

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**СИСТЕМЫ синхронизации,
формирования и обработки
сигналов**

№4-2025 год

Главный редактор

Пестряков Александр Валентинович,

*д.т.н., профессор, зав. кафедрой Радиооборудование и Схемотехника,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Редколлегия:

Дмитриев Александр Сергеевич,

*д.ф.-м.н., профессор, Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Москва, Россия*

Казаков Леонид Николаевич,

д.т.н., профессор, зав. кафедрой Радиотехнических систем, Ярославский государственный университет им. П.Г. Демидова, Ярославль, Россия

Карякин Владимир Леонидович,

*д.т.н., профессор, Поволжский государственный университет телекоммуникаций
и информатики, Самара, Россия*

Рыжков Анатолий Васильевич,

*д.т.н., главный научный сотрудник, профессор, Московский технический университет
связи и информатики, Москва, Россия*

Строганова Елена Петровна,

*д.т.н., профессор, Начальник Испытательной лаборатории средств связи и вещания,
Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия*

Учредитель:

ООО «ИД Медиа Пабlisher»

Номер подписан в печать 15.06.2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Фролов А.А., Никоненко А.В., Комиссаров А.И. МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ БПЛА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ	4
Данилов А.Н., Ефимов Д.В., Максимов С.П. АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ МУЛЬТИСЕРВИСНЫМИ СЕТЯМИ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ	10
Косичкина Т.П., Шубин М.Д. АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ НА БОРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ПРИМЕНЯЮЩИХ АЛГОРИТМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА	16
Иванкович М.В., Кузнецов Н.С. МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ ОТ МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ	22
Топоровский В.В., Галактионов И.В. АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ	28
Цветков В.Э., Ландер Л.Б., Буцкий Д.О., Зубрильцев Е.Е., Королев П.С. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ	34
Воронков Г.А., Винецкий В.Ю. ЗАХВАТ ДВИЖЕНИЙ ПЕРСОНАЖЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЕЩАТЕЛЬНОГО КОНТЕНТА	40

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА ОБОРУДОВАНИЯ БПЛА, ДЕЙСТВУЮЩЕГО В УСЛОВИЯХ СЛОЖНОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ

Фролов Алексей Андреевич
МТУСИ, доцент, к.т.н., Россия
a.a.frolov@mtuci.ru

Никоненко Алексей Владимирович
МТУСИ, ведущий инженер, к.т.н., Россия
nikon-74@mail.ru

Комиссаров Артём Ильич
МТУСИ, студент, Россия
a.i.komissarov@edu.mtuci.ru

Аннотация

В работе в общем плане излагается предлагаемый геометрический подход к решению задачи оптимизации состава оборудования БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки, предлагаются критерии его оптимизации и указываются отдельные математические процедуры, необходимые для решения задачи.

Ключевые слова

Беспилотный летательный аппарат, имитационное моделирование, сложная помеховая обстановка.

Введение

В задачах по определению оптимального состава устанавливаемого на каком-либо объекте оборудования оптимизацию, как правило, необходимо проводить с учетом нескольких критериев. Основными методическими приемами, используемыми при решении подобных задач, обычно являются следующие [1]:

- выявление из совокупности критериев главного, по которому и проводится оптимизация;
- использование агрегированных критериев, когда множество целевых функций заменяется одной «сводной» функцией;
- осуществление оптимизации по Парето, т.е. нахождение решений, не поддающихся улучшению без ухудшения по другим показателям [2-4].

Очевидно, что выбор необходимого метода решения задачи будет зависеть от вида объекта, его назначения, числа показателей, по которым должна осуществляться оптимизация, и т.д.

В настоящей работе делается попытка формирования универсального подхода, представляющего собой некую комбинацию из приведенных выше методов и пригодного для определения оптимального состава радиоэлектронной аппаратуры объектов критической инфраструктуры, объектов частной собственности и т.д. оснащенных разнообразным оборудованием. Например, как выбрать между классической РЛС передне-бокового обзора и голографической РЛС планового обзора [5, 6] при формировании облика перспективного БПЛА.

Суть его заключается:

- в нахождении общего показателя, пригодного для оценки любого из видов аппаратуры;
- выявление зависимостей общего показателя от каждого из частных показателей, по которым обычно осуществляется оценка различных видов оборудования, и приведении всех частных показателей к единому общему для всех видов оборудования показателю оценки эффективности;
- получении на основе семейства оценок эффективности каждого из видов аппаратуры общей оценки эффективности функционирования БПЛА;
- при наличии ограничений (например, по общей массе оборудования) нахождению оптимального по Парето состава оборудования, обеспечивающего максимум рассматриваемой целевой функции.

Выбор критериев оценки эффективности применения БПЛА

На наш взгляд, для оценки объектов, функционирующих в условиях сложной помеховой обстановки, целесообразно использовать «геометрический» подход, заключающийся в построении семейства зон, в которых может быть работоспособным каждый из видов установленного на БПЛА оборудования. Поэтому в качестве

общего универсального показателя, пригодного для оценки любого вида аппаратуры радиоэлектронной системы (РЭС), удобно выбрать размер (площадь или объем) зоны ее эффективного функционирования.

Под зоной эффективного функционирования какого-либо элемента информационного канала следует понимать область, при нахождении в пределах которой этого элемента на входе приемного устройства объекта РЭП выполняется условие подавления помех $\left(\frac{P_n}{P_c}\right)_{ex} < K_n$.

где P_n – мощность помехи и P_c – мощность сигнала на входе приемного устройства.

Все виды зон в зависимости от того, относительно каких объектов они строятся, сведены в таблицу 1.

Таблица 1

Виды зон, по которым можно оценивать эффективность функционирования РЭС в условиях сложной помеховой обстановки

Принадлежность РЭС	Элементы информационного канала, относительно которых строятся зоны	Зоны эффективности РЭП	Зоны неэффективности РЭП
РЭС установленные на БПЛА	Канал связи объекта критической инфраструктуры	Канал связи объекта критической инфраструктуры без помех	Канал связи объекта критической инфраструктуры при действии помех
	РЭС помех	Зона эффективности РЭС помех	Зона неэффективности РЭС помех
Другие РЭС (источники помех)	Передатчик	Зона неэффективности передатчика	Зона эффективности передатчика
	Приемник БПЛА (объект РЭП)	Зона действия помехи	Зона не действия помех

Использование зон эффективности при оптимизации состава оборудования БПЛА.

Допустим, что решается задача определения оптимального состава оборудования БПЛА.

