дан-				
	ные для анализа производительности каналов свя-				
	зи				
REO	Радиоэлектронное оборудование комплекса				
KSS_MODE	Режимы работы КРЛ				
KSS_MODE_RATE	Режимы скорости передачи данных				
PAYLOAD_RES_MODE	Режимы работы радиоэлектронных средств ком-				
	плекса и целевого оборудования				
TRANSMITTER	Тактико-технические данные передатчиков				
RECEIVER	Тактико-технические данные приемника				
FREQ_TRANS	Рабочие частоты каналов передатчиков				
FREQ_RECEIV	Рабочие частоты каналов приемника				
FREQUNCY	Значения рабочих частот				

Разработанная модель реализуются средствами реляционных систем управления базами данных (СУБД). Выбор в пользу реляционной СУБД сделан в виду работы с большими объемами данных и необходимостью работы в процессе анализа с детализированной информацией. Преобразование данных из реляционной БД в многомерные кубы происходит по запросу, без предварительного расчёта агрегаций.

Модель включает также отношения, используемые для планирования летных экспериментов в соответствии с [23]. Дополнительно в базу данных, для построения гистограмм качества связи и проверки распределения на нормальность направленными критериями на асимметрию и кривизну [30], включены отношения таблицы 6.

Таблица 6 – Состав дополнительных отношений

	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
Имя отношения	Описание отношения
INTERVAL	Таблица содержит 10 интервалов для построения гистограмм рас-
	пределения качества связи [0; 0,1], [0,1; 0,2], [0,9; 1]
TABLE_P_E	Значения р-квантили для статистики критерия проверки на кривиз-
	ну
TABLE_P_SIMM	Значения р-квантили для статистики критерия проверки на асим-
	метрию

Алгоритмы обработки первичных полетных данных

Обработка полетных данных, обеспечивающая ввод в базу данных в соответствии с разработанной моделью, включает следующие шаги.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

1) Вычисление и добавление к данным значений факторов взаимного расположения и ориентации НПУ и БпЛА относительно друг друга (удаления БпЛА от НПУ, ракурса БпЛА и НПУ – угловых значений направления прихода радиосигнала в полярной системе координат летательного аппарата или НПУ). Расчет направления прихода сигнала на НПУ, с учетом допущения, что антенная система НПУ горизонтирована и выставлена с учетом северного направления, производится по формулам:

$$\begin{split} \delta_{\text{HIIY}} &= \arctan \left(\frac{v}{u} \right), \ \epsilon_{\text{HIIY}} = \arctan \left(\frac{w}{\sqrt{u^2 + v^2}} \right), \ D = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2} \ , \\ \begin{vmatrix} u \\ v \end{vmatrix} &= \Phi \begin{vmatrix} X_2 - X_1 \\ Y_2 - Y_1 \\ Z_2 - Z_1 \end{vmatrix}, \ \Phi = \begin{vmatrix} -\sin B_1 \cos L_1 & -\sin B_1 \sin L_1 & \cos B_1 \\ -\sin L_1 & \cos L_1 & 0 \\ \cos B_1 \cos L_1 & \cos B_1 \sin L_1 & \sin B_1 \end{vmatrix}, \\ X_{1(2)} &= (N_{1(2)} + h_{1(2)}) \cos B_{1(2)} \cos L_{1(2)}, \\ Y_{1(2)} &= (N_{1(2)} + h_{1(2)}) \cos B_{1(2)} \sin L_{1(2)}, \\ Z_{1(2)} &= (N_{1(2)} + h_{1(2)} - e^2 N) \sin B_{1(2)}, \\ N_{1(2)} &= \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_{1(2)}}}, \ f = \frac{a - b}{a}, \ e^2 = f(2 - f), \end{split}$$

где u, v, w – топоцентрические координаты; X, Y, Z – геоцентрические прямоугольные координаты точек, в которых находятся НПУ и B, L, h – геодезические координаты точек, в которых находятся НПУ и БпЛА; N — радиус кривизны первого вертикала; e — первый эксцентриситет; a, b большая и малая полуоси эллипсоида; f — сжатие эллипсоида.

Углы направления прихода сигнала на БпЛА вычисляются с использованием формул перехода от нормальной к связанной системе координат:

$$\begin{split} \delta_{\text{БпЛА}} &= \arctan\left(\frac{v'}{u'}\right), \, \epsilon_{\text{БпЛА}} = \arctan\left(\frac{w'}{\sqrt{u'^2 + v'^2}}\right), \\ \begin{vmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{vmatrix} &= M_{\gamma} M_{\theta} M_{\psi} \begin{vmatrix} u \\ v \\ w \end{vmatrix}, \, M_{\gamma} = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \gamma & \cos \gamma \\ 0 & \cos \gamma & -\sin \gamma \end{vmatrix}, \\ M_{\theta} &= \begin{vmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{vmatrix}, \, M_{\psi} = \begin{vmatrix} \cos \psi & \sin \psi & 0 \\ -\sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}, \end{split}$$

где u', v', w' – координаты вектора в связанной системе координат; γ , θ , ψ – углы крена, тангажа и рысканья БпЛА соответственно.

2) Перекодирование количественных и категориальных параметров режимов работы ЦО и оборудования КРЛ в категориальные значения, интуитивно

понятные для чтения пользователем без использования перечня регистрируемых параметров или таблиц распределения параметров.

