

Модели оценки воздействий внешних дестабилизирующих факторов на достоверность телеметрической информации при испытаниях и эксплуатации летательных аппаратов

Н. П. Борненко^{1✉}, А. А. Бянкин¹, Б. Р. Погорелов¹, А. М. Полунин²

¹ Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

² НИЦ «ЦНИИ Воздушно-космических сил», Королев, Россия

✉ n.p.bor.94@mail.ru

Аннотация. Рассматривается возможность повышения достоверности телеметрической информации при проведении испытаний и эксплуатации летательных аппаратов, приведены модели оценки воздействий внешних дестабилизирующих факторов на достоверность телеметрической информации. Проведена оценка вероятности ошибки на бит телеметрической информации в различных условиях помеховой обстановки. Рассмотрены воздействие аддитивного белого гауссова шума на радиолинии КИМ₂-ЧМ, КИМ₂-ФМ, GMSK и OQPSK и помех «немодулированная несущая», многочастотная помеха, шумовая прицельная по частоте помеха на структуру типового сигнала вида модуляции КИМ₂-ЧМ. На основе полученных в результате моделирования данных предлагается проводить выбор методов и алгоритмов для повышения достоверности телеметрической информации.

Ключевые слова: телеметрическая информация, послесеансная додетекторная обработка, достоверность, помехи, летательные аппараты, испытания

Для цитирования: Модели оценки воздействий внешних дестабилизирующих факторов на достоверность телеметрической информации при испытаниях и эксплуатации летательных аппаратов / Н. П. Борненко, А. А. Бянкин, Б. Р. Погорелов, А. М. Полунин // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2025. Т. 18, № 10. С. 57–70. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-57-70.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Original article

Models for Evaluation the Impact of Destabilizing Factors on Reliability of Telemetry during Testing and Exploitation of Air Vehicles

N. P. Bornenko^{1✉}, A. A. Byankin¹, B. R. Pogorelov¹, A. M. Polunin²

¹ Mozhaisky Military Aerospace Academy, Saint Petersburg, Russia

² Scientific Research Center «Central Scientific Research Institute of Aerospace Forces», Korolev, Russia

✉ n.p.bor.94@mail.ru

Abstract. The article considers the possibility of increasing the reliability of telemetric information during testing and exploitation of air vehicles, provides models for evaluation the impact of destabilizing factors on reliability of telemetry. The bit error rate of telemetry information has been estimated in various reception conditions. The effects of additive white Gaussian noise, «unmodulated carrier» interference, multi-frequency interference and frequency-targeting noise interference on the structures of a typical radio links are considered. Based on the presented models and the data obtained, the implementation of methods and algorithms for increasing the reliability of telemetric information is proposed.

Keywords: telemetry, post-session pre-detector processing, reliability, interferences, air vehicles, testing

For citation: Models for Evaluation the Impact of Destabilizing Factors on Reliability of Telemetry during Testing and Exploitation of Air Vehicles / N. P. Bornenko, A. A. Byankin, B. R. Pogorelov, A. M. Polunin // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2025. Vol. 18, no. 10. P. 57–70. doi: 10.32603/2071-8985-2025-18-10-57-70.

Conflict of interest. The authors declare no conflicts of interest.

Введение. В настоящее время развитие инфраструктуры испытательных полигонов и космодромов при проведении летных испытаний и эксплуатации (ЛИЭ) летательных аппаратов (ЛА) оказывает существенное влияние на достоверность телеметрической информации (ТМИ) системы информационно-телеметрического обеспечения (СИТО). По результатам анализа ТМИ подтверждаются заданные летно-технические характеристики ЛА и оценивается его техническое состояние при эксплуатации. Необходимость высокой достоверности ТМИ обусловлена уникальностью и высокой стоимостью ЛИЭ ЛА. Развитие инфраструктуры полигонов и космодромов приводит к появлению новых электромагнитных внешних дестабилизирующих факторов (ВДФ) в виде непреднамеренных (неизвестная и динамично меняющаяся помеховая обстановка, движущиеся источники помех, многолучевое распространение сигналов) и преднамеренных (средства радиоэлектронного подавления (РЭП) нарушителя) помех при приеме на приемно-регистрирующую аппаратуру (ПРА). Эти сложные условия приема ТМИ, характеризующиеся низкими отношениями сигнал/шум (ОСШ) и сигнал/помеха (ОСП) (значения от 4 дБ и менее), приводят к искажениям передаваемой с ЛА информации, к нарушению нормального функционирования системы синхронизации ПРА. Срыв функционирования синхронизации ПРА приводит к безвозвратным потерям всего потока ТМИ до момента полного восстановления процесса синхронизации.

Анализ последетекторных записей наземных приемно-регистрирующих станций МПРС-ПМ измерительных пунктов трасс ЛИЭ ЛА показал, что при приеме ТМИ, передаваемой в зоне радиовидимости одного измерительного пункта, возможна потеря достоверности до 20 % ее объема. Такие ситуации встречаются достаточно часто, например в [1] представлены сведения о потерях ТМИ при сеансах измерений запуска ракеты-носителя «Союз». Таким образом, статистика подтверждает актуальность разработки методов по-

вышения достоверности ТМИ в сложных условиях на всех этапах приема и обработки.

В требованиях, предъявляемых к радиотелеметрическим системам (РТС), потери ТМИ более 2 % от общего объема ТМИ считают отказом оборудования. При приеме на ПРА требования по потере ТМИ нормируется таким показателем достоверности ТМИ, как вероятность ошибки на бит (ВОБ). Зоной устойчивого приема установлен диапазон ВОБ от 10^{-3} до 10^{-5} . В случаях невозможности получения требуемого качества ТМИ в реальном масштабе времени (при ВОБ более 10^{-3}) необходимо осуществление послесеансной обработки. Повышение достоверности ТМИ возможно на 3 этапах этого вида обработки [2]:

- 1) додетекторная обработка (на этапе оцифровки отсчетов сигналов с приемных устройств на промежуточной частоте (ПЧ) и проведения их дальнейшей обработки различными методами);
- 2) детекторная обработка (на этапе демодуляции и дальнейшей обработки получившихся видеосигналов);
- 3) последетекторная обработка (на этапе восстановления структуры данных битового потока).

Существующие методы повышения достоверности ТМИ, реализованные на этапах детекторной и последетекторной обработки (оптимальный прием сигналов, помехоустойчивое кодирование, разнесенный прием), не в полной мере позволяют эффективно противодействовать ВДФ и восстанавливать искаженную ТМИ. Методы оптимального приема (адаптивные пространственная и режекторная фильтрации) сложны в реализации и приводят к ухудшению разрешающей способности и ошибкам по восстанавливаемому сигналу при обратном преобразовании. Помехоустойчивое кодирование требует введения избыточности информации, для чего, в свою очередь, необходимо повышение вычислительных ресурсов бортовых информационно-телеметрических систем (БИТС) и повышения информативности информационно-телеметрических средств (ИТС). Наиболее эффективные методы разнесен-

ного приема требуют использования дополнительной ПРА в местах расположения трассы ЛИЭ ЛА, что требует больших материальных затрат и не всегда возможно [3].

Перспективные методы повышения достоверности ТМИ в условиях воздействий ВДФ на ПРА основаны на режиме послесансной додетекторной обработки ТМИ методами цифровой обработки сигналов (ЦОС). Преимущество этого вида обработки заключается в возможности восстановления амплитудных, частотных и фазовых составляющих сигналов по файлам регистрации отсчетов аналого-цифрового преобразователя (АЦП) приемного устройства посредством применения различных итерационных алгоритмов. Основные недостатки – потеря оперативности телеконтроля ЛИЭ ЛА, а также существенные затраты вычислительных ресурсов.

Постановка задачи. С целью разработки наиболее эффективных и ресурсоемких методов послесансной додетекторной обработки необходима теоретически обоснованная модель абстрактного формализованного математического моделирования на ЭВМ имитационным методом. Она должна быть ориентирована на послесансную обработку принятых и зарегистрированных потоков оцифрованных отсчетов сигналов на промежуточной частоте, давать возможность оценить влияние различных помех на достоверность приема ТМИ различных радиолиний, отличающихся реализацией алгоритмов демодуляции и принятия решений о принятом символе, сформировать базу данных по возможным воздействиям ВДФ и их последствиям при приеме ТМИ, выбрать параметры додетекторной регистрации, а также оценить эффективность реализованных методов додетекторной обработки.