Исходя из возможной номенклатуры средств, устанавливаемых на БПЛА, и анализа возможного характера взаимодействия этих средств, можно полагать, что помеховая обстановка будет меняться и шумовую обстановку необходимо оценивать для различных каналов [7, 8]:

каналов управления БПЛА;
каналов передачи данных с БПЛА на наземный пункт управления;
канала приема сигналов от спутниковой радионавигационной системы;
каналов межсетевой связи БПЛА с другими летательными аппаратами;
каналов получения информации установленной на борту разведывательной аппаратурой: оптико-электронной, радиолокационной, радиотехнической и т.д.

Эти ситуации можно оценить, построив соответствующие зоны.

В случае, когда воздействие помех производится на приемное устройство находится на борту БПЛА (это относится ко всем каналам, кроме второго), должны быть построены зоны действия помех (и не действия помех) каждого из них.

Канал передачи данных с БПЛА на НПУ должен характеризоваться зонами эффективного (и неэффективного) размещения БПЛА при передаче данных на НПУ.

На рисунке 1 показаны все эти зоны за исключением зон действия помех (и не действия помех) на каналы получения информации, установленные на борту летательного аппарата радиоэлектронным оборудованием. Последние объясняются тем, что для различных радиоэлектронных средств связи, радиоэлектронных средств оценки (разведки), РЛР, РТР или других зоны их действия как источников помех могут существенно различаться.

На рисунке показаны также зоны обнаружения (и необнаружения) БПЛА при отсутствии помех и в условиях сложной помеховой обстановки.

Из рисунка видно, что зоны эффективности функционирования каждого из видов оборудования БПЛА существенно отличаются одна от другой. Можно полагать, что вывод оборудования из строя даже только одного из каналов может привести к невыполнению задачи БПЛА.

Например, при поиске объектов критической инфраструктуры БПЛА для фотографирования или определения координат, нарушения частного пространства, нарушение работы канала получения данных может привести к тому, что БПЛА не сможет выполнить свою задачу, даже если канал управления БПЛА будет совершенно работоспособен.

В условиях сложной помеховой обстановки каждая из зон определяется работой как какого-либо вида аппаратуры БПЛА, так и радиоэлектронных средств, осуществляющих воздействие на него.

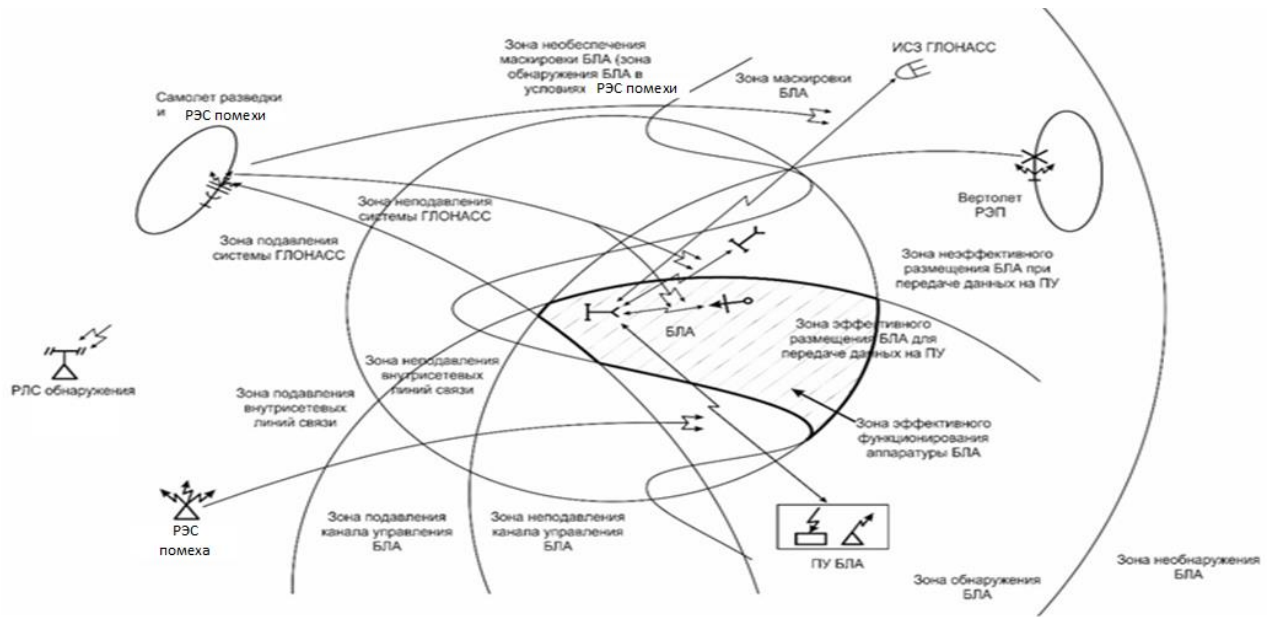


Рис. 1. Зоны эффективного (и неэффективного) функционирования РЭС БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки

Таким образом, сравнение различных зон эффективности позволяет устанавливать средства, являющиеся помехами, представляющую наибольшую угрозу, и выявлять уязвимые виды аппаратуры БПЛА, которые необходимо защитить, чтобы обеспечить эффективное функционирование БПЛА.

Можно полагать, что эффективно функционирующий БПЛА – это БПЛА, у которого эффективно функционирует каждая из систем, используемых при выполнении задачи.

Следовательно, зоной эффективного функционирования БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки необходимо считать зону, в пределах которой эффективно функционирует каждое из средств БПЛА.

Таким образом, зона эффективного функционирования БПЛА может быть определена как область пересечения каждой из зон эффективности оборудования БПЛА, участвующего в выполнении задачи.

Площадь (или объем) зоны эффективности функционирования БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки $S_{эфф\ РЭК}$ может быть определена как

$$S_{эфф\ РЭК} = S_1 \cap S_2 \cap \dots \cap S_N ,$$

где N – общее число каналов оборудования, используемого при выполнении БПЛА задачи; $S_1, S_2, \dots, S_N$ – площадь (объем) зоны эффективности каждого из них.

На рис. 1 заштрихована общая зона эффективности $S_{эфф\ РЭК}$, полученная как область пересечения частных зон эффективности, а ее границы выделены жирными линиями.

Изменение снижения эффективности БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки в этом случае удобно оценивать по коэффициенту снижения эффективности БПЛА [9]

$$K = \frac{S_{эфф}}{S_{эфф\ РЭК}} ,$$

где $S_{эфф}$ – размер зоны эффективности в отсутствии сложной помеховой обстановки.

Величина $K > 1$ показывает во сколько раз снижается размер зоны эффективности БПЛА в условиях действия помех.

Методы определения частных зон эффективности функционирования каждого из видов аппаратуры в условиях сложной помеховой обстановки в настоящей работе не приводятся.