- 3) Вычисление и добавление к данным значения качества связи для восходящих, нисходящих, основных и резервных каналов связи по формуле (5).
- 4) Синхронизация данных бортового и наземного накопителей. Схема объединения и структурирования данных с привязкой ко времени представлена на рис. 8. На схеме используются обозначения и термины теории множеств и реляционной алгебры [27-29].

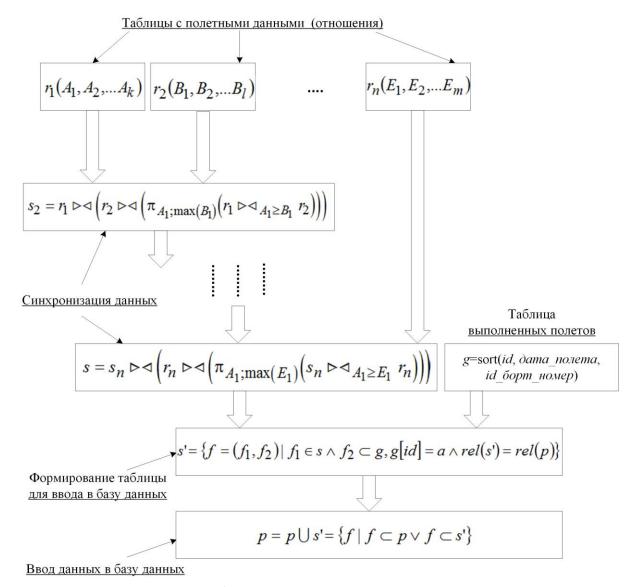


Рис. 8. Схема объединения и структурирования данных с привязкой ко времени

Объединение данных таблиц проводится последовательно присоединением таблиц, начиная со второй. Первые столбцы $A_1, B_1, \ldots E_1$ каждой таблицы содержат временные метки. Синхронизация данных таблиц осуществляется следующим образом:

$$s_1 = r_1 \triangleright \triangleleft_{A_1 \geq B_1} r_2 = \{(f_1, f_2) | f_1 \in r_1 \land f_2 \in r_2 \land f_1[A_1] \geq f_2[B_1]\},$$

ISSN 2410-9916

$$s_{1}' = \pi_{A_{1}; \max(B_{1})}(s_{1}) = \left\langle a_{A_{1}}, \max\left(\pi_{B_{1}}\left(\sigma_{A_{1} = \alpha_{A_{1}}}(s_{1})\right)\right) \mid \left\langle a_{1}, ..., a_{n} \right\rangle \in s_{1} \right\rangle,$$

$$s_{1}'' = s_{1}' \triangleright \triangleleft r_{2} = \left\{ f_{1}' = (f_{1}, f_{2}) \mid f_{1} \in s_{1}' \land f_{2} \in r_{2} \land \land rel(s_{1}'') \subseteq (rel(s_{1}') \cup rel(r_{2}) \land s_{1}'[B_{1}] = r_{2}[B_{1}]) \right\},$$

$$s_{2} = r_{1} \triangleright \triangleleft s_{1}'' = \left\{ f = (f_{1}, f_{2}) \mid f_{1} \in r_{1} \land f_{2} \in s_{1}'' \land \land rel(s_{2}) \subseteq (rel(r_{1}) \cup rel(s_{1}'') \land r_{1}[A_{1}] = s_{1}''[A_{1}]) \right\},$$

где ⊳< – оператор соединения; π – оператор проекции; σ – оператор выбора (селекции); rel — отношение.

Первая таблица содержит данные измерений с дискретностью в одну секунду. Данные присоединяемых таблиц, имеющие большую дискретность (информативность), фильтруются (пропускаются в пределах необходимого времени) до заданной дискретности. Данные, имеющие меньшую дискретность, размножаются (копируются в пределах необходимого времени) до получения заданной дискретности.

Обозначая дополнительную таблицу с информацией по выполненным полетам как g=sort(id, Дата полета, id бортовой номер), добавление в таблицу структурированных данных, р, базы данных выглядит как

$$p = p \cup s' = \{f \mid f \subset p \lor f \subset s'\},\$$

 $s' = \{f = (f_1, f_2) \mid f_1 \in s \land f_2 \subset g, g[id] = a \land rel(s') = rel(p)\}.$

Алгоритмический аппарат оперативного анализа

Обобщенный алгоритм работы выполняемых расчетов представлен на рис. 9. Верхний уровень описания алгоритма отражает структуру и последовательность основных задач, которые необходимо решить при разработке полного алгоритма.

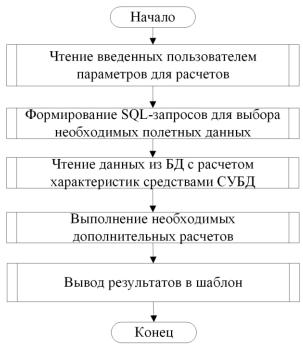


Рис. 9. Обобщенный алгоритм работы выполняемых расчетов

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

123

124

1) Алгоритм расчета непрерывности связи.

Алгоритм расчета непрерывности связи представлен на рис. 10 и 11.

Данные по качеству связи считываются предварительно при выборе анализируемого полета до загрузки инструментария анализа. Алгоритм производит расчет значения непрерывности как среднее значение качества связи за последние T секунд, а также фиксирует участки полета, где непрерывность снижалась ниже уровня Q. Значения T и Q задаются пользователем при настройке анализа. Массив с полученными значениями непрерывности синхронизируется с остальными полетными данными, выводимыми в шаблон результатов.

2) Алгоритм синхронизации данных.