Имеющиеся на данный момент модели радиоканалов передачи ТМИ [4]–[7] не в полной мере позволяют решить поставленные задачи. В связи с этим цель данной статьи – разработка модели оценки воздействий ВДФ на достоверность ТМИ при ЛИЭ ЛА, анализ результатов моделирования и оценка теоретической обоснованности использования данных моделей.

Разработка модели оценки воздействий ВДФ на достоверность ТМИ при ЛИЭ ЛА. Среди методов передачи ТМИ ЛА наиболее распространены двухпозиционная кодоимпульсная ма-

нипуляция – частотная модуляция (КИМ₂-ЧМ) и двухпозиционная кодоимпульсная манипуляция – фазовая модуляция (КИМ₂-ФМ). По рекомендациям Консультационного комитета по космическим информационным системам (CCSDS) все большее применение находят такие виды модуляции, как гауссовская частотная манипуляция с минимальным частотным сдвигом (Gaussian Minimum Shift Keying, GMSK) и квадратурная фазовая манипуляция со сдвигом (Offset Quadrature Phase Shift Keying, OQPSK) [8].

КИМ₂-ЧМ – это разновидность угловой модуляции, при которой меняется частота модулированного сигнала, а амплитуда остается неизменной. Математическое выражение сигнала КИМ₂-ЧМ имеет вид

$$S_{\text{ЧМ}}(t) = A \cos[(f_{\text{н}} + e(t)\Delta f) + \varphi],$$

где t – время; A – амплитуда сигнала; $f_{\text{н}}$ – несущая частота; $e(t)$ – модулирующий сигнал, принимающий значения символов «0» или «1» информационной последовательности; Δf – девиация частоты, т. е. отклонение значения частоты модулированного сигнала от значения частоты несущей; φ – фаза сигнала.

Спектр радиосигнала с модуляцией КИМ₂-ЧМ зависит от индекса ЧМ $m_f = \Delta f/F$, где F – частота модулирующего сигнала.

Закон формирования фазоманипулированного сигнала КИМ₂-ФМ состоит в сопоставлении цифровому модулирующему сигналу определенной фазы несущего сигнала. Выражение для сигнала КИМ₂-ФМ примет вид

$$S_{\text{ФМ}}(t) = A \cos[f_{\text{н}} + (k_{\text{ф}}e(t) + \varphi_0)],$$

где $k_{\text{ф}}$ – коэффициент пропорциональности, связывающий изменение фазы с управляющим сигналом $e(t)$; φ_0 – начальная фаза при $e(t) = 0$.

GMSK используется в современных системах цифровой радиосвязи GSM и относится к сигналам с эффективным использованием полосы пропускания [8].

Принцип формирования GMSK-сигнала подобен принципу КИМ₂-ЧМ, но имеет следующие особенности:

1) модулирующий сигнал $e(t)$ предварительно пропускается через фильтр Гаусса. За счет сгла-

женных фронтов фаза модулированного сигнала имеет непрерывный набег, что сужает его полосу;

2) индекс ЧМ $m_f = 0.5$, что также сужает полосу.

Фильтр Гаусса – цифровой фильтр, имеющий импульсную характеристику в виде функции Гаусса

$$h(t) = B \sqrt{\frac{2\pi}{\ln(2)}} e^{-\frac{(Bt\pi)^2}{\ln(2)}},$$

где B – полоса пропускания фильтра по уровню 3 дБ.

Формирование сигнала OQPSK состоит в разделении последовательного битового потока на параллельные синфазный (I – in-phase) и квадратурный (Q – quadrature) каналы, где синфазный канал принимает значение нечетных битов, а квадратурный – четных. Квадратурный канал задерживается на один период информационного сигнала, затем на фазовом модуляторе в соответствии с комбинацией I и Q каналов формируется радиосигнал, имеющий начальные фазы $\varphi_0 = k\pi/4$, где $k = 1, 2, 3, 4$. Благодаря задержке квадратурного канала устраняется скачок фазы на π , в отличие от схемы формирования QPSK-сигнала.

Рассмотрим возможные виды помех, воздействующие на прием ТМИ [9].

Шумовые помехи считаются стационарными случайными процессами с нормальным законом распределения мгновенных значений, одномерная плотность распределения вероятности амплитуды случайного процесса которых описываются выражением

$$W(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(u - \bar{U})^2}{2\sigma^2}\right],$$

где u – мгновенное значение шумового напряжения; σ^2 – дисперсия шума; \bar{U} – среднее значение шумового напряжения.

При нормальном законе распределения мгновенных значений шумовой помехи закон распределения огибающей U описывается законом Рэлея

$$W(u) = \frac{u}{U_g^2} \exp\left(-\frac{u}{2U_g^2}\right),$$

где U_g^2 – дисперсия шумовой помехи.

В качестве помехи «немодулированная несущая» рассматривается сигнал согласно описанию

$$I(t) = A_{\Pi} \cos(f_{\Pi}(t) + \varphi_{\Pi}),$$

где A_{Π} , f_{Π} , φ_{Π} – амплитуда, частота и фаза помехи соответственно.

В качестве прицельных и заградительных помех также могут использоваться различные виды многочастотных помех, описываемых согласно формуле

$$I(t) = A_{\Pi_1} \cos(f_{\Pi_1}(t) + \varphi_{\Pi_1}) + \dots + A_{\Pi_m} \cos(f_{\Pi_m}(t) + \varphi_{\Pi_m}),$$

где m – номер составляющей гармоник помехи.

В канале связи помеха $I(t)$ и шум $N(t)$ аддитивно влияют на телеметрический сигнал $F(t)$, и поэтому их воздействие математически имеет вид выражения

$$F^*(t) = F(t) + I(t) + N(t).$$

Для приема сигналов рассматриваемых радиолиний могут применяться различные реализации приемников ПРА. Например, для радиолинии КИМ₂-ЧМ и GMSK используются 3 вида приемников: одноканальный, двухканальный и четырехканальный.

В наземной ПРА используется четырехканальный некогерентный приемник, использующий квадратурное разложение принимаемых сигналов. Схема четырехканального некогерентного приемника представлена на рис. 1, где $F^*(t)$ – принимаемый аналоговый сигнал; $S_{0I}(t)$, $S_{0Q}(t)$, $S_{1I}(t)$, $S_{1Q}(t)$ – опорные синфазные и квадратурные составляющие сигналов символов «0» и «1» информационной последовательности; Φ_0 и Φ_1 –

фильтры сигналов символов «0» и «1»; \int_0^T – ин-

тегратор; $A_{0I}^*(t)$, $A_{0Q}^*(t)$, $A_{1I}^*(t)$, $A_{1Q}^*(t)$ – преобразованные синфазные и квадратурные составляющие сигналов символов «0» и «1»; n – номер отсчета; T – время дискретизации АЦП; $\delta[nT]$ – дельта-функция АЦП; $Z_{0I}[nT]$, $Z_{0Q}[nT]$, $Z_{1I}[nT]$, $Z_{1Q}[nT]$ – оцифрованные синфазные и квадратурные составляющие сигналы символов «0» и «1»; Σ – сумматор; \gtrless – устройство сравнения; $S^*[nT]$ – выходной сигнал.