Построение таких зон производится путем расчета величины коэффициента помех (КП) каждого конкретного вида аппаратуры и сравнения его с отношением помеха/сигнал, реализуемым как РЭС-помехи в конкретной радиоэлектронной обстановке. Методы выполнения таких частных расчетов известны (см., например, [2-4]).

Предлагаемая методика расчета зон эффективности может быть использована не только для определения рационального состава оборудования БПЛА, но и для оценки различных аспектов их применения.

Использование зон эффективности при оценке применения БПЛА

Оценим, например, эффективность воздействия различных РЭС на совокупность РЭС БПЛА.

На рисунке 2 показана ситуация, когда 1 РЭС-помеха применяется для воздействия на три линии связи. Очевидно, в этом случае зона эффективности должна характеризовать такое положение, когда все линии связи будут подавлены.

Применяются к задачам, решаемым комплексами с БПЛА, эта ситуация соответствует воздействию РЭС-помехи на каналы сетевой связи или на каналы управления БПЛА для случая, когда управление возможно с нескольких ПУ.

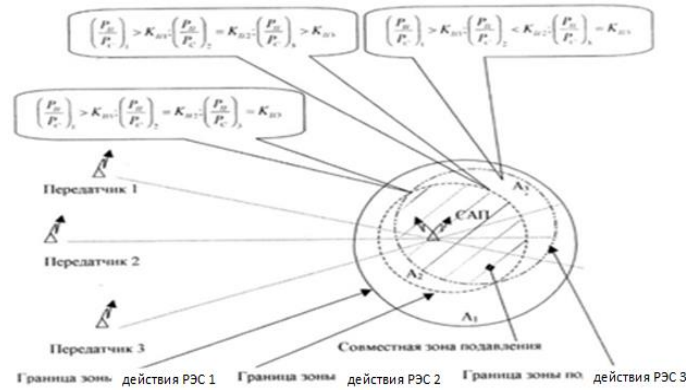


Рис. 2. Использование единственной РЭС – помехи для воздействия на совокупность линий связи

Для варианта, изображенного на рис. 2, где A_1 , A_2 , и A_3 – соответственно плоские зоны действия помех действующих на линии связи 1, 2 и 3, имеющие круглую форму, будет эффективным, если ни одна из линий связи не сможет работать, т.е. зона подавления X является пересечением зон A_1 , A_2 , и A_3

$$X = A_1 \cap A_2 \cap A_3,$$

где $X \in A_1$; $X \in A_2$; $X \in A_3$.

В общем случае зона $X = \bigcap A_i$ представляет собой совокупность точек, принадлежащих одновременно каждому из множеств A_i где $i=1, \dots, M$, M – число передатчиков (линий связи).

Таким образом, событие возникновение помехи совокупности РЭС, обеспечивающей M каналов передачи данных, есть произведение событий, заключающихся в появлении помехи для каждого из M каналов в отдельности.

Рисунок 3 иллюстрирует возможности маскировки объектов при использовании РЭС 1 как помехи для РЭС 2 и радиолокационной станции.

Применительно к задачам, решаемым комплексами с БПЛА, эта задача соответствует задаче обеспечения маскировки БПЛА с помощью групповых средств РЭС, действующих из зон как помехи.

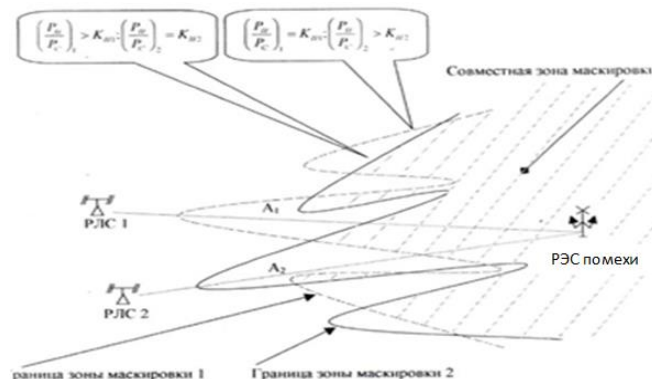


Рис. 3. Использование единственной РЭС-помехи для воздействия на совокупности РЭС

Можно считать, что БПЛА будет замаскирован, если ни одна из РЭС не сможет его обнаружить, т.е. как и в предыдущем случае, необходимая для оценки эффективности мероприятий по РЭБ зона маскировки является пересечением зон маскировки для каждой из РЭС.

$$X = A_1 \cap A_2,$$

где $X \in A_1; X \in A_2$.

Поскольку рассмотренные выше зоны представляют собой общую, совместную часть зон, принадлежащую зонам каждого из объектов, то их удобно называть совместными.

Методика оценки эффективности воздействия на РЭС БПЛА совокупности РЭС-помехи сводится к построению объединенной зоны действия помехи.

Приближенно она может быть определена, как зона X , являющаяся объединением зон действия РЭС-помехи A_j , создаваемых каждый из N источников помех $X = \bigcup A_j$, и представляет собой совокупность точек, принадлежащих хотя бы одному из множеств A_j , где $j = 1, \dots, N$.

Таким образом, для построения объединенной зоны эффективности функционирования БПЛА (зоны эффективности при воздействии на БПЛА совокупности РЭС-помехи) следует построить N зон эффективности, рассчитанных для случая воздействия каждой из N РЭС-помехи, а затем осуществить их объединение. Границы каждой из суммируемых зон рассчитываются из уравнения для зоны действия РЭС-помехи.

Методика пригодна также для оценки эффективности воздействия совокупности РЭС-помехи на совокупность РЭС БПЛА.

В условиях сложной помеховой обстановки для группировки БПЛА, не находящихся на малых высотах, именно ситуация, когда на совокупность РЭС группировки БПЛА будет воздействовать совокупность средств РЭС-помехи, будет наиболее типовой.

Методика сводится к построению, так называемых интегральных зон действия помех, которые могут быть определены как пересечение объединенных зон действия помех каждого из подавляемых каналов всеми РЭС-помехи

$$X = \bigcup_{i=1}^M [\bigcup_{j=1}^N A_{i,j}],$$

где M и N – соответственно число каналов и РЭС-помехи, $A_{i,j}$ – зона действия помехи на i -ый канала j -ой РЭС-помехи, либо как объединение совместных зон действия помех на все каналы каждой из РЭС-помехи

$$X = \bigcup_{i=1}^N [\bigcap_{j=1}^M A_{i,j}],$$

где M и N – соответственно число каналов и РЭС-помехи, $A_{i,j}$ – зона подавления i -го канала j -ой РЭС-помехи.

