


На правах рукописи



Писака Павел Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ПРИЕМНЫХ СТАНЦИЙ
В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ
О СОСТОЯНИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

Специальность:

05.12.04 – «Радиотехника, в том числе системы и устройства телевидения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Рязань 2018

Работа выполнена на кафедре «Радиоуправление и связь»
ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет»

- Научный руководитель – **Кириллов Сергей Николаевич**,
Заслуженный работник высшей школы РФ,
Почетный работник ВПО РФ,
Почетный радист РФ,
Доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «РГРТУ», заведующий кафедрой
«Радиоуправление и связь»
- Официальные оппоненты – **Мухин Иван Ефимович**,
Доктор технических наук,
старший научный сотрудник,
АО «Авиаавтоматика» имени В.В. Тарасова»,
главный конструктор специальных проектов
- **Дуников Артем Сергеевич**,
Кандидат технических наук,
ФГБОУ ВО «Военно-космическая академия
имени А.Ф. Можайского»
Министерства обороны РФ,
преподаватель кафедры телеметрических систем,
комплексной обработки и защиты информации
- Ведущая организация – **АО «Научно-производственное объединение
измерительной техники»**,
г. Королев Московской области

Защита состоится 21 сентября 2018 г. в 12.00 на заседании диссертационного совета Д 212.211.04 в ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д. 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» и на официальном сайте университета www.rsreu.ru.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: 390005, г. Рязань, ул. Гагарина, д.59/1.

Автореферат разослан ____ июля 2018 г.

Ученый секретарь диссертационного
совета Д 212.211.04
доктор технических наук, доцент



Г.В. Овечкин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Современная телеметрия затрагивает рассмотрение таких вопросов как формирование, передача, прием, регистрация, обработка и анализ радиосигналов, полученных от удаленных объектов. Одной из сфер применения средств телеметрии является ракетно-космическая техника (РКТ). Радиосигналы телеметрической информации (ТМИ), сформированные аппаратурой, установленной на борту объекта, используются для анализа состояния изделий РКТ на всех этапах жизненного цикла, включая летные испытания. Целью летных испытаний является подтверждение заявленных тактико-технических характеристик изделий РКТ, а также определение степени готовности для организации серийного производства. При передаче радиосигналов ТМИ от бортовой аппаратуры изделия РКТ к антеннам приемных станций (ПС), в канале передачи информации присутствуют различные мешающие факторы в виде помех и шумов естественного и искусственного происхождения, влияние которых может привести к искажению принятых радиосигналов ТМИ. Отсюда, для достоверной оценки состояния изделий РКТ в процессе летных испытаний особую актуальность приобретает разработка и обоснование алгоритмов обработки принятых радиосигналов ТМИ с целью повышения качества и объема информации.

Степень разработанности темы исследования. Повысить качество принятой ТМИ возможно посредством использования устройств приема и обработки радиосигналов от изделий РКТ, разработанных с учетом результатов синтеза телеметрических радиосигналов, наличия сведений о виде модуляции, моделей мешающих факторов в частности, и каналов передачи информации в общем. Кроме того, повышение показателей качества принятой ТМИ может достигаться за счет применения различных видов помехоустойчивого кодирования к радиосигналам на передающей стороне с соответствующим снижением кодовой скорости. Значительный вклад в развитие данных вопросов внесли такие отечественные ученые как М.И. Тепляков, А.П. Мановцев, Р.Р. Васильев, Е.С. Губенко, Е.Я. Богуславский, М.С. Рязанский, Б.Е. Черток, В.А. Котельников, И.С. Гоноровский, Д.Д. Кловский, Л.С. Гуткин, И.Н. Амиантов, И.А. Большаков и др., а также ряд зарубежных ученых, среди которых К. Шеннон, А. Витерби, С. Голдман, Е. Зайдлер, Г. Ван Трис и др.

В известных работах рассмотрены основные методы борьбы с помехами в каналах передачи информации, а также подходы к построению систем передачи информации. В качестве моделей радиосигналов анализировались в основном радиосигналы с релейскими флуктуациями амплитуд. При этом в канале передачи радиосигнал подвергался воздействию аддитивного белого гауссовского шума (АБГШ). Результирующий радиосигнал поступал на антенну ПС. Повышение качества принятого радиосигнала осуществлялось за счет построения оптимальных алгоритмов обработки на фоне данного вида помех. Рассмотрены основные подходы к организации помехоустойчивых радиотелеметрических систем передачи информации. Предложенные алгоритмы выделения радиосигнала на фоне помех показали свою эффективность в соответствующих услови-

ях. Однако, в известных работах рассмотрены, в основном, случаи одноканальных систем, для которых прием информации от объекта осуществлялся только одной антенной ПС. Таким образом, применение предложенных алгоритмов обработки радиосигналов на фоне помех в целях повышения качества имеет ряд особенностей, определяющихся в основном конечной зоной радиовидимости антенн ПС. В ряде работ рассмотрены вопросы организации многоканального приема радиосигналов с учетом наличия в канале передачи информации АБГШ. Однако эти алгоритмы выделения радиосигнала на фоне шума разработаны при условии присутствия в единицу времени радиосигнала в зоне радиовидимости только одной антенны ПС.

Исходя из вышеизложенного, актуальным представляется рассмотрение вопросов разработки статистической модели радиосигналов ТМИ изделий РКТ с учетом взаимных связей территориально-распределенных ПС и построения многоканальных систем, осуществляющих одновременный прием и обработку радиосигналов ТМИ с целью повышения качества и объема достоверной информации о состоянии изделий РКТ.

Цели и задачи. Основной целью диссертационной работы является повышение качества результатов обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых на территориально-распределенные ПС в процессе проведения летных испытаний изделий РКТ для увеличения объема достоверной информации о состоянии объектов на протяжении трассы полета.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1 Провести анализ одновременно принятых радиосигналов ТМИ, полученных по результатам проведения летных испытаний изделий РКТ с целью разработки статистической модели радиосигналов системы передачи ТМИ от территориально-распределенных ПС.

2 Разработать и обосновать статистическую модель одновременно принятых радиосигналов системы передачи ТМИ изделий РКТ от территориально-распределенных ПС.

3 Разработать и обосновать, а также провести анализ и сравнение алгоритмов совместной обработки радиосигналов ТМИ одновременно принятых от территориально-распределенных ПС.

4 Рассмотреть практические аспекты использования алгоритмов совместной обработки радиосигналов ТМИ одновременно принятых от территориально-распределенных ПС.

5 Разработать процедуру монтажа единого носителя (МЕН) ТМИ от территориально-распределенных ПС.