Алгоритм синхронизации данных представлен на рис. 12. Входными данными для алгоритма служат два массива aT1() и aT2(). Данные в массиве aT1()содержат временные метки с дискретностью в одну секунду. Массивом aT1()служат данные качества связи и средней скорости передачи информации в ВК и НК. Массив aT2() содержит синхронизируемые данные, первым столбцом которого являются данные с временными метками. В случае отсутствия данных в aT2() с такой же меткой времени как в aT1() данные заполняются предыдущими значениями.

3) Алгоритм формирования гистограмм рассчитанных в зависимости от ракурсов НПУ и БпЛА.

Алгоритм представлен на рис. 13.

Для фильтрации необходимых данных и выполнения расчетов средствами СУБД формируются SQL-запросы. Первоначально выборка данных, производится запросом q1:

```
«SELECT
             Atr_1, Atr_2, ..., Atr_n
FROM
             C2DL
WHERE
             Atr 1 \ge x_1 AND Atr 1 < x_2
             AND Atr 2 \ge x_3 AND Atr_2 < x_4 ... >,
```

где Atr_i – выбранные атрибуты отношения, i = 1, n; C2DL – таблица с полетными данными; x_i – границы выбранного диапазона параметров, j = 1, k.

Для определения состояния канала по формулам (2), (3) и (4) формируются новые атрибуты и включаются в выражение q1 после оператора SELECT в выборку атрибутов следующую конструкцию

```
\langle IIf([rx\_quality]>=L, 1, 0) AS rx\_on,
IIf([tx\_quality]>=L, 1, 0) AS tx\_on,
IIf([rx\_quality] >= L AND [tx\_quality] >= L, 1, 0) AS rx\_tx\_on >>,
```

где IIf – функция для определения истинности выражения и возвращения одного из двух значений (1 или 0); $[rx_quality]$ и $[tx_quality]$ – поля отношения C2DL, содержащие значение качества связи для HK и BK соответственно; L – задаваемый пороговый уровень качества связи; rx_on , tx_on , rx_tx_on — формируемые атрибуты состояния нисходящего, восходящего канала связи и линии в целом соответственно.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

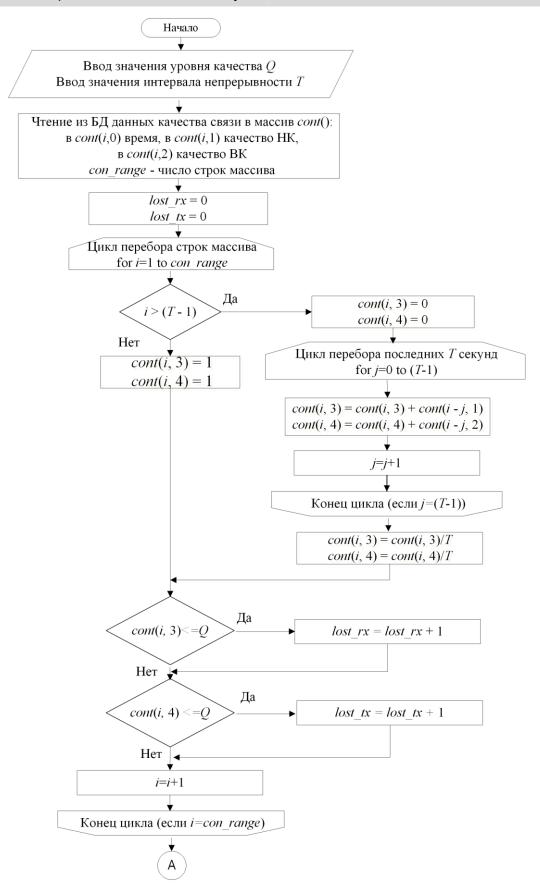


Рис. 10. Алгоритм расчета непрерывности связи

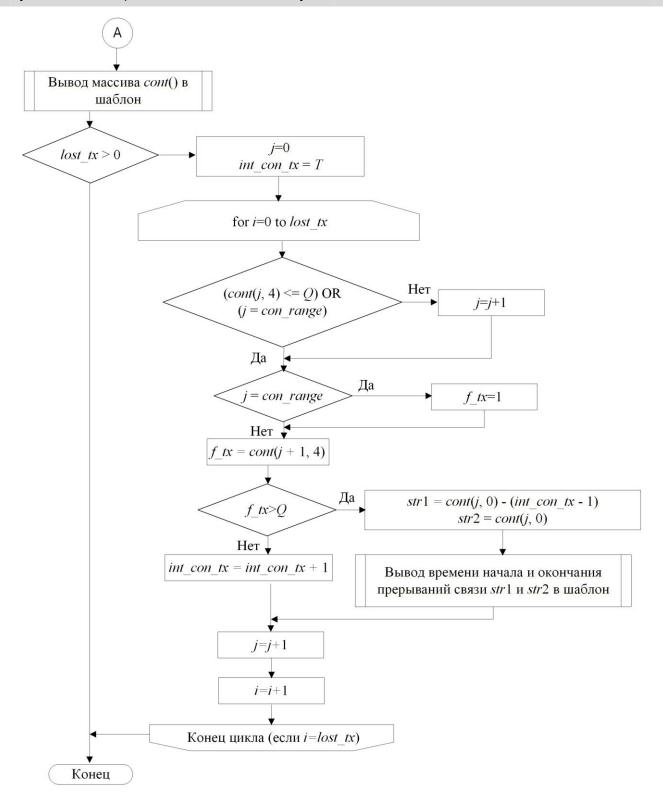


Рис. 11. Алгоритм расчета непрерывности связи (окончание)