Выводы

1. При определении оптимального состава оборудования БПЛА, предназначенного для действий в условиях сложной помеховой обстановки, целесообразным является проведение оценок с использованием такого показателя, как размер зоны эффективного функционирования БПЛА.

2. Предложенный показатель является универсальным и позволяет с помощью геометрического подхода путем построения зон эффективного (и неэффективного) функционирования аппаратуры оценивать эффективность применения в условиях сложной помеховой обстановки БПЛА любых типов, оснащенных различным радиоэлектронным оборудованием по назначению и принципу действия.

3. Построение зон эффективности функционирования позволяет определить вклад каждого из видов оборудования в общую оценку эффективности БПЛА в условиях сложной помеховой обстановки, выявить средства РЭС-помехи, представляющие наибольшую угрозу для БПЛА, а также наиболее слабые элементы аппаратуры, нуждающиеся в защите от помех.

4. Предложенные показатели и методику их применения удобно также использовать и для оценки эффективности применения БПЛА в различных ситуациях.

Литература

1. Воробьев Н.Н. Многокритериальная задача. Математическая энциклопедия, т.3. М.: Сов. Энциклопедия. 1982.
2. Чиров Д.С. Методический подход к обоснованию технических характеристик комплексов радиомониторинга для решения задач распознавания источников радиоизлучения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. № 11. С. 85-87. EDN: OPIGNN
3. Чиров Д.С., Чертова О.Г., Потапчук Т.Н. Методика обоснования требований к системе технического зрения робототехнического комплекса // Труды СПИИРАН. 2017. № 2 (51). С. 152-176. DOI: 10.15622/sp.51.7. EDN: YIASIV
4. Чиров Д.С., Терешонок М.В., Елсуков Б.А. Метод и алгоритмы оптимизации технических характеристик комплексов радиомониторинга // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 10. С. 88-92. EDN: SZZOWP
5. Никоненко А.В., Чиров Д.С., Кучумов А.А. Облик многолучевой РЛС обнаружения малоразмерных воздушных целей // Труды Научно-исследовательского института радио. 2023. № 1. С. 39-43. DOI: 10.34832/NIIR.2023.12.1.005. EDN: LGMCQE
6. Lavrov A.A., Antonov I.K., Ovchinnikov V.G., Nikonenko A.V., Chirov D.S. The Concept of a Multi-Beam Radar in the Smart City Air Traffic Control System // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416048. EDN: VQEJGH
7. Vakin S.A., Shustov L.N., Dunwell R.V. Fundamentals of Electronic Warfare. Artech House. Boston. London. 2001.
8. Осипов В.Ю., Ильин А.П. и др. Радиоэлектронная борьба. Теоретические основы. Военно-морской институт им. А.С. Попова. Петродворец. 2006.
9. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга. 2011.

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМИ МУЛЬТИСЕРВИСНЫМИ СЕТЯМИ СВЯЗИ ПЯТОГО ПОКОЛЕНИЯ

Данилов Алексей Николаевич

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), доцент, к.т.н., Москва, Россия

alexnicdanilov@yandex.ru

Ефимов Даниил Васильевич

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), Москва, Россия

daniel.work9@mail.ru

Максимов Сергей Петрович

Московский Технический Университет Связи и Информатики (МТУСИ), старший преподаватель, Москва, Россия

maximovsp@gmail.com

Аннотация

В работе рассматривается преобразующая роль искусственного интеллекта в оптимизации управления мультисервисными сетями 5G. В исследовании подчеркивается необходимость передовых решений на основе искусственного интеллекта для решения сложных задач сетей 5G, таких как динамические требования к сервисам и разнообразные требования к приложениям. Интегрируя искусственный интеллект в сетевые операции, операторы связи смогут добиться повышения эффективности, снижения задержек и улучшения пользовательского опыта.

Ключевые слова

Искусственный интеллект, телекоммуникации, мультисервисные сети, сети 5G, машинное обучение.

Введение

Актуальность темы, касающейся роли мобильными сетями пятого поколения (5G) в развитии телекоммуникаций, трудно переоценить, поскольку пятое поколение сотовых технологий обещает совершить революцию в области связи и коммуникаций в глобальном масштабе. Сети 5G призваны обеспечить значительно более высокую скорость передачи данных, меньшую задержку и большую пропускную способность по сравнению со своими предшественниками, что позволит реализовать широкий спектр приложений, которые ранее были недостижимы [1].

Технология 5G поддерживает такие передовые приложения, как дополненная реальность (AR) и виртуальная реальность (VR), преобразуя такие отрасли, как здравоохранение, транспорт и развлечения, обеспечивая захватывающий опыт и возможности обработки данных в режиме реального времени. Интеграция искусственного интеллекта (ИИ) в 5G еще больше усиливает его потенциал, оптимизируя производительность сети и повышая качество обслуживания клиентов. Однако развертывание 5G не обходится без проблем: оно требует значительных инвестиций в инфраструктуру и вызывает опасения по поводу безопасности и энергоэффективности [2].

Результаты исследования

Рассмотрим потенциал ИИ в управлении мобильными сетями связи 5G.

Интеграция ИИ в управление сетями 5G представляет собой трансформационный сдвиг в сфере телекоммуникаций, позволяя реализовать беспрецедентные возможности анализа данных и автоматизации процессов. Поскольку сети 5G генерируют огромные объемы данных из-за своей сложности и множества подключенных устройств, традиционные подходы к управлению часто оказываются недостаточными для того, чтобы справиться с масштабами и сложностями. ИИ решает эти проблемы за счет использования передовых алгоритмов, способных анализировать потоки данных в режиме реального времени, выявлять закономерности и принимать обоснованные решения в автономном режиме.

Помимо мониторинга в режиме реального времени, ИИ способствует динамическому распределению ресурсов, что является важнейшей функцией в управлении разнообразными требованиями, предъявляемыми к сетям 5G. Возможности предиктивного обслуживания на основе ИИ позволяют операторам сетей выявлять потенциальные неисправности до того, как они перерастут в серьезные проблемы, тем самым сокращая время простоя и повышая непрерывность обслуживания [4, 5].

Автоматизация рутинных процессов – еще одно значительное преимущество ИИ в управлении сетью 5G. Автоматизируя такие задачи, как управление конфигурацией, обнаружение неисправностей и оптимизация производительности, ИИ снижает необходимость вмешательства человека в повседневные операции. Это не только упрощает процессы управления, но и позволяет операторам сосредоточиться на принятии стратегических решений, а не на устранении рутинных неполадок. Например, системы ИИ могут автоматически регулировать параметры сети на основе показателей производительности в режиме реального времени, обеспечивая оперативное реагирование сети на изменение условий без ручного надзора.