Научная новизна. В рамках диссертационной работы были получены следующие новые научные результаты:

1 Обоснована статистическая модель радиосигналов системы передачи ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС, построенная с учетом анализа натурной информации, полученной по результатам серии летных испытаний изделий РКТ в виде двухкомпонентного гамма-

распределения. Доказано соответствие предложенной модели экспериментальных данным с применением критериев согласия.

2 Показана целесообразность использования алгоритма совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации.

3 Предложен алгоритм выделения кадра из потока зарегистрированной ТМИ от территориально-распределенных ПС, обеспечивающий существенное увеличение объема информации для дальнейшей обработки.

4 Обоснован алгоритм взаимной привязки файлов ТМИ от территориально-распределенных ПС, обеспечивающий определение блоков ТМИ, содержащих идентичную информацию.

5 Предложена процедура монтажа единого носителя (МЕН) ТМИ от территориально-распределенных ПС, обеспечивающая увеличение объема достоверной информации для оценки состояния изделий РКТ. Проанализированы и обоснованы этапы процедуры.

Теоретическая и практическая значимость работы. Предложенные в диссертационной работе алгоритмы совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС, могут быть использованы при построении многоканальных распределенных систем передачи, приема и обработки информации в целях увеличения качества и объема результатов обработки.

Результаты диссертационной работы были использованы в разработках филиала АО «РКЦ «Прогресс» - ОКБ «Спектр» г. Рязань (в комплексе АКОНТ «Лагуна» и системе АЭС ТМИ), а также в учебном процессе ФГБОУ ВО «Рязанский государственный радиотехнический университет» г. Рязань, что подтверждается соответствующими актами внедрения.

Получены заключения Межрегионального совета по науке и технологиям о признании результатов, содержащихся в печатных работах в качестве основы для подготовки и последующей защиты диссертации на соискание ученой степени кандидата наук, что подтверждается соответствующими заключениями.

Методология и методы исследования. В работе использовались методы статистической радиотехники, математической статистики, вычислительной математики. Теоретические методы применялись в совокупности с экспериментальными исследованиями по приему и регистрации радиосигналов ТМИ.

Положения, выносимые на защиту:

1 Статистическая модель реальных радиосигналов системы передачи ТМИ изделий РКТ одновременно принятых от территориально-распределенных ПС в виде двухкомпонентного гамма-распределения, обоснованная по критериям согласия А.В. Колмогорова и χ^2 для уровня значимости $\alpha = 0,01$.

2 Реализуемый алгоритм совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации, позволяющий обеспечить достижение на протяжении трассы полета изделия РКТ средней вероятности

правильного обнаружения радиосигнала ТМИ $\bar{P}_0 = 0,956$ для вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$, при снижении значения средней вероятности правильного обнаружения на $\Delta = 0,5$ % относительно алгоритма совместной частотной обработки некогерентных радиосигналов ТМИ.

3 Процедура монтажа единого носителя ТМИ от территориально-распределенных ПС на основе реализации алгоритма совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации, обеспечивающая увеличение объема достоверной информации для оценки состояния изделий РКТ в среднем на 33,8 % (с 51,6 % до 85,4 %).

Степень достоверности и апробации результатов. Достоверность результатов диссертационной работы обосновывается посредством сравнения с известными положениями теории обнаружения радиосигналов, а также посредством анализа результатов обработки натурной ТМИ, полученной по результатам серии летных испытаний изделий РКТ с применением предложенных алгоритмов.

Результаты исследований, приведенные в диссертационной работе, докладывались на следующих конференциях:

XVIII, XIX, XX, XXI, XXII ВНТК «Новые информационные технологии в научных исследованиях и в образовании», Рязань, 2013-2017; XI, XII ВК «Новые технологии», Миасс, 2014, 2015; XXXXIV ВС «Механика и процессы управления», Миасс, 2014.; XXXIV, XXXVII ВК «Наука и технологии», Миасс, 2015, 2017; V ВНТК с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники «V Козловские чтения», Самара, 2017; 7-я МНТК «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика, Радиоэлектроника. Геоинформатика», Рязань, 2017; МНТФ «Современные технологии в науке и образовании СТНО-2018», Рязань, 2018.

Личный вклад автора. Личный вклад автора состоит в проведении анализа радиосигналов натурной ТМИ с целью построения статистической модели радиосигналов системы передачи ТМИ одновременно принятых от территориально-распределенных ПС, обосновании алгоритмов совместной обработки радиосигналов ТМИ, реализации алгоритма совместной обработки радиосигналов ТМИ одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации в процедуре МЕН ТМИ, внедрении процедуры МЕН ТМИ в комплекс АКОТ «Лагуна» и систему АЭС ТМИ, что подтверждено соответствующим актом.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 19 работ: 3 статьи в научно-технических журналах, рекомендованных ВАК РФ, 2 статьи в сборниках докладов Международных конференций, 1 статья в сборнике трудов Международного форума, 1 статья в сборнике трудов Всероссийского симпозиума, 4 статьи в сборниках трудов Всероссийских конференций, 6 тезисов в сборниках докладов Всероссийских конференций, 2 статьи в межвузовских сборниках научных трудов.

Структура диссертационной работы. Диссертационная работа содержит три главы, введение, заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы из 101 наименования и два приложения. Общий объем работы составляет 200 страниц, в том числе 149 страниц основного текста, 39 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе обоснована статистическая модель радиосигналов системы передачи ТМИ изделий РКТ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС. В процессе проведения натурного эксперимента осуществлялся прием ТМИ на территориально-распределенные ПС, расположенные на протяжении трассы полета изделия РКТ. Летные испытания серии изделий РКТ проходили на одной и той же территории, по одной и той же схеме испытаний. Схема проведения летных испытаний изделий РКТ представлена на рисунке 1.

В соответствии с рисунком 1, изделие РКТ осуществляет полет по заранее определенной траектории. Радиопередатчик производит передачу ЧМн группового телеметрического радиосигнала $S(t)$, содержащего кадры ТМИ для бортовой системы телеметрических измерений (БСТИ) типа «Радиотелеметрическая система».

В канале передачи на телеметрический радиосигнал $S(t)$ могут оказывать воздействие различные мешающие факторы, что приводит к искажению его структуры. Отсюда радиосигнал $S(t)$ принимает вид $X(t)$. Прием радиосигнала $X(t)$ осуществляется $m = 5$ территориально-распределенными ПС. Таким образом, на антенну каждой i -ой, $i = 1, \dots, m$ ПС поступает результирующий радиосигнал $X_i(t)$, представляющий собой смесь радиосигнала $S(t)$, а также помех и шумов в зоне радиовидимости антенны i -ой, $i = 1, \dots, m$, ПС.

Проведен анализ качества радиосигнала – среднего отношения сигнал-шум (ОСШ) \bar{q} на каждой i -ой, $i = 1, \dots, m$ ПС. Типичная зависимость изменения ОСШ на дискретных участках трассы полета РКТ nT представлена на рисунке 2.