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

126

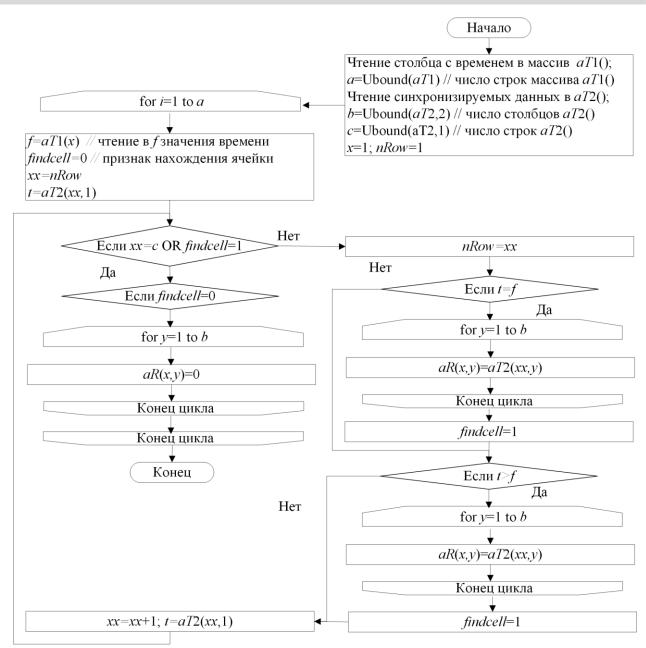


Рис. 12. Алгоритм синхронизации данных

Формирование гистограмм распределения качества связи выполняется составным запросом q2, используя операцию соединения JOIN с отношением *interval*:

«SELECT	[interval].id, First([interval].fr) AS ot,
	First([$interval$]. to) AS do , Count($q.rx$) AS n
FROM	q1 INNER JOIN [interval] ON
	$q1.rx \le [interval].to AND q0.rx \ge [interval].fr$
GROUP BY	[interval].id»
и составным запросом q3	
«SELECT	do , Sum (n) AS sum_n
FROM	q2
GROUP BY	do»,

где Count – функция подсчета количества записей, возвращенных запросом; Sum – функция расчета суммы набора значений, содержащихся в заданном поле запроса.

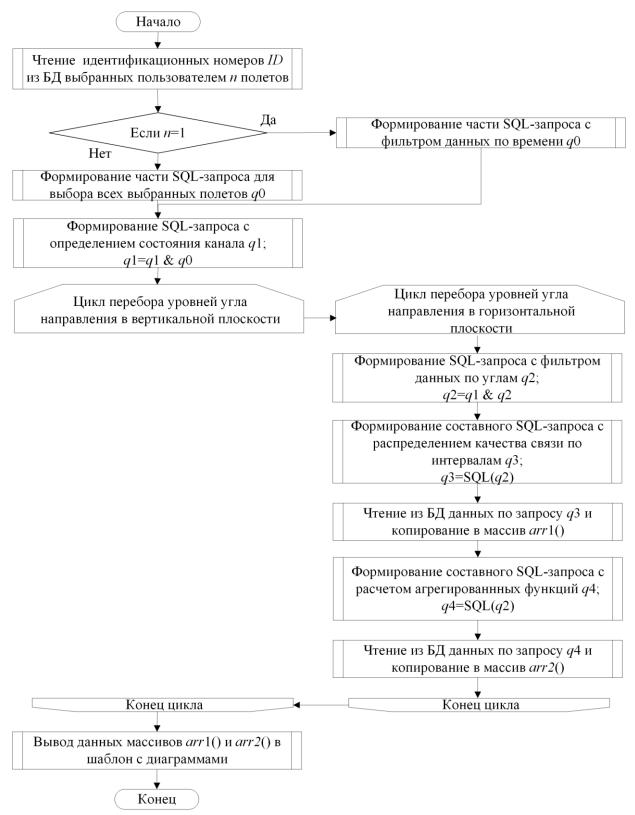


Рис. 13. Алгоритм формирования гистограмм, рассчитанных в зависимости от ракурсов НПУ и БпЛА

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

Systems of Control, Communication and Security

ISSN 2410-9916

Для расчета агрегированных данных по параметрам полета, ракурсам и режимам работы оборудования используем выражение q4

 \ll SELECT Avg(q1.Atr1) AS $Atr1_s$,

StDev(q1.Atr1) AS $Atr1_sko$,

Min(q1.Atr1) AS $Atr1_min$,

Max(q1.Atr1) AS $Atr1_max$,

Count(q1.Atr1) AS $Count_Atr1$,

Sum(q1.Atr1) AS Sum_Atr1 ,

. . . .

FROM q1»,

где Avg, StDev, Min, Max – функции расчета среднего арифметического значения, среднеквадратичного отклонения, минимального и максимального значения соответственно.

Для расчета коэффициента готовности каналов связи kg_pk и kg_ok используем составной запрос

 $\text{ $"$SELECT$ } [Sum_tx_on]/[Count_tx_on] \text{ AS } kg_pk,$

[Sum_rx_on]/[Count_rx_on] AS kg_ok

FROM q3»,

где Sum_tx_on , Sum_rx_on — сумма значений параметров tx_on , rx_on соответственно; $Count_tx_on$, $Count_rx_on$ — количество записей параметров tx_on , rx_on соответственно.