ИИ может обеспечить механизмы обнаружения угроз и реагирования на них в режиме реального времени, что крайне важно в эпоху, когда киберугрозы становятся все более изощренными. Используя алгоритмы машинного обучения, которые постоянно адаптируются к новым векторам атак, ИИ повышает устойчивость сетей 5G к потенциальным взломам (рис. 1) [5].

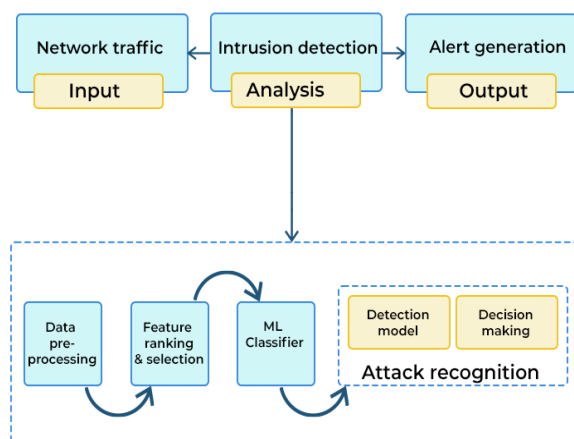


Рис. 1. Архитектура системы обнаружения аномалий сети

Интеграция ИИ в управление мультисервисными сетями пятого поколения (5G) дает значительные преимущества, особенно в плане гибкости, адаптивности и масштабируемости. Эти качества необходимы для эффективного управления сложной и динамичной природой современных телекоммуникационных сетей, которые должны поддерживать разнообразные приложения и услуги [6].

Гибкость – одно из главных преимуществ, которые ИИ предлагает мультисервисным сетям 5G. Системы на базе ИИ могут динамически корректировать конфигурацию сети на основе данных в реальном времени и меняющихся условий [4-6].

Адаптивность – еще одно важное преимущество внедрения ИИ в управление сетью 5G. По мере того как требования пользователей и состояние сети меняются, системы ИИ могут анализировать огромные объемы данных для выявления закономерностей и предсказания будущих тенденций. Способность к прогнозированию позволяет заблаговременно корректировать распределение ресурсов и управление трафиком. Например, ИИ может обнаруживать перегрузки в режиме реального времени и автоматически перенаправлять трафик для оптимизации производительности и снижения задержек. Адаптивность крайне важна для поддержания высокого качества услуг в среде, где ожидания пользователей постоянно меняются [5].

Масштабируемость еще больше увеличивает потенциал ИИ в управлении мультисервисными сетями. Поскольку количество подключенных устройств продолжает расти – по прогнозам, с развитием IoT их число достигнет миллиардов, – традиционные подходы к управлению сетями могут не справиться с растущей сложностью. ИИ обеспечивает масштабируемость, необходимую для эффективного управления этим ростом. Автоматизируя рутинные задачи управления и используя интеллектуальные алгоритмы для распределения ресурсов, ИИ позволяет операторам сетей масштабировать свою деятельность без пропорционального увеличения операционных расходов или человеческих ресурсов. Например, AIOps (искусственный интеллект для ИТ-операций) может предсказывать потенциальные простои или нехватку ресурсов еще до их возникновения, что позволяет операторам масштабировать свою инфраструктуру проактивно, а не реактивно [1, 5].

По мере подключения к сети все большего количества устройств ИИ сможет обеспечить оптимальное распределение пропускной способности между различными приложениями, тем самым повышая качество обслуживания пользователей при сохранении эксплуатационных расходов [2, 6].

Перечислим ключевые направления применения ИИ:

1. Оптимизация ресурсов сети:

- Прогнозирование трафика и распределение пропускной способности.
- Управление спектром и частотными ресурсами.

Поскольку технология 5G обеспечивает беспрецедентные возможности подключения и скорости передачи данных, объем трафика, генерируемого миллиардами подключенных устройств, создает серьезные проблемы для операторов сетей. ИИ предлагает мощные инструменты для анализа этих данных, прогнозирования трафика и эффективного распределения ресурсов, повышая тем самым производительность сети и удобство работы пользователей (рис. 2) [1, 6].

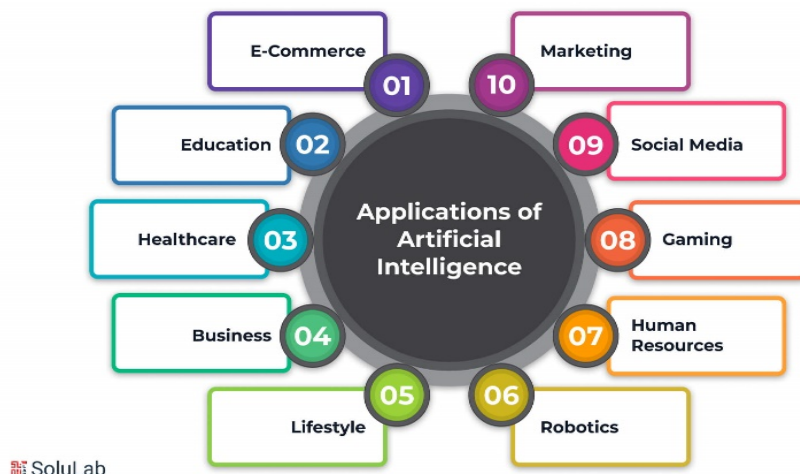


Рис. 2. Основные направления использования ИИ

Способность ИИ прогнозировать сетевой трафик основана на его способности анализировать огромные массивы данных в режиме реального времени. Например, модели ИИ могут использовать методы глубокого обучения для обработки сложных данных и выявления закономерностей, которые традиционные методы могут упустить. Такая способность к прогнозированию крайне важна для обеспечения сверхмалой задержки и высокой надежности, которые обещают сети 5G. Исследования показывают, что системы прогнозирования трафика на основе ИИ могут значительно повысить точность прогнозов, позволяя операторам предвидеть перегруженность и проактивно управлять ресурсами [2, 5].

Одним из ключевых преимуществ использования ИИ для прогнозирования трафика является его адаптивность. В отличие от статичных моделей, которые опираются на фиксированные параметры, алгоритмы ИИ постоянно учатся на новых данных, корректируя свои прогнозы по мере изменения условий. Системы ИИ могут эффективно масштабироваться, чтобы справиться с растущей сложностью и объемом данных, связанных с сетями 5G, что делает их хорошо приспособленными к требованиям современных телекоммуникаций [5].