В соответствии с рисунком 2, по мере приближения области радиовиди-

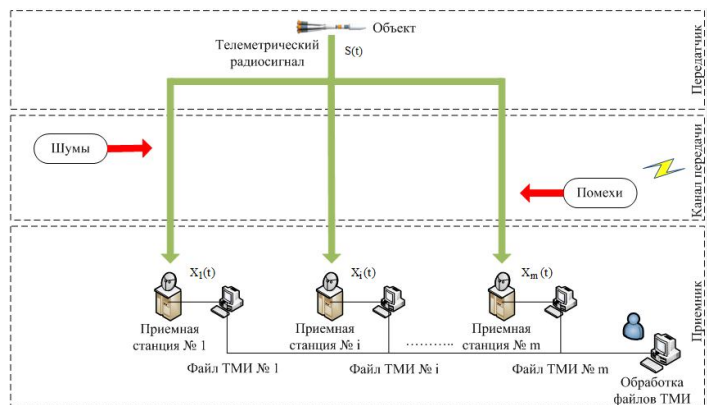


Рисунок 1 – Схема проведения летных испытаний изделий РКТ

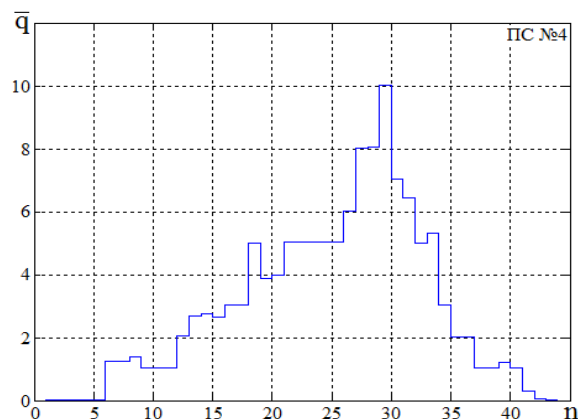


Рисунок 2 – Типичная зависимость изменения отношения сигнал-шум \bar{q}

мости антенны передатчика изделия РКТ в процессе полета к области радиовидимости антенны i -ой, $i=1, \dots, m$, ПС наблюдается значительное увеличение ОСШ \bar{q}_i . После пролета изделия РКТ над i -ой, $i=1, \dots, m$, ПС значение ОСШ \bar{q}_i вновь уменьшается.

Определение функции плотности вероятности (ФПВ) $f(x)$ значений ОСШ $x = \bar{q}$ осуществлялось с помощью плоскости Пирсона. С этой целью использовались результаты натурального эксперимента, полученные в разное время года, в разное время суток и при различных погодных условиях. По результатам расчета параметров распределения β_1 и β_2 показано, что гистограммы распределения значений ОСШ $x = \bar{q}$, полученных по данным ПС сосредоточены в области гамма-распределения.

Для обоснования статистической модели радиосигнала системы передачи ТМИ проанализированы взаимные корреляционные связи радиосигналов, полученных на различных ПС, и сделаны вывод о наличии между ними корреляционных связей в пределах $(0,18; 0,79)$. Для учета корреляционных связей между дискретными значениями ОСШ \bar{q} , полученными на различных ПС, ФПВ $f(x)$ представлена как смесь распределений $W_1(x)$ и $W_2(x)$ с независимыми и дружными флуктуациями амплитуд радиосигнала соответственно. Для этого, на дискретных участках трассы полета изделия РКТ выделены участки с коэффициентами корреляции $K_{ij} \geq 0,5$ и $K_{ij} < 0,5$, $i=1, \dots, m$, $j=1, \dots, m$. На этих участках для ПС с независимыми и дружными флуктуациями амплитуд радиосигнала определялась ФПВ $f(x)$ в виде двухкомпонентного распределения

$$f(x) = (1 - \kappa)W_1(x) + \kappa W_2(x), \quad \kappa \in [0,1], \quad (1)$$

где κ – среднее значение коэффициента корреляции между радиосигналами от ПС.

В случае приведенной на рисунке 2 зависимости изменения ОСШ $x = \bar{q}$, при среднем значении коэффициента корреляции $\kappa = 0,6370$ компоненты $W_1(x)$ и $W_2(x)$ двухкомпонентного гамма-распределения будут иметь вид

$$W_1(x) = \frac{0,212x^{0,33}}{\Gamma(1,33)} e^{-0,312x}, \quad W_2(x) = \frac{0,119x^{1,7}}{\Gamma(2,7)} e^{-0,455x}. \quad (2)$$

Вид ФПВ $f(x)$ двухкомпонентного гамма-распределения для формул (2) представлен на рисунке 3.

Проверка соответствия ФПВ $f(x)$ значений ОСШ $x = \bar{q}$ экспериментальным распределениям проведена с применением критериев согласия А.В. Колмогорова и χ^2 . С использованием натурной ТМИ доказано соответствие ФПВ $f(x)$ экспериментальным данным для областей независимых и дружных флуктуаций амплитуд радиосигнала при уровне значимости $\alpha = 0,01$.

Во второй главе проведены разработка, обоснование и сравнение алгоритмов совместной частотной и временной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых на несколько территориально-распределенных ПС на основе разработанной и обоснованной статистической модели радиосигнала системы передачи ТМИ. С использованием радиосигналов ТМИ, полученных по результатам натурального эксперимента показано, что применение предложенных алгоритмов совместной частотной обработки когерентных радиосигналов ТМИ, совместной частотной обработки некогерентных радиосигналов ТМИ, совместной временной обработки некогерентных радиосигналов ТМИ обеспечивает достижение средней вероятности правильного обнаружения радиосигнала ТМИ \bar{P}_0 от 0,961 до 0,983 на дискретных участках трассы полета изделия РКТ nГ при вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$. Однако практическая реализация данных алгоритмов затруднительна, прежде всего, ввиду невозможности точной оценки фаз радиосигналов ТМИ, одновременно принятых на несколько ПС, а также точного времени приема радиосигналов ТМИ на ПС. Кроме того, проведенный в первой главе натуральный эксперимент не предусматривал обработки радиосигналов ТМИ «в чистом виде». Изменение схемы проведения летных испытаний изделий РКТ затруднительна ввиду значительных финансовых затрат на модернизацию инфраструктуры стартовых позиций и ПС.

С учетом указанных особенностей разработан и обоснован алгоритм совместной обработки радиосигналов ТМИ L_5 , одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации (алгоритм L_5). Структурная схема алгоритма L_5 представлена на рисунке 4.