Результаты применения

Сравнение технических характеристик технологических процессов с применением ПО обработки измерительной информации при летных испытаниях авиационной техники и с применением ПО, разработанного на основе предлагаемых решений, представлено в таблице 7.

Таблица 7 – Технические характеристики технологических процессов

Характеристика	Существующее	Разработанное
	ПО	ПО
Количество получаемых характеристик в резуль-	3	8
тате анализа		
Надежность связи	+	+
Непрерывность связи	-	+
Влияние ракурса НПУ	-	+
Влияние ракурса БпЛА	-	+
Влияние ЦН	+	+
Влияние удаления	+	+
Влияние ракурса НПУ по нескольким полетам	-	+
Влияние ракурса БпЛА по нескольким поле-	-	+
там		
Количество автоматизированных функций	2	17
Поиск участков полета по заданным параметрам		
полета		
по дальности	Ручной	Авто
по азимуту НПУ	Ручной	Авто

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

Характеристика	Существующее	Разработанное		
	ПО	ПО		
по углу возвышения НПУ	Ручной	Авто		
по азимуту НПУ	Ручной	Авто		
по углу возвышения НПУ	Ручной	Авто		
по времени	Ручной	Авто		
по режимам ЦН	Ручной	Авто		
Расчет характеристик связи для выделяемого				
участка полета				
качество	Ручной	Авто		
непрерывность	-	Авто		
коэффициент готовности	Ручной	Авто		
Совмещение данных нескольких полетов	-	Авто		
Графическая визуализация результатов анализа				
гистограммы качества	-	Авто		
траектория полета	Ручной	Авто		
временные диаграммы	Авто	Авто		
масштабирование и прокрутка диаграмм	Авто	Авто		
масштабирование и прокрутка траектории по-	-	Авто		
лета				
Формирование отчета	Ручной	Авто		

Объем трудозатрат на обработку и анализ полета продолжительностью 6 ч с применением существующего ПО для полета продолжительностью 6 ч составил 18 ч, в то время как с применением разработанного ПО 3,7 ч. Разработанное ПО позволяет не только снизить объем трудозатрат на обработку и анализ полета, но и, как видно из таблицы 7, предоставляет дополнительный инструментарий анализа, что повышает качество и объективность оценки результатов испытаний.

Заключение

Использование представленных информационных моделей при анализе и оценке характеристик ЛУК БпЛА позволяет уточнять критерии готовности и непрерывности связи по результатам испытаний для вновь создаваемых образцов БпЛА. Применение программного обеспечения, разработанного на основе предлагаемых решений, повышает технические характеристики технологических процессов обработки и анализа результатов летного эксперимента и позволяет снизить объем трудозатрат в 4,8 раза по сравнению с использованием существующего программного обеспечения технологической линии обработки испытательной информации.

Элементами новизны являются:

1) новые алгоритмы послеполетной обработки и анализа полетной информации, в которых учитывается показатель непрерывности связи, а также обеспечивается оперативный подбор критериев оценки характеристик связи без повторной обработки первичной полетной информации;

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

- 2) использование в процессе оценки характеристик связи ЛУК БпЛА экспертных оценок для уточнения критериев оценки готовности и непрерывности связи;
- 3) включение в процесс анализа описательных и непараметрических статистик для выявления влияющих факторов;
- 4) модель данных, реализующая предметную ориентированность полетных данных, разработанная для упрощения создания аналитических запросов.

Включение реализованного программного обеспечения на основе предложенных решений в линию технологической обработки и анализа результатов испытаний позволит повысить оперативность и достоверность выполняемой оценки характеристик связи ЛУК БпЛА в условиях сокращения сроков испытаний и возрастания количества выполняемых опытно-конструкторских работ.

Литература

- 1. ГОСТ Р 57258–2016. Системы беспилотные авиационные. Термины и определения. М.: Стандартинформ, 2016. 12 с.
- 2. Меркулов В. И. Научно-технические проблемы разработки авиационных систем радиоуправления // Научные чтения по авиации, посвященные памяти Н.Е. Жуковского. 2015. № 3. С. 43-50.
- 3 Авиационные системы радиоуправления. Т. 3. Системы командного радиоуправления. Автономные и комбинированные системы наведения / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова М.: Радиотехника, 2004. 320 с.
- 4. Верба В. С., Меркулов В. И. Авиационные системы радиоуправления: монография. М.: Радиотехника, 2014. 376 с.
- 5. Верба В. С., Татарский Б. Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами. В 2-х кн.: Кн. 1. Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА: монография. М.: Радиотехника, 2016. 512 с.
- 6. Моисеев В. С. Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография. Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования», 2013. 768 с.
- 7. Слюсар В. Передача данных с борта БПЛА: стандарты НАТО // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 3. С. 80-87.
- 8. Слюсар В. Радиолинии связи с БПЛА. Примеры реализации // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2010. № 5. С. 56-61.
- 9. Боев Н. М. Анализ командно-телеметрической радиолинии связи с беспилотными летательными аппаратами // Вестник сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2012. № 2. С. 86-91.
- 10. Боев Н. М., Шаршавин П. В., Нигруца И. В. Построение систем связи беспилотных летательных аппаратов для передачи информации на большие расстояния // Известия ЮФУ. Технические науки. 2014. № 3. С. 147-158.
- 11. Макаренко С. И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб: Наукоемкие технологии, 2020. 204 с.
- 12. Иванов М. С., Афонин И. Е., Макаренко С. И. Повышение устойчивости автоматизированной системы управления комплекса с

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136

gaev.pdf 131

беспилотными летательными аппаратами в условиях воздействия средств физического поражения и радиоэлектронного подавления // Системы управления, связи и безопасности. 2022. № 2. С. 92-134.