Квадратурное разложение принимаемых сигналов $F^*(t)$ в $S^*[nT]$ позволяет получить значение мгновенной амплитуды $U[nT]$, частоты $f[nT]$ и фазы $\varphi[nT]$ сигнала согласно формулам

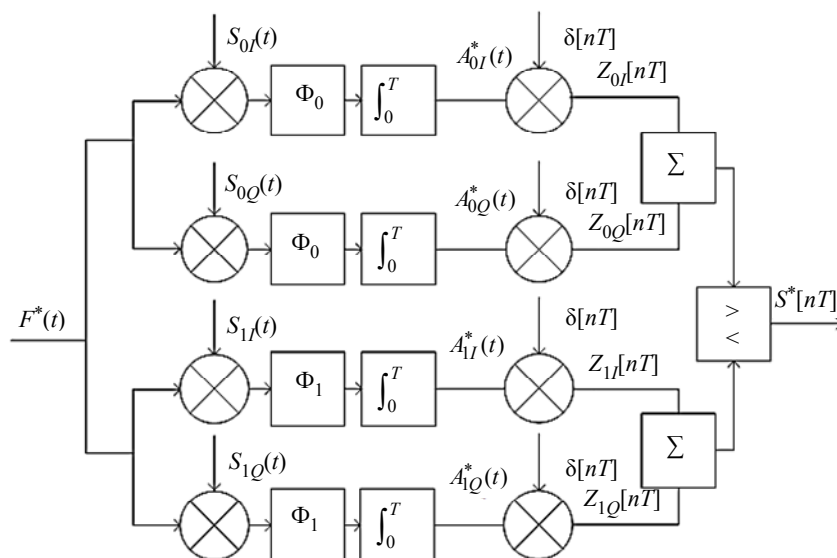


Рис. 1. Схема четырехканального некогерентного приемника
 Fig. 1. The scheme of a four-channel incoherent receiver

$$U[nT] = \sqrt{U_I^2[nT] + U_Q^2[nT]},$$

$$f[nT] = \frac{1}{\Delta T} \{ U_I[nT](U_Q[nT] - U_Q[(n-1)T]) - \\ - U_Q[nT](U_I[nT] - U_I[(n-1)T]) \} / (U_I^2[nT] + \\ + U_Q^2[nT]) = \frac{1}{\Delta T} \{ U_Q[nT]U_I[(n-1)T] - \\ - U_I[nT]U_Q[(n-1)T] \} / (U_I^2[nT] + U_Q^2[nT]),$$

$$\varphi[nT] = \arctg \frac{U_Q[nT]}{U_I[nT]} = \Delta T 2\pi f[nT] + \varphi[(n-1)T],$$

где $U_I[nT]$ и $U_Q[nT]$ – синфазная и квадратурная составляющие сигнала.

Моделирование процессов воздействий ВДФ на ТМИ и их влияния на достоверность при ЛИЭ ЛА предлагается проводить для:

- 1) определения методов и алгоритмов повышения достоверности ТМИ на этапе послесанной обработки в каждой конкретной ситуации;
- 2) оценки потенциальной эффективности методов и алгоритмов повышения достоверности ТМИ;
- 3) определения состояния радиолинии;
- 4) выбора параметров системы додетекторной регистрации сигналов;
- 5) отладки специального программно-математического обеспечения методов и алгоритмов компенсации помех и адаптивной фильтрации сигналов;
- 6) формирования базы данных по возможным воздействиям ВДФ и их последствиям при приеме ТМИ.

Спектральный анализ ситуации воздействий помех на сигнал позволяет принять решение о выборе метода повышения достоверности ТМИ. Полоса частот видеотракта приемного устройства Δf_v рассчитана исходя из максимальной информативности РТС и определяется для цифровых видов модуляции как $\Delta f_v = 1/t_{\text{сим}}$, где $t_{\text{сим}}$ – длительность символа. В связи с данным обстоятельством все спектральные составляющие, соответствующие условию $f \geq 1/t_{\text{сим}}$, где f – частота спектральной составляющей, для получения наибольшей эффективности повышения достоверности ТМИ необходимо подавить. Для реализации подавления такого типа в условиях с низкой эффективностью фильтров с фиксированными характеристиками и невозможностью точного определения параметров фильтрации возможна реализация фильтров с применением адаптивных алгоритмов на основе перестраиваемых весовых коэффициентов.

При моделировании процессов послесанной додетекторной обработки ТМИ необходима реализация моделей как используемых сигналов радиолинии ТМИ и возможного воздействия помех ВДФ, так и отлаживаемых устройств ЦОС с целью оценивания эффективности того или иного алгоритма обработки сигналов.

На рис. 2 представлена схема имитационного моделирования на ЭВМ процессов воздействий ВДФ на прием ТМИ и оценки влияния на достоверность при ЛИЭ ЛА, на рис. 3 – схема реализации модели процессов послесанной додетекторной обработки когерентной компенсацией помех.

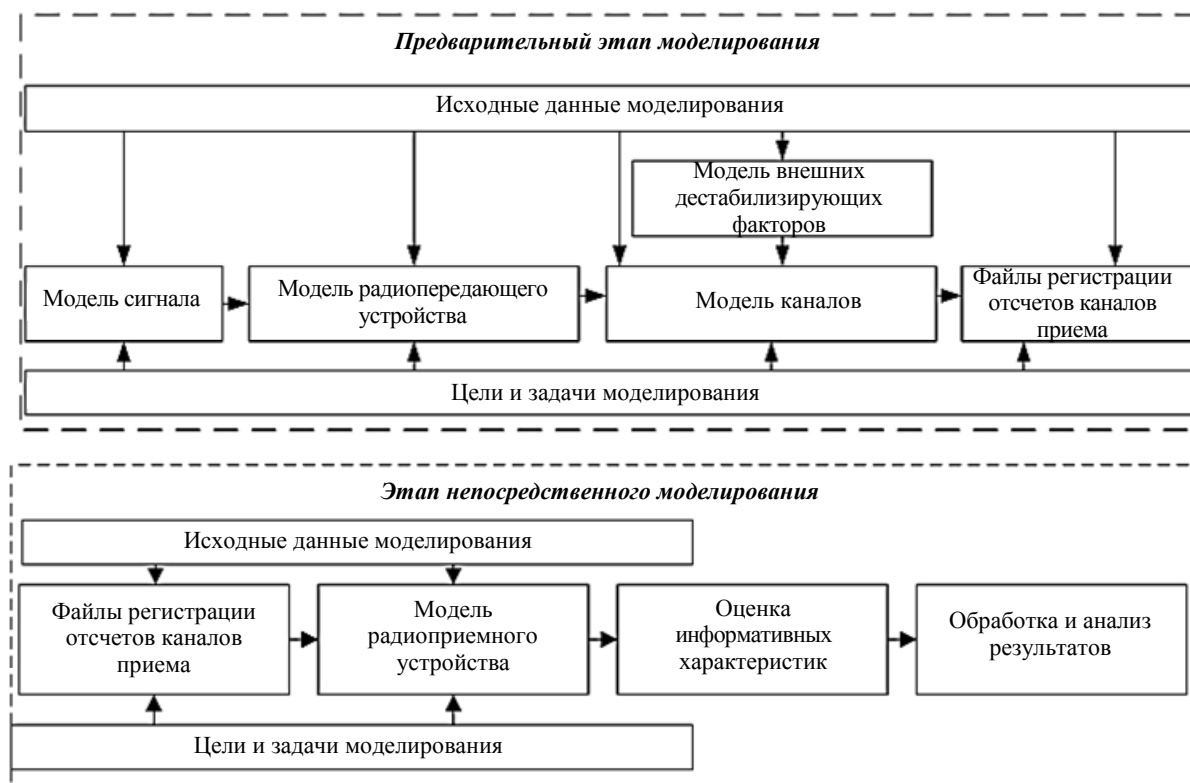


Рис. 2. Схема имитационного моделирования воздействий ВДФ на прием ТМИ при ЛИЭ ЛА и оценки влияния на достоверность ТМИ

Fig. 2. The scheme of simulation modeling of the effects of destabilizing factors on the reception of telemetry and assessment

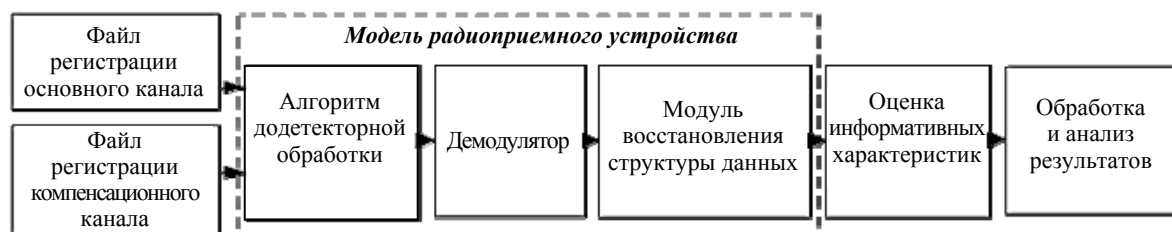


Рис. 3. Схема реализации модели процессов послесессионной додетекторной обработки когерентной компенсацией помех

Fig. 3. Implementation scheme of the process model of post-session pre-detector processing by coherent interference compensation

Предварительный этап моделирования заключается в генерации битовой последовательности моделируемой структуры сигналов, образования отсчетов сигнала на промежуточной частоте, моделирования прохождения сигнала в радиоканале под воздействием помех «немодулированная несущая», многочастотная, шумовая прицельная по частоте, а также регистрации в файл отсчетов канала приема. В зависимости от применяемых алгоритмов додетекторной обработки возможна регистрация в файлы отсчетов как основного, так и дополнительных каналов.