В соответствии с рисунком 4, на каждую i -ую, $i = 1, \dots, m$, ПС поступает радиосигнал $X_i(t)$, $i = 1, \dots, m$, представляющий собой сумму радиосигнала ТМИ $S(t)$ и шумов. После операции согласованной фильтрации $СФ_i$ и детектирования $Д_i$ производится сравне-

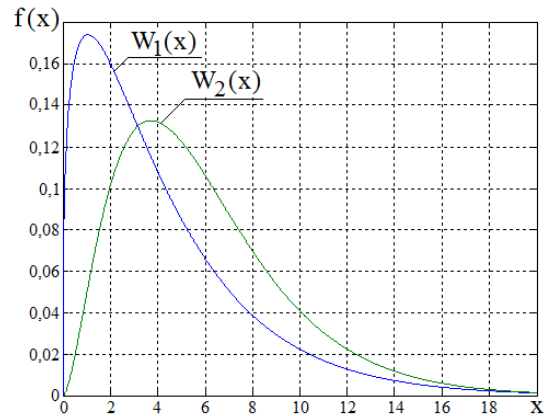


Рисунок 3 – ФПВ значений ОСШ $x = \bar{q}$

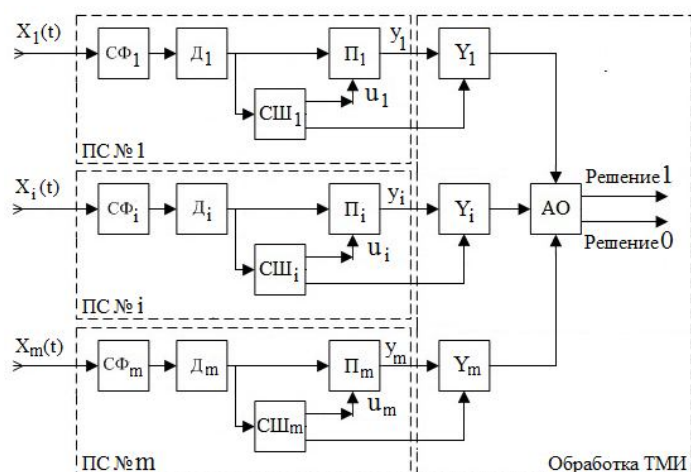


Рисунок 4 – Структурная схема алгоритма L_5

ние с порогом Π_i u_i , $i = 1, \dots, m$. Если превышение порога произошло, то в файле ТМИ фиксируется значение бита $y_i = 1$, $i = 1, \dots, m$. Если превышения порога не произошло, в файле ТМИ фиксируется значение бита $y_i = 0$, $i = 1, \dots, m$. Кроме того, на каждой i -ой, $i = 1, \dots, m$, ПС после операции детектирования осуществляется операция определения отношения сигнал-шум $CШ_i$. Полученное значение используется для установления порога u_i , $i = 1, \dots, m$, а также для осуществления операции расчета адаптивных множителей (АМ) Y_i .

Согласно предложенному алгоритму производится обработка множества битов $\{y_1, y_2, \dots, y_m\}$, $i = 1, \dots, m$. Алгоритм L_5 оптимален по критерию Неймана-Пирсона и представляется в виде

$$L_5 = \sum_{i=1}^m Y_i y_i \begin{matrix} \geq \\ < \end{matrix} z_0, \quad (3)$$

где $Y_i = \ln[P_{5oi}(1 - P_{5лти})(1 - P_{5oi})^{-1}P_{5лти}^{-1}]$ – АМ; P_{5oi} – вероятность правильного определения бита на i -ой, $i = 1, \dots, m$, ПС; $P_{5лти}$ – вероятность ложной тревоги на i -ой, $i = 1, \dots, m$, ПС; z_0 – порог обнаружения.

Отсюда алгоритм L_5 заключается в суммировании значений битов $y_i = 1$ либо $y_i = 0$, $i = 1, \dots, m$, с определенными согласно выражению (3) АМ Y_i . При этом вероятность правильного обнаружения бита ТМИ P_{5oi} для i -ой, $i = 1, \dots, m$ ПС вычисляется на основании вероятности ложной тревоги $P_{5лти}$ для областей независимых и дружных флуктуаций амплитуд радиосигнала как

$$P_{5oi} = (1 - \kappa)P_{5лти}^{(1 + \bar{q}_i)^{-1}} + \kappa \exp\left[-\frac{u_i}{2}(1 + \bar{q}_i)^{-1}\right]. \quad (4)$$

По результатам вычисления характеристической функции величины L_5 показано, что вероятность P превышения радиосигналом ТМИ порога обнаружения z_0 можно представить в виде

$$P = \sum_{k=h}^m \sum_{i_1=1}^{m-k+1} \sum_{i_2=i_1+1}^{m-k+2} \dots \sum_{i_k=i_{k-1}+1}^m P_{i_1} P_{i_2} \dots P_{i_k} \prod_{j=1, j \neq i_1, i_2, \dots, i_k}^m (1 - P_j), \quad h = 1, \dots, m. \quad (5)$$

На основании значений вероятности ложной тревоги $P_{лти}$ и вероятности правильного обнаружения бита ТМИ P_{oi} , на i -ой, $i = 1, \dots, m$ ПС можно вычислить значения вероятности ложной тревоги $P_{5лт}$ и вероятности правильного обнаружения бита ТМИ P_{5o} для алгоритма L_5 при заданном значения порога обнаружения z_0 .

Экспериментальные исследования по определению вероятности правильного обнаружения бита ТМИ P_{5o} для алгоритма L_5 выполнены с использованием радиосигналов натурной ТМИ. Зависимости изменения вероятности правильного обнаружения бита ТМИ P_{5o} на дискретных участках трассы полета

nT при вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$ для правил «1 из 5» и «2 из 5» с учетом АМ и последовательно от одной ПС, в зоне радиовидимости антенны которой в текущий момент времени находится изделие РКТ в процессе полета представлены на рисунке 5.

Таким образом, использование предложенного алгоритма L_5 , заданного правилом «2 из 5» с учетом АМ позволяет обеспечить прирост средней вероятности правильного обнаружения бита ТМИ \bar{P}_0 на 3,3 % (с 0,923 до 0,956) по сравнению с использованием информации последовательно от одной ПС. Кроме того, предложенный алгоритм L_5 , заданный правилом «2 из 5» с учетом АМ существенно повышает вероятность правильного обнаружения бита ТМИ P_{50} на тех участках, когда изделие РКТ в процессе полета выходит из зоны радиовидимости антенны одной ПС, и входит в зону радиовидимости антенны последующей ПС на $\Delta P_{50} \approx 10 - 14$ %.