Анализируя прогнозируемую нагрузку на трафик, ИИ может определить, как лучше распределить доступную полосу пропускания между различными приложениями и сервисами. Например, высокоприоритетные приложения, такие как видеоконференции или онлайн-игры, могут требовать гарантированной пропускной способности в пиковые моменты, в то время как менее чувствительные к времени сервисы могут распределять ресурсы более гибко [6].

Использование ИИ для распределения полосы пропускания помогает уменьшить перегрузку, минимизируя задержки и обеспечивая стабильное качество услуг. Предсказывая потенциальные узкие места до их возникновения и соответствующим образом перераспределяя ресурсы, системы на базе ИИ обеспечивают бесперебойное подключение широкого спектра устройств и приложений [4, 5].

Динамическое управление спектром подразумевает распределение и оптимизацию частотных ресурсов в режиме реального времени с учетом текущих условий в сети и запросов пользователей. Например, компания Federated Wireless разработала решения на основе ИИ, которые используют генеративный ИИ для точного прогнозирования спроса на спектр и разумного распределения ресурсов. Учитывая данные о помехах и использовании спектра, поступающие из системы управления спектром, эти решения обеспечивают оптимальную производительность сети, сводя к минимуму время простоя и затраты на обслуживание [3, 6].

Способность ИИ выполнять моделирование в режиме реального времени позволяет операторам предвидеть потенциальную нехватку спектра или конфликты до их возникновения. Такое упреждающее планирование крайне важно в среде 5G, где такие приложения, как автономные транспортные средства или удален-

ная хирургия, требуют сверхнадежной связи с низкой задержкой.

ИИ также улучшает возможности спектрального зондирования, что крайне важно для определения свободных частот в условиях большого скопления людей. Передовые методы ИИ позволяют системам осуществлять 360-градусное наблюдение за спектром, что обеспечивает эффективное динамическое разделение спектра (DSS). Например, платформа OmniSIG от DeepSig позволяет разработчикам создавать модели ИИ, которые способствуют лучшему использованию доступного спектра. Эта возможность особенно важна в частных сетях 5G, где промышленные приложения требуют надежного соединения в условиях различных помех [5].

Более того, решения по совместному использованию спектра на основе ИИ, такие как FlexSHARE от Peraton Labs, демонстрируют, как машинное обучение может оптимизировать распределение ресурсов между различными пользователями и сервисами. FlexSHARE обеспечивает двусторонний обмен между сетями 5G и военными радаром, не требуя обширного обмена информацией между системами, обеспечивая тем самым низкую задержку при минимизации помех [6].

Масштабируемость решений по управлению спектром на основе ИИ - еще одно существенное преимущество. Поскольку количество подключенных устройств продолжает расти в геометрической прогрессии в связи с развитием IoT и инициатив «умных городов», традиционные методы управления спектром могут стать неадекватными. Например, исследования показывают, что использование систем обучения с подкреплением (RL) для динамического распределения спектра может значительно повысить эффективность за счет адаптации к изменяющимся условиям в режиме реального времени [3, 5].

2. Обеспечение качества обслуживания и восприятия:

–Анализ пользовательского опыта на основе больших данных.

–Адаптация сети к изменениям в реальном времени.

Обеспечение качества обслуживания (QoS) и качества восприятия (QoE) имеет первостепенное значение для управления сетями 5G, в которых пользователи ожидают бесперебойного подключения и высокой производительности. По мере усложнения сетей использование ИИ для анализа пользовательского опыта с помощью больших данных становится необходимым для поддержания качества услуг и повышения удовлетворенности клиентов (см. рис. 3) [4, 6].

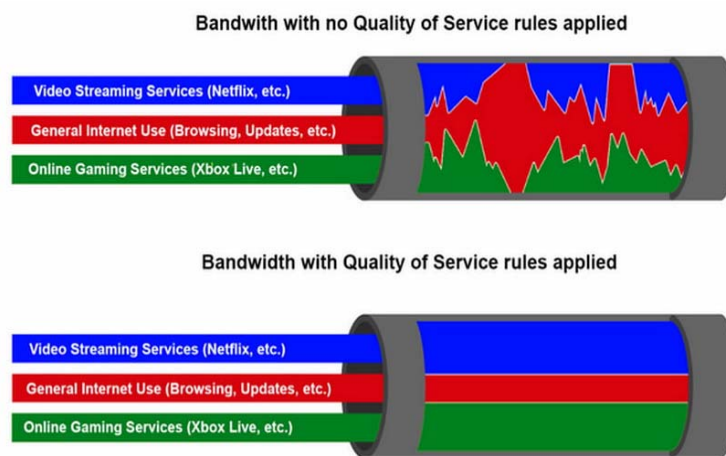


Рис. 3. Применение правил QoS

Качество обслуживания относится к общей производительности сети, в частности к пропускной способности, задержке, джиттеру и потере пакетов, которые непосредственно влияют на предоставление услуг. В отличие от этого, качество восприятия включает в себя восприятие пользователем качества услуг, на которое влияют такие факторы, как надежность и общая удовлетворенность сервисом. Различие между этими двумя показателями очень важно: если QoS можно количественно оценить с помощью технических измерений, то QoE по своей сути субъективно и варьируется в различных пользовательских контекстах [6].

Технологии ИИ позволяют операторам сетей анализировать огромные объемы данных, генерируемых пользователями и сетевыми устройствами в режиме реального времени. Используя алгоритмы машинного обучения, операторы могут непрерывно отслеживать показатели производительности сети и выявлять закономерности, которые могут указывать на потенциальные проблемы. Такой проактивный подход к управлению сетью не только улучшает QoS, но и сокращает среднее время восстановления (MTTR), позволяя быстрее решать проблемы, связанные с ухудшением качества обслуживания [5].

Предиктивная аналитика на основе ИИ позволяет прогнозировать будущую производительность сети на основе текущих тенденций использования и статистических данных. Такая возможность позволяет операторам принимать обоснованные решения о распределении ресурсов и планировании пропускной способности, гарантируя, что сеть сможет удовлетворить прогнозируемый спрос без ущерба для качества услуг. Интегрируя ИИ с традиционными инструментами управления сетью, операторы могут создать более устойчивую инфраструктуру, отвечающую изменяющимся потребностям пользователей.

Для эффективного повышения качества обслуживания необходимо анализировать поведение и отзывы пользователей наряду с техническими показателями производительности. ИИ может коррелировать данные из различных источников, включая взаимодействие пользователей, показатели производительности приложений и факторы окружающей среды, чтобы создать комплексную картину пользовательского опыта.

Усовершенствованные модели ИИ также могут сегментировать пользователей на основе их опыта и предпочтений, что позволяет предоставлять персонализированные услуги с учетом конкретных потребностей пользователей. Такая сегментация позволяет операторам выявлять пользователей, находящихся в группе риска, которые могут испытывать недостатки в качестве обслуживания, и проактивно решать их проблемы [1, 2, 5].