На этапе непосредственного моделирования обрабатываются файлы регистрации отсчетов основного и дополнительных каналов в модуле алгоритма додетекторной обработки, демодуля-

ция сигналов по полученным отсчетам, а также дальнейшее восстановление структуры данных. Далее проводится оценка информативных характеристик модели (расчет ОСШ и ОСП, ВОБ), их обработка и анализ полученных результатов.

На рис. 4 представлена схема алгоритма моделирования процессов воздействий ВДФ на прием ТМИ при ЛИЭ ЛА и оценки влияния на достоверность ТМИ. Рассмотрим алгоритм более подробно:

1. Подготовка исходных данных моделирования. Исходными данными для проведения моделирования служат характеристики сигнала, помехи и шума для регулировки ОСШ и ОСП, частоты сигнала и помехи, частота следования импульсов помех для имитации условий воздействий ВДФ,

параметры сигналов (информативность, количество каналов). Большое количество переменных факторов и интервалов их значений обусловлено необходимостью определения минимального количества имитационных экспериментов для сокращения временных и вычислительных затрат на моделирование на основе теории планирования эксперимента [10], [11].

2. Ввод исходных данных эксперимента моделирования для определенного набора значений факторов в соответствии с обоснованным планом эксперимента.

3. Запуск эксперимента моделирования.

4. Анализ визуальных отображений сигнала: оценка искажений формы и спектра сигнала, а также расчет характеристик (ОСШ и ОСП, ВОБ).

5. Регистрация результатов оценки для определенного набора значений факторов для дальнейшей статистической обработки.

6. Ввод очередного набора значений плана эксперимента и проведение следующего $(l + 1)$ -го эксперимента моделирования (переход в п. 2). При реализации минимального количества L имитационных экспериментов переход в п. 7.

7. Построение графиков зависимостей ВОБ от ОСШ и ОСП для смоделированных случаев.

8. Анализ результатов моделирования.

Имитационное моделирование процессов послесанной додетекторной обработки ТМИ в условиях воздействий ВДФ предполагает, что большинство ВДФ x_j во время функционирования ПРА во время проведения ЛИЭ ЛА являются случайными величинами, определяемыми своими законами распределения. Показатели качества функционирования служат функционалами от амплитуд сигналов, помех, шума, частот сигналов и помех, девиации частоты и фазы, информативности и др. Таким образом, согласно теории планирования эксперимента [10], [11]:

$$\hat{Y}_i = \hat{\phi}_i[W(x_1), W(x_2), \dots, W(x_j), \dots, W(x_r)], \quad (1)$$

где \wedge – символ случайной функции; x_j – случайная независимая переменная, характеризующая показатель достоверности ТМИ; $W(x_j)$ – плотность вероятности случайной величины x_j .

Плотность вероятности $W(x_j)$ характеризуется параметрами закона распределения $x_1, x_2, \dots, x_j, \dots, x_r$ – такими, как математическое ожидание

\bar{X}_j и дисперсия σ_j^2 случайной величины x_j и др., поэтому зависимость вида (1) можно заменить зависимостью вида

$$\hat{Y}_i = \hat{\phi}_i[x_{11}, x_{12}, \dots, x_{21}, \dots, x_{rk}]. \quad (2)$$

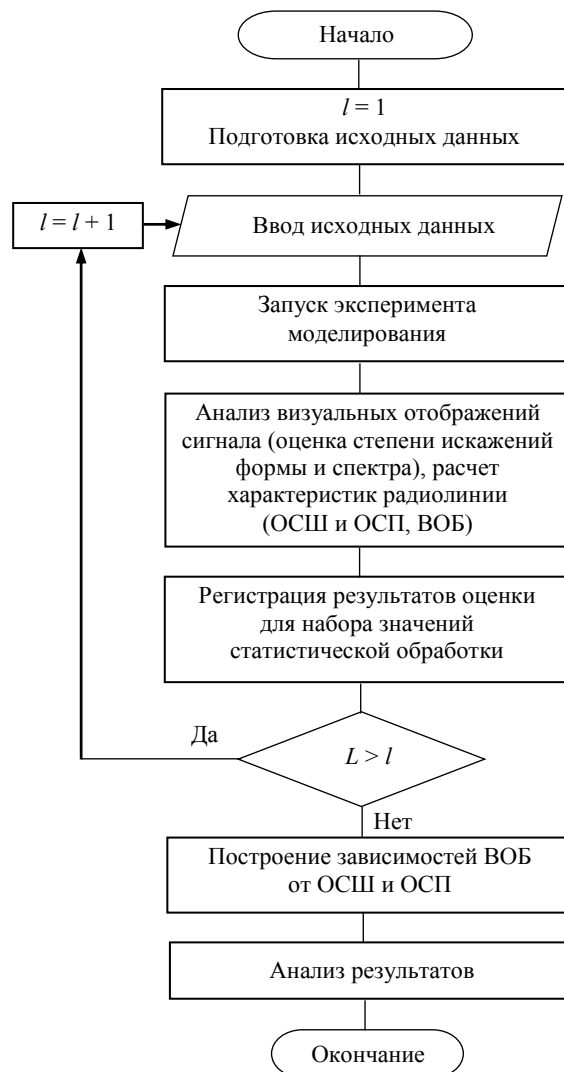


Рис. 4. Схема алгоритма моделирования воздействий ВДФ на прием ТМИ при ЛИЭ ЛА

Fig. 4. The scheme of the algorithm for modeling the effects of destabilizing factors on the reception of telemetry

Случайный характер отклика \hat{Y}_i обуславливается стохастическим характером зависимости $\hat{\phi}_i$. В имитационном моделировании отклик – это сложная функция от входных переменных и выражается явно только с помощью вычислительной программы. Зависимость $\hat{\phi}_i$ при моделировании формирует моделирующая программа, осуществляющая генерацию отсчетов сигналов, помех и шума с соответствующими законами распределения случайных величин, функциони-

рование алгоритма повышения достоверности ТМИ и накопление статистических данных, необходимых для вычисления величины \hat{Y}_i .

Анализ зависимости вида (2) опирается на методы регрессионного анализа. Сущность регрессионного анализа состоит в замене стохастической зависимости $\hat{\phi}_i$ между откликом \hat{Y}_i и переменными x_{11}, \dots, x_{rk} некоторой детерминированной зависимостью η , достаточно хорошо аппроксимирующей основные свойства исходной стохастической зависимости. В регрессионном анализе используется замена зависимости вида (2) оценкой математического ожидания \bar{X}_j случайной величины \hat{Y}_i :

$$E\{\hat{Y}_i(x_{11}, \dots, x_{rk})\} = \eta(x_{11}, \dots, x_{rk}) \quad [11].$$

Для построения выборочных экспериментальных кривых зависимостей показателей качества от независимых переменных применяются непрерывные гладкие функции, поэтому модели показателей качества $\chi(x_1, \dots, x_p)$ целесообразно искать в виде обобщенного полинома Колмогорова–Габор [11]:

$$\begin{aligned} \chi(x_1, \dots, x_p) = & Q_0 + \sum_{i=1}^p Q_i x_i + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p Q_{ij} x_i x_j + \\ & + \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p \sum_{k=1}^p Q_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \end{aligned}$$

где p – номер фактора.