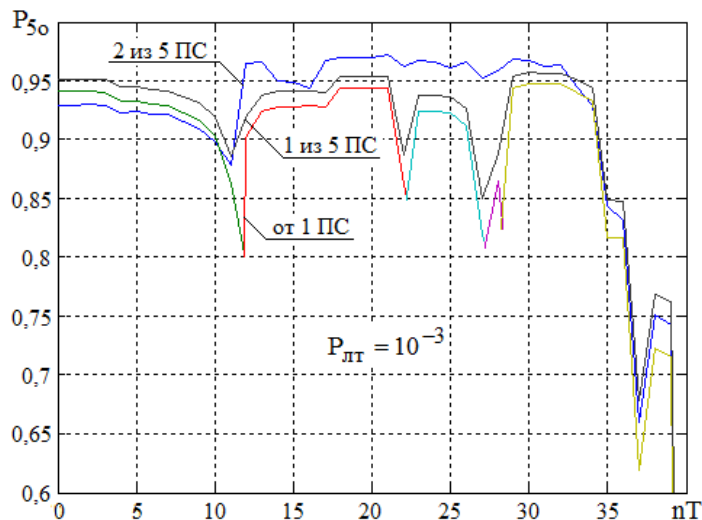


Рисунок 5 – Зависимости изменения вероятности P_{50} алгоритма L_5

В третьей главе в интересах реализации алгоритма L_5 предложена процедура монтажа единого носителя (МЕН) ТМИ. Структурная схема процедуры МЕН ТМИ представлена на рисунке 6.

В соответствии с рисунком 6, процедура МЕН ТМИ состоит из следующих действий: 1) Выделение кадров ТМИ из потока зарегистрированной ТМИ 2) Взаимная привязка файлов ТМИ 3) Совместная обработка ТМИ 4) Просмотр параметров БСТИ.

Каждый файл ТМИ f_i , $i = 1, \dots, m$ поступает на вход блока «Выделение кадров ТМИ», в котором осуществляется выделение кадров ТМИ из потока зарегистрированной ТМИ. Обычно, кадры ТМИ определяются по критерию соответствия комбинации разрядов маркерного слова

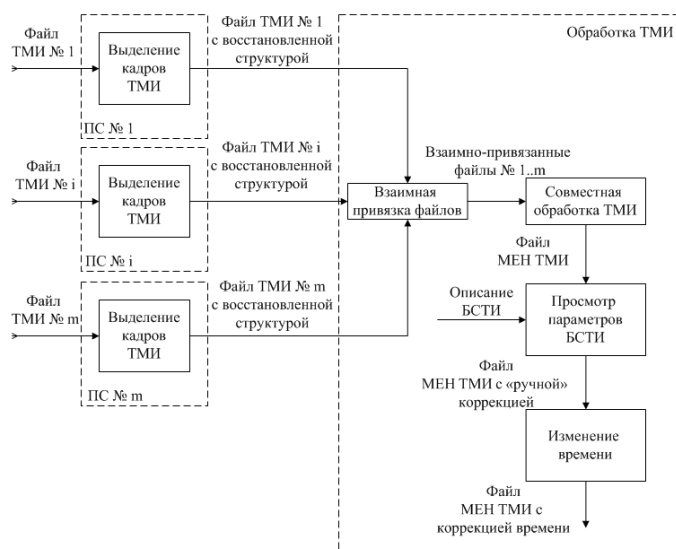


Рисунок 6 – Структурная схема процедуры МЕН ТМИ

определяются по критерию соответствия комбинации разрядов маркерного слова

определенному значению. Показано, что искажение маркерного слова приводит к отсеиванию большого объема кадров ТМИ от дальнейшей обработки (обычно до 10 % кадров). С учетом указанной особенности предложен алгоритм выделения кадров, согласно которому отличие значения разрядов слова от комбинации разрядов маркерного слова на один i -ый разряд, можно не считать потерей маркерного слова. При этом, устранить ошибку в таком i -ом разряде возможно на последующих этапах процедуры МЕН ТМИ. В рамках предложенного алгоритма для последовательности из r_k кадров получены значения вероятностей потери маркерного слова P_{Π} и появления ложного маркерного слова $P_{\text{Л}}$ в виде

$$P_{\Pi} = 1 - (1 - \rho)^{r_k n - 1} [1 + \rho(r_k n - 1)]. \quad (6)$$

$$P_{\text{Л}} = \frac{1}{2^{r_k n} - 1} \frac{N - 1}{N} [r_k n + 1 - (1 - \rho)^{r_k n - 1} (1 + \rho(r_k n - 1))]. \quad (7)$$

где ρ – вероятность ошибки в одном разряде слова; n – число разрядов слова; N – число слов кадра.

Зависимости изменения вероятности потери маркерного слова P_{Π} и вероятность появления ложного маркерного слова $P_{\text{Л}}$ от количества анализируемых кадров r_k и вероятности ошибки в одном разряде слова $\rho = 0,01$ для существующего и предложенного алгоритмов представлены на рисунке 7.

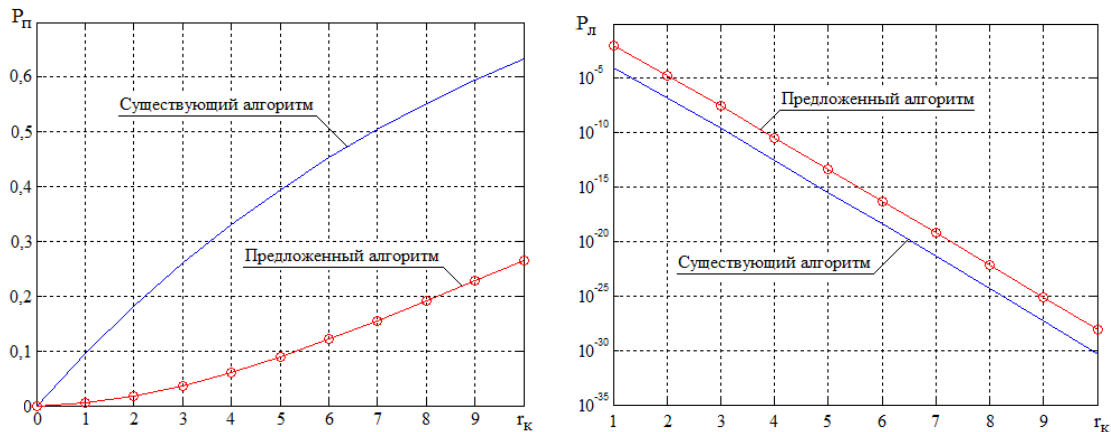


Рисунок 7 – Зависимости изменения вероятностей P_{Π} и $P_{\text{Л}}$ для алгоритмов выделения кадров ТМИ

В практике обработки ТМИ определение правильности структуры кадров осуществляется для $r_k = 3$. В соответствие с рисунком 7 для $r_k = 3$ вероятность P_{Π} уменьшается на 22 % (с 0,26 до 0,04). При этом вероятность появления ложного маркерного слова $P_{\text{Л}}$ увеличивается на $2,76 \cdot 10^{-8}$ (с $2,4 \cdot 10^{-10}$ до $2,79 \cdot 10^{-8}$). С использованием радиосигналов натурной ТМИ показано, что применение предложенного алгоритма выделения кадров из потока зарегистрированной ТМИ обеспечивает увеличение объема кадров ТМИ для дальнейшей обработки в среднем на 9,4 %.