В исследовании компании RADCOM говорится о том, как решения для обеспечения безопасности на основе ИИ используют облачные архитектуры для внедрения аналитики непосредственно в процесс управления сетью. Такой подход позволяет осуществлять мониторинг и анализ в режиме реального времени, не требуя отдельных систем для сбора и обработки данных [2, 6].

Системы на основе ИИ способны непрерывно отслеживать производительность сети и поведение пользователей, позволяя мгновенно корректировать распределение ресурсов на основе анализа данных в режиме реального времени. Исследования показывают, что динамическое распределение ресурсов с помощью ИИ позволяет снизить задержки до 10 миллисекунд, что значительно улучшает качество работы пользователей различных приложений, от потоковых сервисов до онлайн-игр [5, 6].

ИИ облегчает нарезку сетей - ключевую особенность сетей 5G, которая позволяет операторам создавать несколько виртуальных сетей, отвечающих конкретным требованиям к услугам. Например, во время крупного события с резким ростом пользовательского трафика ИИ может быстро выделить дополнительные ресурсы для высоковольтных фрагментов, сократив при этом количество менее важных сервисов, тем самым поддерживая общую целостность сети по данным Counterpoint Research, ИИ может автоматизировать необходимые задачи для нарезки сети, повышая операционную эффективность и значительно сокращая время развертывания [1, 2].

Исследования показали, что предиктивное обслуживание на основе ИИ может сократить время решения сетевых проблем на 60%, что приводит к повышению надежности и удовлетворенности пользователей [2, 5].

Алгоритмы ИИ также могут использовать аналитику больших данных для всесторонней оценки пользовательского опыта. Например, если данные показывают, что пользователи часто сталкиваются с проблемой буферизации при просмотре потокового видео, ИИ может скорректировать распределение полосы пропускания или рекомендовать оптимизацию доставки контента [5].

Концепция самооптимизирующихся сетей (SON) – это значительное достижение, обеспечиваемое ИИ в средах 5G. SON использует алгоритмы ИИ для автоматизации рутинных задач управления, таких как обнаружение неисправностей, распределение ресурсов и оптимизация производительности.

Например, самообучающиеся модели ИИ могут выявлять закономерности в использовании сети, которые указывают на потенциальные сбои или снижение производительности. Прогнозируя эти проблемы с точностью до 95 %, сети могут предпринять корректирующие действия до того, как пострадают пользователи. Эта возможность особенно важна для поддержки критически важных приложений, таких как телемедицина или автономные транспортные средства, где надежность имеет первостепенное значение [6].

Заключение

Преимущества ИИ - гибкость, адаптивность и масштабируемость - жизненно важны для эффективного управления мультисервисными сетями 5G. Используя эти возможности, поставщики телекоммуникационных услуг смогут не только повысить операционную эффективность, но и предоставлять специализированные услуги, отвечающие разнообразным потребностям клиентов.

Интеграция ИИ в процессы прогнозирования трафика и распределения полосы пропускания представляет собой значительный шаг вперед в управлении мультисервисными сетями 5G. Используя возможности ИИ для анализа данных в реальном времени и прогнозирования, операторы сетей смогут оптимизировать использование ресурсов, повысить качество предоставляемых услуг и, в конечном счете, удовлетворенность пользователей в мире, который становится все более взаимосвязанным.

Несмотря на достоинства отметим проблемы при внедрении ИИ в 5G:

- Высокая сложность моделей и вычислительные затраты.
- Ограничения по качеству данных (доступность, объем, точность).
- Вопросы интерпретируемости решений, принятых ИИ.
- Регуляторные аспекты и соблюдение конфиденциальности.

Литература

1. *Andrews J.G.*, et al. What will 5G Be? // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2014. Vol. 32, no. 6.
2. *Au K.*, et al. Uplink contention based SCMA for 5G radio access // IEEE Globe-com 5G workshop. Dec. 2014.
3. *Крейнделин В.Б., Варукина Л.А., Воронков Е.Н.* Методические указания по дисциплине «Технологии беспроводных сетей передачи данных». М.: МТУСИ, 2011. 64 с.
4. *Степанова И.В.* Системы широкополосного абонентского доступа. Учебное пособие. М.: МТУСИ, 2010. 74 с.
5. Hash Studioz. AI in 5G Networks: Advancements & Real-World Use Cases. 2024.
<https://www.hashstudioz.com/blog/ai-in-5g-networks-advancements-challenges-and-real-world-use-cases/>
6. Counterpoint Research. AI/ML Key in Enhancing 5G Network Efficiency. 2023.
<https://www.counterpointresearch.com/insights/aiml-in-5g-network/>

АНАЛИЗ ОГРАНИЧЕНИЙ НА БОРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ, ПРИМЕНЯЮЩИХ АЛГОРИТМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА

Косичкина Татьяна Павловна

МТУСИ, зав. кафедрой, к.т.н., доцент, Москва, Россия
t.p.kosichkina@mtuci.ru

Шубин Матвей Дмитриевич

МТУСИ, Москва, Россия
matew.shubin@gmail.com

Аннотация

В работе рассматриваются причины применения алгоритмов искусственного интеллекта в системах ДЗЗ, а также причины переноса обработки данных в бортовое оборудование. Анализируются возможные способы построения систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Выявляются ограничения, накладываемые на оборудование, при реализации алгоритмов на борту. Рассматриваются некоторые современные тенденции применения алгоритмов искусственного интеллекта с учетом выявленных ограничений.

Ключевые слова

Обработка данных на борту, дистанционное зондирование Земли, алгоритмы с применением искусственного интеллекта, параметры оборудования, аппаратурные ограничения.

Введение

В последнее десятилетие наблюдается активное развитие деятельности, связанное с использованием спутникового сегмента (телекоммуникации, навигация, дистанционное зондирование Земли) в различных отраслях народного хозяйства.

Спутники дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) предоставляют ученым, исследователям, промышленным предприятиям и государственным органам средства для наблюдения и изучения различных аспектов Земли из космоса. Наряду с традиционными сферами, такими как климатические службы, мониторинг окружающей среды, управление чрезвычайными ситуациями, ДЗЗ находит широкое применение в сельском и лесном хозяйствах, дорожной и автомобильной промышленности, развитии городов, энергетическом и сырьевом сегментах [1]. Такая популярность связана, в первую очередь, с миниатюризацией космических аппаратов, появлением группировок малых космических аппаратов, а также совершенствованием аппаратуры бортовых систем, в том числе появлением новых решений в области оптики, электроники и схемотехники.