В целях имитационного моделирования воздействий ВДФ на прием ТМИ при ЛИЭ ЛА необходимо определить коэффициенты уравнения регрессии для полного p -факторного планирования эксперимента. В случае двух факторов (ОСШ и ОСП) уравнение регрессии имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_{12} x_1 x_2 + b_{11} x_1^2 + b_{22} x_2^2,$$

где b_0 – свободный член; b_1, b_2, b_{12} – коэффициенты взаимодействия факторов; b_{11}, b_{22} – коэффициенты, отражающие влияние факторов.

Вопросы выбора оптимального плана эксперимента в данной статье не рассматриваются.

В специальном программно-математическом обеспечении (СПМО) информационно-управляющего комплекса испытательного стенда штатных и перспективных цифровых радиолоний [12] представлена модель воздействий на ТМИ ВДФ в

виде аддитивного белого гауссова шума (АБГШ). К основным задачам данного СПМО относятся визуальное представление моделей штатных и перспективных цифровых радиолоний, а также оценка качества радиоканала под воздействием АБГШ посредством симуляции передачи, приема и обработки радиосигнала и сравнения полученных статистик с теоретическими формулами. Конкретной радиолонии соответствуют различные схемы приемников и предлагаются на выбор пользователю для сравнения качества как между видами приемников, так и между видами модуляции.

Имитационная модель додетекторной обработки ТМИ структуры цифровых циклических сигналов в условиях воздействий ВДФ [13] предназначена для исследования методов и алгоритмов додетекторной обработки ТМИ структуры цифровых циклических сигналов в условиях воздействий ВДФ в среде визуального программирования GNU Radio Companion [14]–[16]. Данная модель может быть использована при моделировании условий передачи радиосигналов от БИТС в условиях воздействий помехи «немодулированная несущая», многочастотной помехи, шумовой прицельной по частоте помехи, а также для разработки методов и алгоритмов повышения достоверности ТМИ.

Результаты оценки воздействий ВДФ на прием ТМИ при ЛИЭ ЛА. Рассмотрим результаты оценки воздействий ВДФ на достоверность ТМИ при ЛИЭ ЛА, полученные при функционировании описанных ранее моделей. В рамках исследования проводилось имитационное моделирование воздействия АБГШ на радиолонии КИМ₂-ЧМ, КИМ₂-ФМ, GMSK, OQPSK в диапазоне ОСШ от –3 до 10 дБ, а также АБГШ и ВДФ в виде помех «немодулированная несущая», многочастотная и прицельная по частоте на сигнал для ОСШ 4, 7 и 10 дБ и ОСП диапазона от –3 до 4 дБ.

На рис. 5 представлены оценки зависимостей ВОБ от ОСШ при воздействии АБГШ на радиолонии КИМ₂-ЧМ, КИМ₂-ФМ, GMSK, OQPSK, полученные в СПМО [13].

Анализ результатов моделирования позволяет сделать вывод о том, что теоретические данные [16] и разработанные имитационные модели [12], [13] соответствуют друг другу, поэтому можно считать дальнейший анализ в части расчета энергетических (ОСШ и ОСП) и вероятностных (ВОБ) характеристик радиолоний, проведенных на основе этих моделей, теоретически обоснованным.

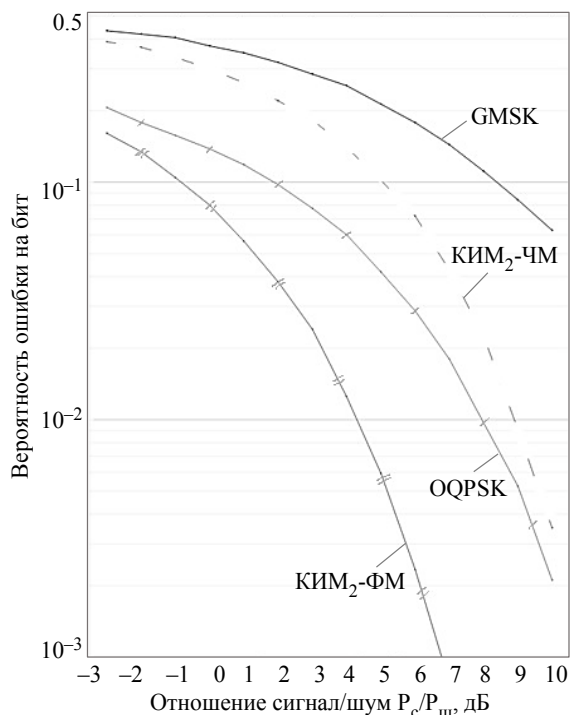


Рис. 5. Графики зависимостей ВОБ от ОСШ моделируемых радиолиний
 Fig. 5. Graphs of the dependence of the BER on the SNR of the simulated radio lines

На рис. 6 представлены графики спектрально-го анализа смоделированных ситуаций условий воздействий ВДФ на сигнал вида модуляции КИМ₂-ЧМ для ОСШ 4 дБ и ОСП 1 дБ: *а* – воздействие шума, *б* – воздействие помехи «немодулированная несущая», *в* – воздействие многочастотной помехи, *г* – воздействие шумовой прицельной по частоте помехи. На рис. 7 показаны

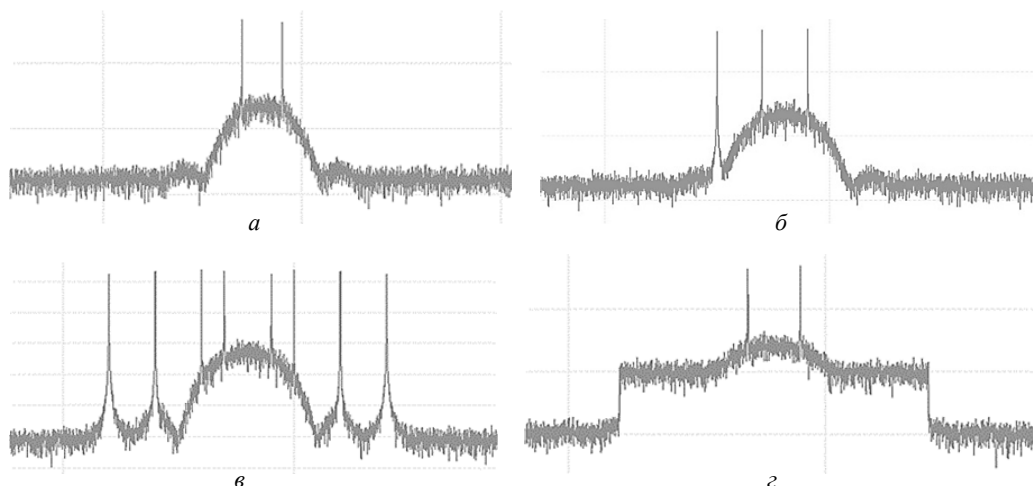


Рис. 6. Графики спектрального анализа воздействий помех на сигнал типовой структуры:
а – шум; *б* – помеха «немодулированная несущая»; *в* – многочастотная помеха;
г – шумовая прицельная по частоте помеха

Fig. 6. Graphs of spectral analysis of interferences effects on a typical structure signal:
a – noise; *b* – «unmodulated carrier» interference; *c* – multi-frequency interference;
d – frequency-targeted noise interference

результатирующие графики зависимостей воздействий помех смоделированных ситуаций, где $I_{ПНН}$ – помеха «немодулированная несущая», $I_{МП}$ – многочастотная помеха, $I_{ПЧП}$ – шумовая прицельная по частоте помеха.

Проанализировав графики зависимостей на рис. 7, делаем вывод о наиболее дестабилизирующем эффекте воздействия на сигнал вида модуляции КИМ₂-ЧМ при ОСП в диапазоне от –3 до 4 дБ шумовой прицельной по частоте помехи для всех рассматриваемых ОСШ.