Далее файлы ТМИ f_i , $i = 1, \dots, m$ поступают на вход блока «Взаимная привязка файлов ТМИ», в котором подвергаются совместной операции взаимной привязки, с целью коррекции станционного времени таким образом, чтобы блоки ТМИ из разных файлов, имеющие одно и тоже значение станционного времени, содержали одну и ту же переданную по каналу передачи радиосигналов ТМИ на ПС информацию. Показано что предложенный алгоритм взаимной привязки файлов ТМИ позволяет обеспечить выборку до 99,9 % кадров ТМИ из разных файлов, имеющих информацию, сформированную в одинаковые отсчеты времени.

На вход блока «Совместная обработка ТМИ» поступает множество файлов ТМИ $F = \{f_i\}$, $i = 1, \dots, m$ прошедших предыдущие этапы процедуры МЕН ТМИ. При этом файл ТМИ f_i можно представить как множество кадров $f_i = \{C_j^i, s_j\}$, $j = 1, \dots, K$, где C_j^i – j -ый кадр ТМИ, s_j – время формирования j -ого кадра ТМИ, K – количество кадров ТМИ в файле. Каждый кадр ТМИ C_j^i задается как $C_j^i = \{w_k^{ij}\}$, $k = 1, \dots, N$, где w_k^{ij} – k -ое слово j -ого кадра i -го файла ТМИ.

По результатам применения к множеству $F = \{f_i\}$, $i = 1, \dots, m$ алгоритма L_5 , формируется результирующий файл МЕН ТМИ с максимально возможными, в рамках используемого алгоритма L_5 , показателями качества. При этом, проведение процедуры МЕН ТМИ обеспечит устранение ошибок в отдельных каналах (словах) кадра ТМИ, включая маркерные слова за счет совместной обработки «выравненных» кадров файлов ТМИ.

Структурная схема предлагаемого алгоритма совместной обработки ТМИ представлена на рисунке 8.

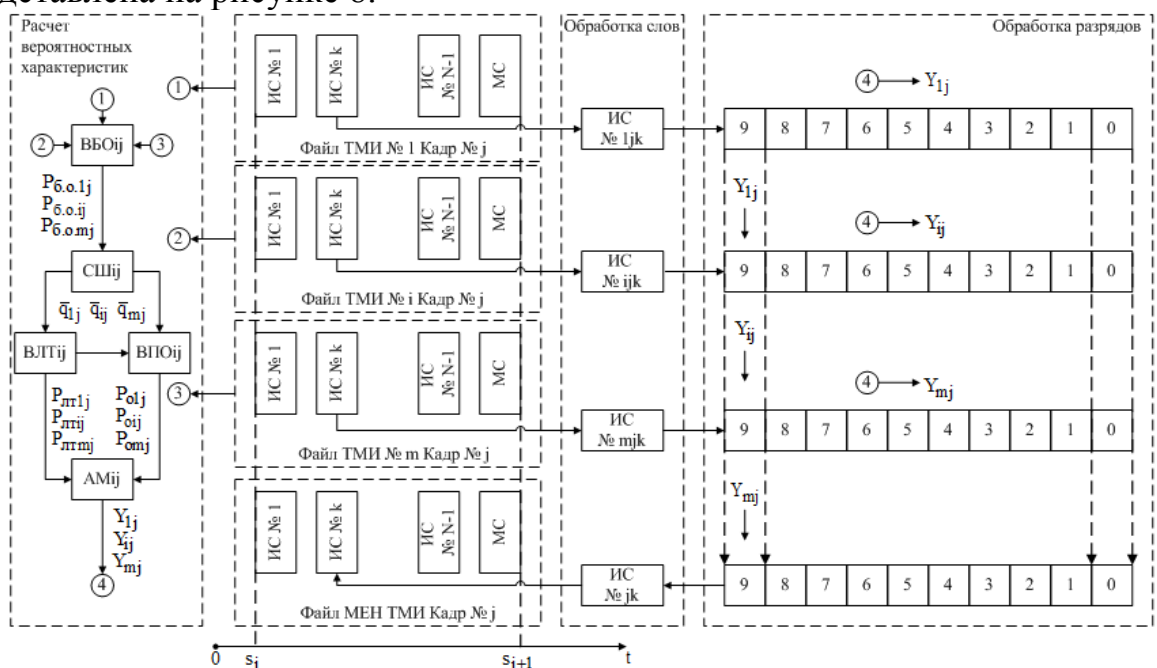


Рисунок 8 – Структурная схема совместной обработки МЕН ТМИ

Алгоритм совместной обработки ТМИ состоит из следующих этапов:

1 В каждом i -ом, $i = 1, \dots, m$ файле ТМИ f_i выбирается j -ый кадр C_j^i . Кадры C_j^i , $i = 1, \dots, m$ сформированы БСТИ изделия РКТ в идентичном дискретном отсчете времени s_j .

2 В блоке ВБО_{ij} для кадров ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ в рассчитывается частота битовой ошибки $P_{б.о.ij}$.

3 В блоке СШ_{ij} для кадров ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ рассчитывается среднее ОСШ \bar{q}_{ij} , $i = 1, \dots, m$ на входе i -ой, $i = 1, \dots, m$ ПС.

4 В блоке ВЛТ_{ij} для кадров ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ рассчитывается вероятность ложной тревоги $P_{лтij}$, $i = 1, \dots, m$, (причем $P_{лтi1j} = P_{лтi2j}$, $i1 = 1, \dots, m$, $i2 = 1, \dots, m$, $i1 \neq i2$) на основании заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$ исходя из выражения (5).

5 В блоке ВПО_{ij} для кадров ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ рассчитывается вероятность правильного определения значения бита $P_{оij}$, $i = 1, \dots, m$ на i -ой $i = 1, \dots, m$ ПС с использованием выражения (4).

6 В блоке АМ_{ij} для кадров ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ рассчитывается значение АМ Y_{ij} , $i = 1, \dots, m$, определяющее вклад в алгоритм обработки бита ТМИ, i -ой, $i = 1, \dots, m$, ПС согласно выражению (3).

7 В кадре ТМИ C_j^i , $i = 1, \dots, m$ выбирается информационное ИС или маркерное МС слово w_k^{ij} , $i = 1, \dots, m$, $k = 1, \dots, N$.