- 13. Jain R., Templin F. Wireless Datalink for Unmanned Aircraft Systems: Requirements, Challenges, and Design Ideas // American Institute of Aeronautics and Astronautics InfoTech Conference (Saint Louis, MO, 29 March 2011). Saint Louis, 2011. P. 852-860. doi:10.2514/6.2011-1426.
- 14. Depoorter D. G., Lücke O. Required Communication Technical Performance, the application layer QoS metric for aeronautical data communications // Conference: 21st Ka and Broadband Communications Conference. Bologna, 2015. P. 100-107.
- 15. Jara-Olmedo A., Medina-Pazmiño W., Galarza E. E., Silva F. M., Galarza E. D., Naranjo C. A. Data Link System Flight Tests for Unmanned Aerial Vehicles // International Conference of Research Applied to Defense and Security. Singapore: Springer Pte Ltd, 2020. P. 151–161. doi:10.1007/978-3-319-78605-6_12.
- 16. Mcshea R. E. Test and Evaluation of Aircraft Avionics and Weapon Systems. 2nd Edition. Edison: SciTech Publishing, 2014. 1006 p.
- 17. Хейфец М. И. Обработка результатов испытаний: Алгоритмы, номограммы, таблицы. М.: Машиностроение, 1988. 168 с.
- 18. Махонькин Ю. Е., Павлова З. А., Фальков А. И., Корачков В. И. Автоматизированная обработка результатов измерений при летных испытаниях. М.: Машиностроение, 1983. 112 с.
- 19. Барсегян А. А. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 336 с.
- 20. Растегаев И. Г., Молчанов А. С., Емельянов А. М. Анализ производительности каналов связи радиолинии управления и контроля беспилотными летательными аппаратами // Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. № 10. С. 92-102.
- 21. Растегаев И. Г., Тепловодский А. В., Солохин С. В. Анализ и оценка влияния факторов на производительность командной радиолинии управления и контроля БпЛА // Сборник статей по материалам III Всероссийской НПК «Беспилотная авиация: состояние и перспективы развития» (23-25 ноября 2021 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2021. С. 108-112.
- 22. Растегаев И. Г., Пономаренко Д. Н., Солохин С. В. Методические аспекты экспертной оценки внешним пилотом линии управления и контроля беспилотными летательными аппаратами // Сборник статей: беспилотная авиация: состояние и перспективы развития: сб. науч. ст. по материалам II Всероссийской НПК (11-12 марта 2020 г.). Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2020. С. 144-147.
- 23. Растегаев И. Г., Молчанов А. С., Солохин С. В. Модель планирования летных испытаний командной радиолинии управления и контроля беспилотным летательным аппаратом // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. № 9. С. 191-201. doi: 10.24412/2071-6168-2022-9-191-201.
- 24. Алферов В. В., Мезенцев В. Г. Обработка опытных данных и представление результатов измерений: Справочное пособие. МО СССР, 1979. 240 с.

- 25. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. М.: Высшая школа, 2006. 575 с.
- 26. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL: учебное пособие. М.: Форум, 2008. 464 с.
- 27. Дейт К. Дж. SQL и реляционная теория. Как грамотно писать код на SQL. СПб.: Символ-Плюс, 2010.-480 с.
 - 28. Мейер Д. Теория реляционных баз данных. М.: Мир, 1987. 608 с.
- 29. Райордан Р. Основы реляционных баз данных. М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция», 2001. 384 с.
- 30. ГОСТ Р ИСО 5479-2002. Статистические методы. Проверка отклонения распределения вероятностей от нормального распределения. М.: Издательство стандартов, 2002.-31 с.

References

- 1. State Standard R 57258–2016. Unmanned aerial systems. Terms and Definitions. Moscow, Standartinform, 2016. 12 p. (in Russian).
- 2. Merkulov V. I. Nauchno-tekhnicheskie problemy razrabotki aviacionnyh sistem radioupravleniya [Scientific and Technical Problems of the Development of Aviation Radio Control Systems]. *Nauchnye chteniya po aviacii, posvyashchennye pamyati N.E. Zhukovskogo* [Scientific Readings on Aviation Dedicated to the Memory of N.E. Zhukovsky], 2015, no. 3, pp. 43-50 (in Russian).
- 3. Kanashchenkov A. I., Merkulov V. I. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya*. *T. 3. Sistemy komandnogo radioupravleniya*. *Avtonomnye i kombinirovannye sistemy navedeniya* [Aircraft Radio Control Systems. Vol. 3. Systems of Command Radio Control. Autonomous and Combined Guidance Systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2004. 320 p. (in Russian).
- 4. Verba V. S., Merkulov V. I. *Aviacionnye sistemy radioupravleniya*. *Monografija* [Aircraft Radio Control Systems. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 376 p. (in Russian).
- 5. Verba V. S., Tatarskij B. G. *Kompleksy` s bespilotny`mi letatel`ny`mi apparatami. Princzipy` postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA* [Complexes with Unmanned Aerial Vehicles. Principles of Construction and Features of the Use of Complexes with UAVs. Monography]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2016. 512 p. (in Russian).
- 6. Moiseev V. S. *Prikladnaya teoriya upravleniya bespilotny* mi letatel ny mi apparatami [Applied theory of control of unmanned aerial vehicles. Monography]. Kazan, «Respublikanskij czentr monitoringa kachestva obrazovaniya» Publ., 2013. 768 p. (in Russian).
- 7. Slyusar V. Peredacha danny`kh s borta BPLA: standarty` NATO [Data Transmission from UAV: NATO Standards]. *Elektronika: nauka, tekhnologiia, biznes.* 2010, no. 3, pp. 80-87. (in Russian).
- 8. Slyusar V. Radiolinii svyazi s BPLA. Primery` realizaczii [Radio Links with the UAV. Implementation Examples]. *Elektronika: nauka, tekhnologiia, biznes.* 2010, no. 5, pp. 56-61. (in Russian).
- 9. Boev N. M. Analiz komandno-telemetricheskoj radiolinii svyazi s bespilotny`mi letatel`ny`mi apparatami [Analysis of the Command-Telemetric Radio