По результатам расчетов зависимостей для рассматриваемых случаев получены уравнения регрессии полного двухфакторного эксперимента:

– для воздействия помехи «немодулированная несущая»:

$$y = 0.346 - 0.0095x_1 - 0.2283x_2 - 0.0095x_1x_2 + 0.0155x_1^2 - 0.0795x_2^2; \quad (4)$$

– для воздействия многочастотной помехи:

$$y = 0.28025 - 0.001173x_1 - 0.20875x_2 - 0.014625x_1x_2 + 0.00806x_1^2 - 0.030883x_2^2; \quad (5)$$

– для воздействия шумовой прицельной по частоте помехи:

$$y = 0.37 - 0.00749x_1 - 0.205x_2 - 0.01125x_1x_2 + 0.0225x_1^2 - 0.11x_2^2, \quad (6)$$

где x_1 и x_2 – нормированные значения ОСШ и ОСП соответственно.

На рис. 8 представлен сравнительный анализ полученных линий регрессии и графиков зависи-

мостей, построенных по результатам моделирования: штриховыми линиями (2) показаны зависимости ВОБ от ОСШ и ОСП рис. 7, сплошными (1) – линии регрессии, построенные по уравнени-

ям регрессии (4)–(6). Из рисунка видно, что линии регрессии совпадают с графиками зависимостей, поэтому считаем полученные регрессионные зависимости адекватными.

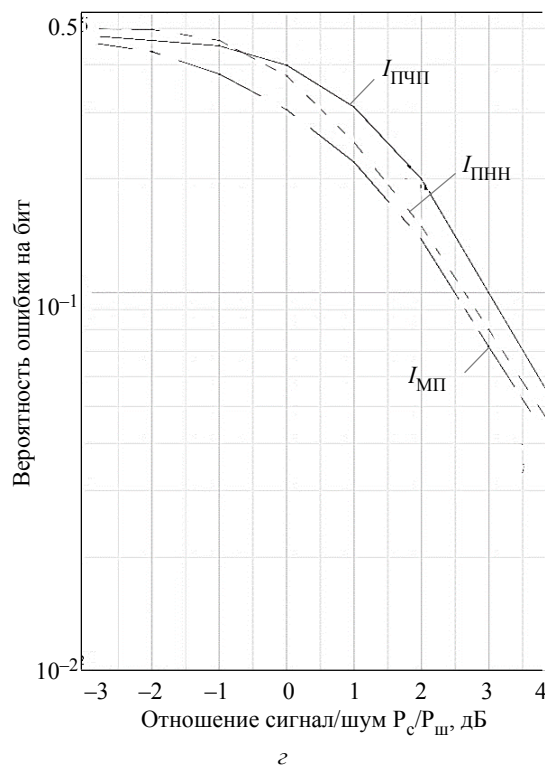
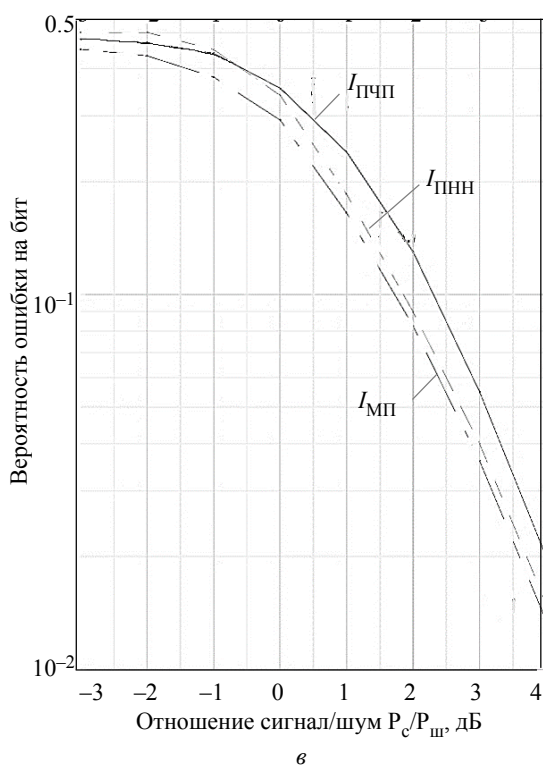
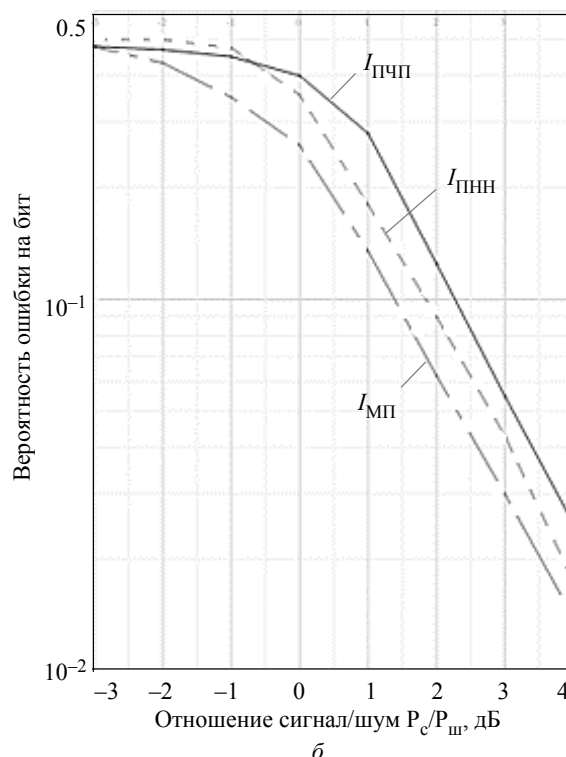
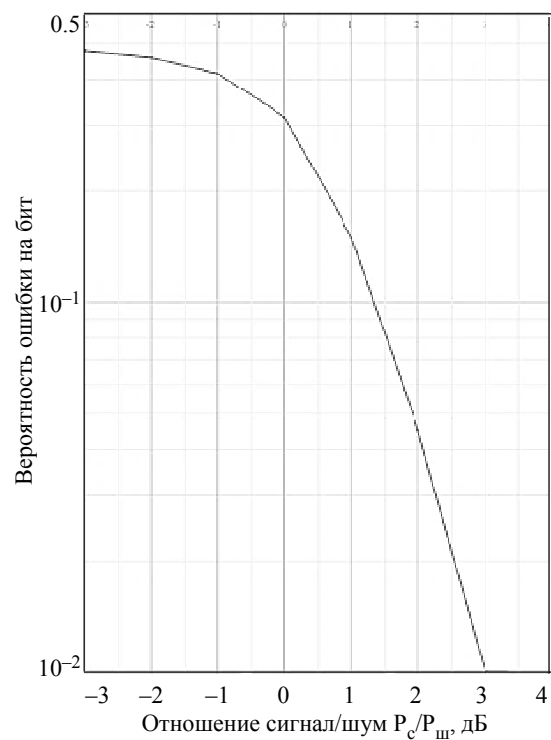


Рис. 7. Графики зависимостей воздействий помех на сигнал типовой структуры:
a – ВОБ от ОСШ для АБГШ; *б* – ВОБ от ОСП для ОСШ 10 дБ;
в – ВОБ от ОСП для ОСШ 7 дБ; *г* – ВОБ от ОСП для ОСШ 4 дБ

Fig. 7. Graphs of the effects of interferences on the signal of a typical structure:
a – BER on the SNR for the AWGN; *б* – BER on the SIR for the SNR of 10 dB;
в – BER on the SIR for the SNR of 7 dB; *г* – BER on the SIR for the SNR of 4 dB