8 Для соответствующих разрядов слов w_k^{ij} , $i = 1, \dots, m$, $k = 1, \dots, N$ кадров C_j^i , $i = 1, \dots, m$ файлов ТМИ с соответствующими АМ Y_{ij} , $i = 1, \dots, m$ осуществляется совместная обработка, в виде решающего правила «2 из 5» с учетом АМ Y_{ij} .

9 В результате применения к разрядам слов решающего правила «2 из 5» с учетом АМ Y_{ij} формируется результирующее слово w_k^j , $k = 1, \dots, N$, которое помещается в k -ый, $k = 1, \dots, N$ канал кадра C_j файла МЕН ТМИ.

Анализ результатов использования процедуры МЕН ТМИ, проведенный с использованием радиосигналов ТМИ, полученных по результатам натурального эксперимента. Зависимости изменения во времени поведения телеметрируемых параметров (ТП) кадров, выделенных из файлов ТМИ, зарегистрированных од-

новременно на нескольких ПС, а также результирующего файла МЕН ТМИ, полученного по результатам процедуры МЕН ТМИ представлены на рисунке 9.

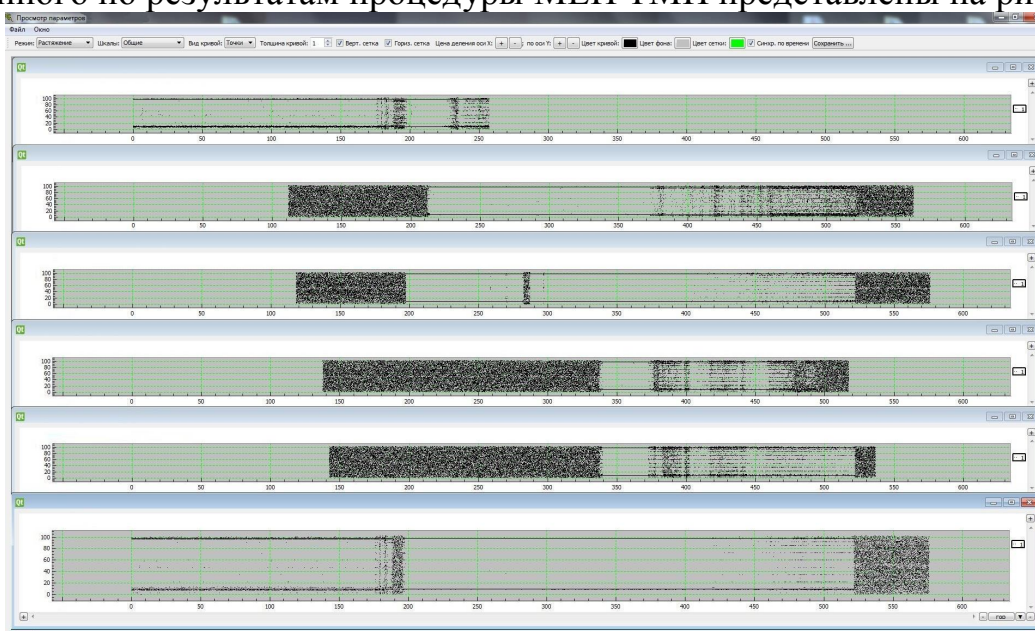


Рисунок 9 – Результаты использования процедуры МЕН ТМИ

В соответствии с рисунком 9, на первых 4-х графиках представлены зависимости изменения поведения ТП канала кадра ТМИ, полученные из файлов ТМИ f_i , $i = 1, \dots, m$, а на последнем – из файла МЕН ТМИ. Характер участков с низким качеством соответствует удаленности изделия РКТ от зон радиовидимости антенн ПС по мере передвижения изделия РКТ по трассе полета. Использование процедуры МЕН ТМИ, позволяет достичь достоверных результатов за счет устранения ошибки в соответствующих каналах кадра. Анализ показателей качества в виде объема достоверной информации на основании зависимости изменения поведения ТП, полученного из файлов ТМИ f_i , $i = 1, \dots, m$ от ПС, а также файла МЕН ТМИ приведен в таблице 1.

Анализ таблицы 1 показывает, что применение к сигналам ТМИ, одновременно принятым несколькими ПС и зарегистрированным в виде файлов ТМИ предложенной процедуры МЕН ТМИ позволяет повысить объем достоверной информации радиосигнала ТП в среднем на 33,8 % (с 51,6 % до 85,4 %).

Таблица 1 – Анализ результатов МЕН ТМИ

Источник информации	Объем достоверной информации сигнала ТП на i -ой $i = 1, \dots, m$ ПС, %					
	1	2	3	4	5	МЕН ТМИ
Файлы ТМИ	78	54	71	20	35	-
Участок в файле МЕН ТМИ	79	87	86	87	88	87
в том числе из сбойных кадров	1	3	3	3	3	3

Кроме того, в файле МЕН ТМИ 3 % достоверной информации получено из

кадров ТМИ, переданным в обработку с учетом искажения одного разряда маркерного слова. При этом, в файле МЕН ТМИ, количество кадров, маркерное слово которых отличается от истинного маркерного слова на один разряд, уменьшилось в среднем на 6,8 % (с 9,4 % до 2,6 %).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Можно сформулировать следующие основные научные и практические результаты диссертации:

1 Обоснована статистическая модель радиосигналов системы передачи ТМИ изделий РКТ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС с учетом корреляционных связей между радиосигналами на ПС. Доказано, что модель может быть представлена в виде двухкомпонентного гамма-распределения для областей независимых и дружных флуктуаций амплитуд радиосигнала ТМИ соответственно. Проведена проверка статистической модели радиосигналов системы передачи ТМИ с применением критериев согласия для разных условий проведения эксперимента (погода, время года и др.). Показано, что по критериям согласия А.В. Колмогорова и χ^2 при уровне значимости $\alpha = 0,01$ теоретическая ФПВ распределения соответствует экспериментальным данным.

2 Разработан, обоснован и исследован алгоритм совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии решений на выходе отдельных каналов регистрации. Показано, что применение этого алгоритма при заданной вероятности ложной тревоги $P_{лт} = 10^{-3}$ обеспечивает достижение средней вероятности правильного обнаружения радиосигнала ТМИ $\bar{P}_o = 0,956$ на дискретных участках трассы полета nT изделия РКТ, при снижении значения средней вероятности правильного обнаружения на $\Delta = 0,5$ % относительно алгоритма совместной частотной обработки некогерентных радиосигналов ТМИ.