Link with Unmanned Aerial Vehicles]. *Vestnik sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta im. akademika M.F. Reshetneva*. 2012, no. 2, pp. 86-91. (in Russian).

- 10. Boev N. M., Sharshavin P. V., Nigrucza I. V. Postroenie sistem svyazi bespilotny`kh letatel`ny`kh apparatov dlya peredachi informaczii na bol`shie rasstoyaniya [Construction of Communication Systems for Unmanned Aerial Vehicles for Transmitting Information over Long Distances]. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*. 2014, no. 3, pp. 147-158. (in Russian).
- 11. Makarenko S. I. *Protivodejstvie bespilotny* 'm letatel 'ny 'm apparatam [Counter Unmanned Aerial Vehicles. Monography]. St. Petersburg, Naukoemkie tekhnologii Publ., 2020. 204 p. (in Russian).
- 12. Ivanov M. S., Afonin I. E., Makarenko S. I. Increasing Stability of the Control System of Unmanned Aerial Vehicles in the Conditions of Fire Damage and Electronic Warfare. *Systems of Control, Communication and Security*, 2022, no. 3, pp. 92-134 (in Russian).
- 13. Jain R., Templin F. Wireless Datalink for Unmanned Aircraft Systems: Requirements, Challenges, and Design Ideas. *AIAA InfoTech Conference*. Saint Louis. 2011. pp. 852-860. doi:10.2514/6.2011-1426.
- 14. Depoorter D. G., Lücke O. Required Communication Technical Performance, the Application Layer QoS Metric for Aeronautical Data Communications. *Conference: 21st Ka and Broadband Communications Conference*. Bologna, 2015. pp. 100-107.
- 15. Jara-Olmedo A., Medina-Pazmiño W., Galarza E. E., Silva F. M., Galarza E. D., Naranjo C. A. Data Link System Flight Tests for Unmanned Aerial Vehicles. *International Conference of Research Applied to Defense and Security*. Singapore, Springer Pte Ltd Publ., 2020. pp. 151–161. doi:10.1007/978-3-319-78605-6 12.
- 16. Mcshea R. E. *Test and Evaluation of Aircraft Avionics and Weapon Systems*. Edison, SciTech Publ., 2014. 1006 p.
- 17. Kheifets M. I. *Obrabotka rezul'tatov ispytanij: Algoritmy, nomogrammy, tablicy* [Processing of Test Results: Algorithms, Nomograms, Tables]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1988. 168 p. (in Russian).
- 18. Makhon`kin Yu. E., Pavlova Z. A., Fal`kov A. I., Korachkov V. I. *Avtomatizirovannaya obrabotka rezul`tatov izmerenij pri letny`kh ispy`taniyakh*. [Automated Processing of Measurement Results During Flight Tests]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 112 p. (in Russian).
- 19. Barsegyan A. A. *Metody i modeli analiza danny`kh: OLAP i Data Mining* [Methods and Models of Data Analysis: OLAP and Data Mining]. St. Petersburg, BHV-Peterburg Publ., 2004. 336 p. (in Russian).
- 20. Rastegaev I. G., Molchanov A. S., Emelyanov A. M. Analysis of Communications Performance of the Command and Control Data Link for Unmanned Aircraft Vehicles. *Izvestiya Tula State University. Technical science*. 2019, no. 10, pp. 92-102 (in Russian).
- 21. Rastegaev I. G., Teplovodsky A. V., Solokhin S. V. Analiz i ocenka vliyaniya faktorov na proizvoditel'nost' komandnoj radiolinii upravleniya i kontrolya BpLA [Analysis and Assessment of the Influence of Factors on the Performance of the UAV Command and Control Data Link] *Sbornik statej po materialam III*

Vserossijskoj NPK «Bespilotnaya aviaciya: sostoyanie i perspektivy razvitiya» [Collection of Articles Based on the Materials of the III All-Russian Scientific and Production Complex "Unmanned Aviation: Status and Development Prospects"]. Voronezh, 2021. pp. 108-112 (in Russian).