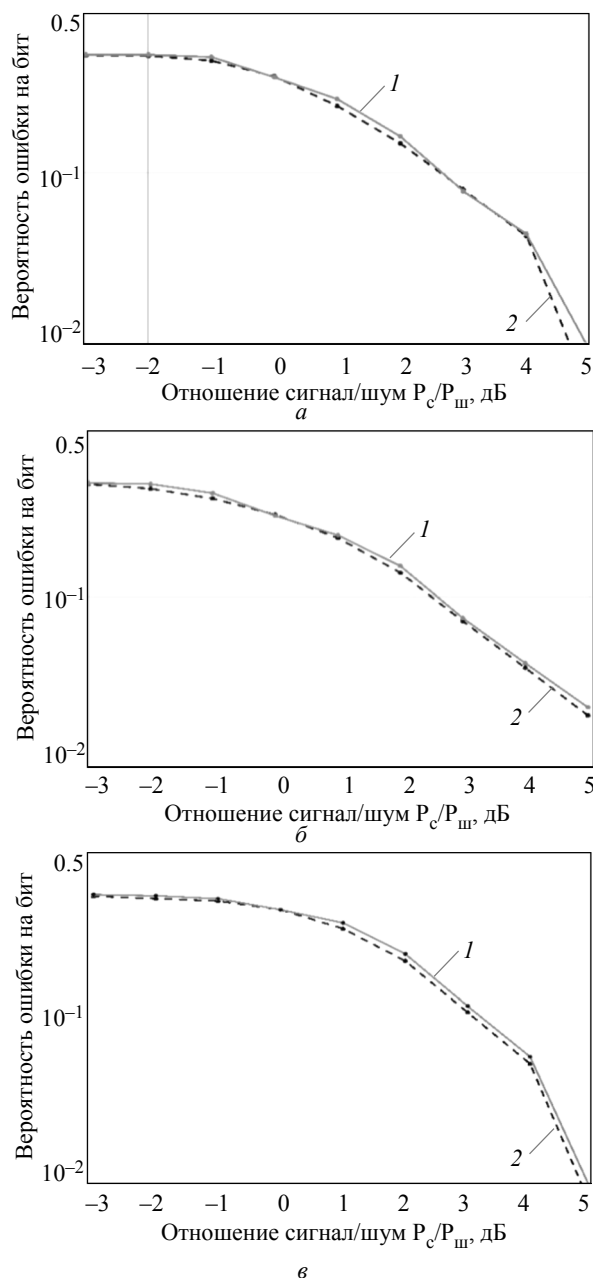


Рис. 8. Графики сравнительного анализа линий регрессии и зависимостей ВОБ к ОСШ и ОСП, полученных в результате моделирования воздействий помех на сигнал типовой структуры:
 а – воздействие помехи «немодулированная несущая»;
 б – воздействие многочастотной помехи;
 в – воздействие шумовой прицельной по частоте помехи
 Fig. 8. Graphs of the regression lines and the dependences of the BER on the SIR and SNR of the signal of a typical structure:
 а – «unmodulated carrier» interference;
 б – multi-frequency interference; в – frequency-targeted noise interference

Из анализа зависимостей, представленных на рис. 7, можно сделать вывод о наиболее негативном влиянии на достоверность ТМИ вида модуляции КИМ₂-ЧМ многочастотной помехи и наименее негативном влиянии помехи «немодулированная несущая».

Результаты имитационного моделирования предлагается использовать в качестве исходных для оценки эффективности разрабатываемых методов послесансной додетекторной обработки ТМИ для вида модуляции КИМ₂-ЧМ. В дальнейшем на основе представленных моделей [12], [13], а также их модификаций для реализации других видов модуляций, и полученных по результатам имитационного моделирования зависимостей, необходимо осуществлять выбор методов и соответствующих им средств адаптивной фильтрации и/или когерентной компенсации помех для повышения достоверности ТМИ в режиме послесансной обработки [2].

Заключение. В статье представлены результаты разработки модели оценки воздействий ВДФ на достоверность ТМИ при ЛИЭ ЛА: приведены модели оценки воздействий ВДФ на достоверность ТМИ в сложных условиях помеховой обстановки на основе имитационного моделирования на ЭВМ; показаны результаты оценок воздействий на достоверность ТМИ ВДФ вида АБГШ на радиолинии КИМ₂-ЧМ, КИМ₂-ФМ, GMSK, OQPSK и помех «немодулированная несущая», многочастотная, шумовая прицельная по частоте на радиолинию КИМ₂-ЧМ; указано применение теории планирования эксперимента и получения оценок достоверности ТМИ в виде регрессионной зависимости. Полученные результаты моделирования показывают сходство с графиками ОСШ к ВОБ, основанными на теоретических расчетах [17], и позволяют сделать вывод об их теоретической обоснованности. Графики могут служить в качестве исходных для оценки эффективности разрабатываемых методов послесансной додетекторной обработки ТМИ. На основе представленных моделей [12], [13] и полученных по результатам имитационного моделирования зависимостей необходимо осуществлять выбор методов и соответствующих им средств адаптивной фильтрации и/или когерентной компенсации помех для повышения достоверности ТМИ в режиме послесансной обработки.

Список литературы

1. Воронцов В. Л., Давыдов И. А. Научно-технические и организационно-технические аспекты управления развитием отечественных систем ин-

формационно-телеметрического обеспечения обработки средств выведения // Информация и космос. 2024. № 4. С. 170–181.

2. Бянкин А. А., Борненко Н. П. Преддетекторная обработка телеметрической информации в условиях воздействий дестабилизирующих факторов // Информатика и космос. 2024. № 4. С. 6–15.
3. Воронцов В. Л. Методы разнесенного приема телеметрической информации и условия их применения в процессе развития телеметрического комплекса космодрома. Набережные Челны: ИПЦ КГИЭА, 2009. 286 с.
4. Анненков А. М. Модель радиоканала с частотной модуляцией и непрерывной фазой // Журн. радиоэлектроники. 2011. № 7. С. 1–17.
5. Агеев Ф. И., Вознюк В. В. Методика расчета вероятности битовой ошибки оптимального посимвольного когерентного приема двоичных противоположных фазоманипулированных сигналов при наличии в канале радиосвязи узкополосной шумовой помехи // Тр. МАИ. 2022. № 124. С. 1–32. doi: 10.34759/trd-2022-124-15.
6. Куликов Г. В., Нестеров А. В., Лелюх А. А. Помехоустойчивость приема сигналов с квадратурной амплитудной манипуляцией в присутствии гармонической помехи // Журн. радиоэлектроники. 2018. № 11. С. 1–13. doi: 10.30898/1684-1719.2018.11.9.
7. Куликов Г. В., Нгуен Ван Зунг. Анализ помехоустойчивости приема сигналов с многопозиционной фазовой манипуляцией при воздействии сканирующей помехи // Российский технологический журн. 2018. Т. 6. № 6. С. 5–12. doi: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12.
8. Recommended standard CCSDS 401.0-B-32 Radio frequency and modulation systems. Part 1: Earth stations and spacecraft. Washington, DC, USA: CCSDS Secretariat, National Aeronautics and Space Administration, 2021. 322 с.
9. Матвеев А. М., Конищев В. С. Современные способы борьбы с помехами в радиоэлектронных системах ракетно-космической техники // Военная мысль. 2021. № 4. С. 101–105.
10. Таблицы планов эксперимента для факторных и полиномиальных моделей: справ. изд. / В. З. Бродский, Л. И. Бродский, Т. И. Голикова и др.; под ред. В. В. Нахимова. М.: Металлургия, 1982. 752 с.
11. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. М.: Наука, 1971. 312 с.
12. Свид. о рег. пр-мы для ЭВМ № 2024616654 РФ. Специальное программно-математическое обеспечение информационно-управляющего комплекса испытательного стенда штатных и перспективных цифровых радиолоний / Н. П. Борненко, А. Е. Зеляк. Заявл. 06.03.2024; опуб. 22.03.2024.
13. Свид. о рег. пр-мы для ЭВМ № 2025660402 РФ. Имитационная модель додетекторной обработки телеметрической информации структуры цифровых циклических групповых телеметрических сигналов в условиях воздействий дестабилизирующих факторов / Н. П. Борненко, Б. Р. Погорелов. Заявл. 12.02.2025; опуб. 23.04.2025.
14. Разработка каналов связи с цифровой модуляцией в GNU Radio / Ю. А. Полевода, А. Е. Троицкая, Г. А. Бурень, Э. А. Рядинская, Г. В. Коняшкин // Вопр. электромеханики. Тр. ВНИИЭМ. 2022. Т. 189, № 4. С. 41–48.
15. Липатников В. С. Моделирование устройств цифровой обработки сигналов с помощью программного инструмента GNU Radio // 17-я междунар. конф. «Цифровая обработка сигналов и ее применение – DSPA-2015». Т. 2. М.: РНТОРЭС им. А. С. Попова, 2015. С. 641–645.
16. Blossom Eric. GNU Radio: Tools for exploring the radio frequency spectrum // Linux J. 2018. 110 р.
17. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