3 Предложен алгоритм выделения кадров из потока зарегистрированной ТМИ, учитывающий возможные искажения разрядов маркерных каналов. Показано, что для последовательности из $r_k = 3$ кадров вероятность потери маркерного слова $P_{п}$ по сравнению с вероятностью потери маркерного слова $P_{п}$ для алгоритма, не учитывающего возможные искажения разрядов маркерного слова уменьшается на 22 % (с 0,26 по 0,04) при вероятности появления ложного маркерного слова $P_{л} = 2,79 \cdot 10^{-8}$.

4 Предложен алгоритм взаимной привязки файлов ТМИ, зарегистрированных на территориально-распределенных ПС с целью определения кадров ТМИ, принятых и зарегистрированных в одинаковые дискретные отсчеты времени. Обоснована структурная схема алгоритма совместной обработки ТМИ.

5 Разработана процедура МЕН ТМИ, реализующая предложенный и обоснованный алгоритм совместной обработки радиосигналов ТМИ, одновременно принятых от территориально-распределенных ПС при принятии реше-

ний на выходе отдельных каналов регистрации в целях улучшения качества результата обработки в интересах использования в системе обработки ТМИ изделий РКТ. Приведены и рассмотрены основные результаты реализации процедуры МЕН ТМИ посредством сравнения и анализа поведения ТП в файлах ТМИ, зарегистрированных на отдельных территориально-распределенных ПС и результирующем файле МЕН ТМИ. На основе ТМИ, полученной по результатам проведенного натурного эксперимента показано, что применение процедуры МЕН ТМИ к радиосигналам ТМИ, принятым территориально-распределенными ПС и зарегистрированным в виде файлов ТМИ позволяет повысить объем достоверной ТМИ в среднем на 33,8 % (с 51,6 % до 85,4 %).

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях из перечня ВАК РФ

1. Кириллов С.Н., Зорин С.В., Писака П.С. Алгоритм выделения кадров из потока зарегистрированной телеметрической информации // Вестник РГРТУ. 2015. № 54 часть 2. С. 9-14.

2. Кириллов С.Н., Писака П.С. Квазиоптимальный алгоритм объединения телеметрической информации от территориально-распределенных приемных станций // Вестник РГРТУ. 2017. № 62. С. 104-109.

3. Кириллов С.Н., Писака П.С. Процедура монтажа единого носителя телеметрической информации изделий ракетно-космической техники при территориально-распределенных приемных станциях // Вестник РГРТУ. 2018. № 65. С. 90-96.

В сборниках трудов международных конференций и форумов

4. Кириллов С.Н., Писака П.С. Имитационная модель канала связи системы передачи телеметрической информации космических ракет-носителей // 7-я МНТК «К.Э. Циолковский – 160 лет со дня рождения. Космонавтика, Радиоэлектроника. Геоинформатика»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 291-293.

5. Писака П.С. Обоснование статистической модели сигнала системы передачи телеметрической информации с применением критериев согласия: сборник трудов II МНТК и МНМК «СТНО-2018» Том 1. – Рязань: РГРТУ, 2018. С. 218-222.

6. Карцев В.Е., Писака П.С. Совершенствование процесса отображения в реальном времени измерительной информации бортовых систем изделий ракетно-космической техники // Материалы V ВНТК с международным участием «Актуальные проблемы ракетно-космической техники» (V Козловские чтения). Том 1. – Самара: СамНЦ РАН, 2017. С. 628-633.

В сборниках трудов Всероссийских конференций и симпозиумов

7. Писака П.С. Обоснование модели канала передачи телеметрической информации // XXII ВНТК «НИТ-2017»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 118-119.

8. Писака П.С. Алгоритм обработки телеметрической информации от территориально-распределенных приемных станций // XXII ВНТК «НИТ-2017»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 119-120.

9. Зорин С.В., Писака П.С. Процедура монтажа единого носителя телеметрической информации // XIX ВНТК «НИТ-2014»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2014. С. 109-111.

10. Писака П.С. Задача выделения телеметрического кадра из потока зарегистрированной информации // XXI ВНТК «НИТ-2016»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2016. С. 103-104.

11. Зорин С.В., Писака П.С. Задача взаимной привязки файлов телеметрической информации // XX ВНТК «НИТ-2015»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2015. С. 107-108.

12. Писака П.С., Солотенков И.В. Алгоритм привязки кадров телеметрической информации на основе взаимного анализа измерительных и служебных каналов // Материалы XXXVII ВК «Наука и технологии». Том 3. – М.: РАН, 2017. С. 72-75.

13. Васильев А.В., Писака П.С., Ярославцев А.А. Автоматизированное формирование графиков параметров бортовых систем при испытаниях космических аппаратов // Материалы XVIII ВНТК «НИТ-2013»: Тез. докл. Рязань: РГРТУ, 2013. С. 176-177.

14. Васильев А.В., Писака П.С. Автоматизированный контроль допусков телеметрических параметров при испытаниях космических аппаратов // Материалы XII ВК «Новые технологии». Том 1. – М.: РАН, 2015. С. 72-77.

15. Васильев А.В., Писака П.С. Совершенствование процесса отображения информации о состоянии бортовых систем в реальном масштабе времени при испытаниях космических аппаратов // Материалы XI ВК «Новые технологии». Том 1. – М.: РАН, 2014. С. 74-85.

16. Писака П.С. Программа управления отображением информации о параметрах состояния бортовых систем в реальном масштабе времени при электроиспытаниях космических аппаратов // Материалы XXXIV ВС «Механика и процессы управления». Том 1. – М.: РАН, 2014. С. 119-125.

17. Васильев А.В., Писака П.С. Автоматизированный контроль функционирования параметров бортовых систем управления при испытаниях космических аппаратов // Материалы XXXIV ВК «Наука и технологии». Том 3. – М.: РАН, 2015. С. 139-144.

Прочие публикации

18. Писака П.С. Алгоритм привязки файлов телеметрической информации на основе взаимного анализа бортового и станционного времен // Информационные технологии, межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТУ, 2017. С. 103-108.

19. Писака П.С. Сравнительный анализ оптимальных когерентных и некогерентных алгоритмов обработки информации бортовой системы телеметрических измерений при территориально-распределенных приемных станциях // Информационные технологии, межвузовский сборник научных трудов. Рязань: РГРТУ, 2018. С. 75-79.

Писака Павел Сергеевич

**АЛГОРИТМЫ СОВМЕСТНОЙ ОБРАБОТКИ
ТЕЛЕМЕТРИЧЕСКИХ РАДИОСИГНАЛОВ ОТ ПРИЕМНЫХ СТАНЦИЙ
В ИНТЕРЕСАХ ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМАЦИИ
О СОСТОЯНИИ ИЗДЕЛИЙ РАКЕТНО-КОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тираж 100 экз.

Отпечатано в ООО «Фирма РИНФО»

390000, г. Рязань, ул. Праволыбедская, д. 40

тел./факс: (4912) 24-05-58