- 22. Rastegaev I. G., Ponomarenko D. N., Solokhin S. V. Metodicheskie aspekty ekspertnoj ocenki vneshnim pilotom linii upravleniya i kontrolya bespilotnymi letatel'nymi apparatami [Methodological Aspects of Expert Evaluation by an External Pilot of the UAV Command and Control Data Link]. *Sbornik statej: bespilotnaya aviaciya: sostoyanie i perspektivy razvitiya: sb. nauch. st. po materialam II Vserossijskoj NPK* [Collection of articles: unmanned aircraft: state and development prospects: collection of articles. scientific Art. Based on the materials of the II All-Russian Scientific and Practical Conference]. Voronezh, 2020. pp. 144-147 (in Russian).
- 23. Rastegaev I. G., Molchanov A. S., Solokhin S. V. Flight Test Planning Model Radio Link for Command And Control Unmanned Aerial Vehicle. *Izvestiya Tula State University*. *Technical science*. 2022, no. 9, pp. 191-201. (in Russian).
- 24. Alferov V. V., Mezentsev V. G. *Obrabotka opytnyh dannyh i predstavlenie rezul'tatov izmerenij* [Processing of Experimental Data and Presentation of Measurement Results]. Moscow, Ministry of Defence USSR Publ., 1979. 240 p. (in Russian).
- 25. Wentzel E. S. *Teoriya veroyatnostej* [Probability theory]. Moscow, Vysshaya Shkola Publ., 2006. 575 p. (in Russian).
- 26. Vukolov E. A. Fundamentals of statistical analysis. Osnovy statisticheskogo analiza. Praktikum po statisticheskim metodam i issledovaniyu operacij s ispol'zovaniem paketov STATISTICA i EXCEL [Workshop on Statistical Methods and Operations Research Using STATISTICA and EXCEL]. Moscow, FORUM Publ., 2008. 464 p. (in Russian).
- 27. Date K. J. *SQL and Relational Theory. How to Write Code in SQL Correctly*. Sebastopol, California, O'Reilly Media, Inc. Publ., 2009. 428 p.
- 28. Meyer D. *Theory of relational databases*. Rockville, Maryland, Computer Science Press Inc. Publ., 1983. 656 p.
- 29. Riordan R. M. *Designing Relational Database*. Redmond, Washington, Microsoft Press Publ., 1999. 320 p.
- 30. State Standard R ISO 5479-2002. Statistical methods. Checking the deviation of the probability distribution from the normal distribution. Moscow, Izdatel'stvo standartov, 2002. 31 p. (in Russian).

Статья поступила 13.10.2022 г.

Информация об авторе

Растегаев Иван Геннадьевич — соискатель ученой степени кандидата наук. Научный сотрудник. Государственный летно-испытательный центр им. В.П.Чкалова. Область научных интересов: методы и системы контроля и испытаний военной техники. E-mail: kblatest@mail.ru

Адрес: Россия, 416500, г. Ахтубинск.

ISSN 2410-9916

Improving the Quality of Analysis and Evaluation of the Communication Performance of the Command and Control Data Link of an Unmanned Aerial **Vehicle Based on the Results of Flight Tests**

I. G. Rastegaev

Purpose. The irreducible interest in unmanned aerial vehicles (UAVs) on the part of various government agencies, the expansion of the scope and high efficiency of the use of complexes with UAVs determine the constant improvement of requirements for them and an increase in work on the creation of promising complexes with UAVs. The existing methodological testing apparatus and information-analytical software for flight testing of UAV command and control data links (C2) do not provide an objective assessment of compliance with the specified requirements while reducing the testing time and increasing the number of development work performed. The purpose of the present paper is to improve the quality of the analysis and evaluation of the UAV C2 link communication performance based on the results of flight tests through newly developed information models for the flight data processing, analysis and evaluation of the UAV C2 link communication performance, which ensure the introduction of OLAP (On-line Analytical Processing) technologies into the analysis system of flight test results. It is proposed to take into account in the models the features of modern and future UAV C2 link, to increase the efficiency and information content of the analysis of the results of flight experiments due to the developed model for storing the processed flight data, mathematical and algorithmic apparatus for operational analysis and forms for presenting the results. Methods. When solving the problems of evaluation of the performance of the UAV C2l link, the method of expert evaluation performed by external UAV pilots is used. The tasks of increasing the efficiency and informativeness of the analysis of the results of flight experiments are solved by methods based on the use of individual elements of the theory of experiment planning, mathematical statistics, system analysis and database theory. Novelty. Novelty elements are: 1) New algorithms for post-flight processing and analysis of flight information, which take into account the indicator of communication continuity, and also provides for the rapid selection of criteria for assessing communication performance without re-processing the primary flight information; 2) The use of expert assessments in the process of evaluating the communication performance of the UAV C2 link to clarify the criteria for assessing the availability and continuity of communication; 3) Inclusion in the process of analysis of descriptive and non-parametric statistics to identify influencing factors; 4) Data model that implements the subject orientation of flight data, designed to simplify the creation of analytical queries. Result. The use of the proposed information models improves the technical characteristics of the technological processes for processing and analyzing the results of a flight experiment and reduces the amount of labor costs by 4.8 times compared with the use of the existing software for the technological line for processing test information. Practical relevance. The presented solution is proposed to be implemented in the form of special software. The inclusion of the implemented software based on the proposed solutions in the line of technological processing and analysis of test results will increase the efficiency and reliability of the evaluation of the UAV C2 link communication performance in the context of reduced testing times and an increase in the number of development work performed.

Keywords: communication performance, conformity assessment, technological line for processing and analyzing the results of flight tests, UAV command and control data link.

Information about Author

Ivan Gennadievich Rastegaev – researcher. State Flight Testing Center the Name of V.P. Chkalov. Field of research: methods and systems of control and testing military equipment. E-mail: kblatest@mail.ru

Address: Russia, 416500, Akhtubinsk.

DOI: 10.24412/2410-9916-2022-4-103-136