Информация об авторах

Борненко Никита Петрович – адъюнкт, Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (ФГБВОУ ВО) Минобороны России, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: n.p.bor.94@mail.ru

Бянкин Александр Александрович – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации. Почетный работник высшего профессионального образования РФ. Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (ФГБВОУ ВО) Минобороны России, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: aab51@mail.ru

Погорелов Богдан Романович – инженер кафедры телеметрических систем, комплексной обработки и защиты информации. Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского (ФГБВОУ ВО) Минобороны России, ул. Ждановская, 13, Санкт-Петербург, 197198, Россия.
E-mail: pogorelovbr@gmail.com

Полунин Андрей Михайлович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, зам. начальника отдела. НИЦ «ЦНИИ Воздушно-космических сил» Минобороны России, ул. М. К. Тихонравова, 29, Московская обл., г. Королев, 141091, Россия.
E-mail: polunin61@mail.ru

Вклад авторов:

Борненко Н. П. – написание текста статьи, проведение имитационных экспериментов.

Бянкин А. А. – общее руководство, написание текста статьи.

Погорелов Б. Р. – разработка имитационной модели на языке Python.

Полунин А. М. – обзор литературы, общее руководство.

References

1. Voroncov V. L., Davydov I. A. Nauchno-tehnicheskie i organizacionno-tehnicheskie aspekty upravlenija razvitiem otechestvennyh sistem informacionno-telemetricheskogo obespechenija otrabotki sredstv vyvedenija // Informacija i kosmos. 2024. № 4. S. 170–181. (In Russ.).
2. Bjankin A. A., Bornenko N. P. Preddetektornaja obrabotka telemetricheskoy informacii v uslovijah vozdeystvij destabilizirujushhih faktorov // Informacija i kosmos. 2024. № 4. S. 6–15. (In Russ.).
3. Voroncov V. L. Metody raznesennogo priema telemetricheskoy informacii i uslovija ih primenenija v processe razvitiya telemetricheskogo kompleksa kosmodroma. Naberezhnye Chelny: IPC KGIJeA, 2009. 286 s. (In Russ.).
4. Annenkov A. M. Model' radiokanala s chastotnoj moduljaciej i nepreryvnoj fazoj // Zhurn. radioelektroniki. 2011. № 7. S. 1–17. (In Russ.).
5. Ageev F. I., Voznjuk V. V. Metodika rascheta verojatnosti bitovoj oshibki optimal'nogo posimvol'nogo kogerentnogo priema dvoichnyh protivopolozhnyh fazomanipulirovannyh signalov pri nalichii v kanale radio-svjazi uzkopolosnoj shumovoj pomehi // Tr. MAI. 2022. № 124. S. 1–32. doi: 10.34759/trd-2022-124-15. (In Russ.).
6. Kulikov G. V., Nesterov A. V., Leljuh A. A. Pomeho-ustojchivost' priema signalov s kvadraturnoj amplitudnoj manipuljaciej v prisutstvii garmonicheskoy pomehi // Zhurn. radioelektroniki. 2018. № 11. S. 1–13. doi: 10.30898/1684-1719.2018.11.9. (In Russ.).
7. Kulikov G. V., Nguen Van Zung. Analiz pomeho-ustojchivosti priema signalov s mnogopozicionnoj fazovoj manipuljaciej pri vozdeystvii skanirujushhej pomehi // Rossijskij tehnologicheskij zhurn. 2018. T. 6. № 6. S. 5–12. doi: 10.32362/2500-316X-2018-6-6-5-12. (In Russ.).
8. Recommended standard CCSDS 401.0-B-32 Radio frequency and modulation systems. Part 1: Earth stations and spacecraft. Washington, DC, USA: CCSDS Secretariat, National Aeronautics and Space Administration, 2021. 322 s.
9. Matveev A. M., Konishhev V. S. Sovremennye sposoby bor'by s pomehami v radioelektronnyh sistemah raketno-kosmicheskoy tehniki // Voennaja mysl'. 2021. № 4. S. 101–105. (In Russ.).
10. Tablicy planov jeksperimenta dlja faktornyh i polinomial'nyh modelej: sprav. izd. / V. Z. Brodskij, L. I. Brodskij, T. I. Golikova i dr.; pod red. V. V. Nalimova. M.: Metallurgija, 1982. 752 s. (In Russ.).
11. Fedorov V. V. Teorija optimal'nogo jeksperimenta. M.: Nauka, 1971. 312 s. (In Russ.).
12. Svid. o reg. pr-my dlja JeVM № 2024616654 RF. Special'noe programmno-matematicheskoe obespechenie informacionno-upravljajushhego kompleksa ispytatel'nogo stenda shtatnyh i perspektivnyh cifrovych radio-linij / N. P. Bornenko, A. E. Zeljak. Zajavl. 06.03.2024; opub. 22.03.2024. (In Russ.).
13. Svid. o reg. pr-my dlja JeVM № 2025660402 RF. Imitacionnaja model' dodektornoj obrabotki telemetricheskoy informacii struktury cifrovych ciklicheskih grupovyh telemetricheskich signalov v uslovijah vozdeystvij destabilizirujushhih faktorov / N. P. Bornenko, B. R. Pogorelov. Zajavl. 12.02.2025; opub. 23.04.2025. (In Russ.).
14. Razrabotka kanalov svjazi s cifrovoy moduljaciej v GNU Radio / Ju. A. Polevoda, A. E. Troickaja, G. A. Buren', Je. A. Rjadinskaja, G. V. Konjashkin // Vopr. jelektromehaniki. Tr. VNIJeM. 2022. T. 189, № 4. S. 41–48. (In Russ.).
15. Lipatnikov V. S. Modelirovanie ustrojstv cifrovoy obrabotki signalov s pomoshh'ju programmnoho instrumenta GNU Radio // 17-ja mezhdunar. konf. «Cifrovaja obrabotka signalov i ee primenenie – DSPA-2015». T. 2. M.: RNTORJeS im. A. S. Popova, 2015. S. 641–645. (In Russ.).
16. Blossom Eric. GNU Radio: Tools for exploring the radio frequency spectrum // Linux J. 2018. 110 p.
17. Skljär B. Cifrovaja svjaz'. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primenenie. M.: Izdat. dom «Vil'jams», 2003. 1104 s. (In Russ.).

Information about the authors

Nikita P. Bornenko – Adjunct, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Zhdanovskaya St., 13, Saint Petersburg, 197198, Russia.
E-mail: n.p.bor.94@mail.ru

Alexander A. Byankin – Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Professor, Department of telemetric systems, complex processing information. Honorary Worker of Higher Professional Education in the Russian Federation. Mozhaisky Military Aerospace Academy, Zhdanovskaya St., 13, Saint Petersburg, 197198, Russia.
E-mail: aab51@mail.ru

Bogdan R. Pogorelov – Engineer at the Department of telemetric systems, complex processing information, Mozhaisky Military Aerospace Academy, Zhdanovskaya St., 13, Saint Petersburg, 197198, Russia.

E-mail: pogorelovbr@gmail.com

Andrey M. Polunin – Cand. Sci. (Eng.), Senior Researcher, Deputy Chief of Department, Scientific Research Center «Central Scientific Research Institute of Aerospace Forces», M. K. Tikhonravova St., 29, Moscow region, Korolev, 141091, Russia.

E-mail: polunin61@mail.ru

Author contribution statement:

Bornenko N. P. – writing the article, conducting experiments.

Byankin A. A. – general management, writing the article.

Pogorelov B. R. – developing an imitation model on Python.

Polunin A. M. – literature review, general management.

Статья поступила в редакцию 28.07.2025; принята к публикации после рецензирования 15.10.2025; опубликована онлайн 30.12.2025.

Submitted 28.07.2025; accepted 15.10.2025; published online 30.12.2025.