Спутники ДЗЗ работают на основе целого ряда принципов, которые позволяют им проводить измерения и анализ свойств Земли, а также ее изменений, происходящих с течением времени. Этот анализ зависит от различных характеристик системы ДЗЗ, таких как: высота орбиты, типы датчиков, пространственное разрешение, спектральные диапазоны, а также от алгоритмов обработки и анализа данных. Используемые при этом методы обработки зависят, в первую очередь, от решаемых задач, среди которых могут быть: обнаружение, распознавание объектов на изображении, выделение границ конкретных объектов и т.п. Всё чаще для повышения эффективности обработки таких изображений применяются алгоритмы, использующие искусственный интеллект, в частности, машинное обучение.

Одной из задач ДЗЗ является получение изображений высокого разрешения для предоставления критически важной информации. Эти изображения затем могут быть переданы на Землю для дальнейшего анализа, либо обработаны на борту. До недавних пор обработка данных на борту ограничивалась лишь некоторой простой предварительной обработкой, такой как коррекция, шумоподавление, компенсация и т. д. В настоящее время количество данных, получаемых от различных датчиков систем ДЗЗ, значительно возросло. Соответственно выросла и потребность в ресурсах, необходимым для их хранения и передачи, поэтому исследователи вынуждены обрабатывать данные на борту настолько, насколько это возможно. Однако для выполнения данной работы в космосе имеются определенные особенности и ограничения, которые и рассматриваются в данной работе.

Построение системы

При выборе орбитального построения для спутников ДЗЗ предпочтение отдают круговым синхронно-солнечным орбитам, диапазон высот для которых, как правило, ограничен высотами 400...700 км [2]. Поэтому космические аппараты (КА) ДЗЗ сначала собирают информацию и хранят некоторый её объем на борту, а затем сбрасывают накопленную информацию Земным станциям (ЗС).

Возможны два варианта построения низкоорбитальных систем: без межспутниковых линий (рис.1), когда КА передаёт на ЗС информацию, накопленную за виток или часть витка, и с межспутниковыми линиями (рис. 2), при котором между несколькими КА возможен оперативный обмен информацией, в том числе по высокоскоростным оптическим линиям связи.

В качестве примера первого варианта построения можно привести российские спутники серии Канопус-В, приём данных с которых производится в пяти городах. Следует отметить, что такая схема построения является традиционной для систем ДЗЗ. При расчете такой системы следует учитывать размер временного окна, в течение которого данные передаются на Землю, считая, что вся память при этом полностью очищается [3].

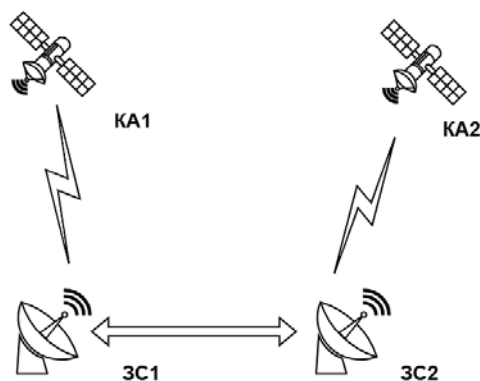


Рис. 1. Структурная схема традиционной системы ДЗЗ

Второй вариант построения системы популярен для группировок малых космических аппаратов. К настоящему времени запущено множество малых космических аппаратов, способных решать отдельные задачи ДЗЗ. Такие спутники имеют относительно невысокую стоимость, их можно создавать для решения определенных узкоспециализированных задач, а группировки этих спутников обладают большей надежностью и живучестью за счет снижения рисков от утраты отдельных КА. Это, как правило, космические аппараты класса CubeSat (кубсат) и подобные им. На сегодняшний день, однако, не существует значимых, достаточно больших группировок кубсатов для решения задач ДЗЗ, поэтому вариант построения на рис. 2 считается перспективным.

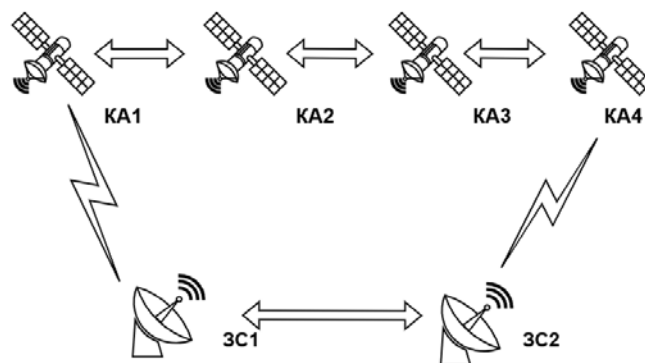


Рис. 2. Структурная схема системы ДЗЗ с межспутниковыми линиями передачи информации

Под производительностью системы дистанционного зондирования Земли понимают величину, равную площади земной поверхности, снимаемой и передаваемой на приемные ЗС за одни сутки [4]. Говоря о производительности систем ДЗЗ в первую очередь имеют в виду производительность оптико-электронной аппаратуры. Однако следует учитывать также и объем передаваемой информации, который в свою очередь зависит от скорости передачи информации по радиолинии.

Как упоминалось ранее, для спутников ДЗЗ имеется два варианта построения систем: с передачей снимков на ЗС и их дальнейшей обработкой на Земле и с обработкой сигналов на борту. Зачастую необработанные данные, генерируемые современными приборами ДЗЗ, превышают объем, который можно передать на Землю по радиолинии, например, в X-диапазоне [4]. Для решения этой проблемы необходимо, в первую очередь, использовать различные методы обработки и сжатия сигналов для уменьшения объема передаваемых данных, особенно для малых спутников.

В настоящее время перспективной считается идея переноса обработки спутниковых данных с Земли (наземный сегмент) в космос (космический сегмент) посредством разработки так называемой бортовой обработки данных полезной нагрузки.

Однако бортовая обработка предъявляет определенные требования к таким характеристикам системы как энергопотребление, вычислительная мощность и надежность. Разработка оптимальных решений обычно включает в себя соответствующее сочетание как программных, так и аппаратных средств.

В этом случае представляет интерес технология, использующая алгоритмы машинного обучения в наземном сегменте [5]. Действительно, самые высокие требования к обработке требуются на этапе обучения, который в данной технологии выполняется на Земле, в то время как для бортовой обработки требуются меньшие затраты. К примеру, Европейское космическое агентство уже осуществило запуск двух космических аппаратов Phi-sat-1 и Phi-sat-2 типа кубсат, в которых применяется подобная бортовая обработка с использованием алгоритмов искусственного интеллекта [6, 7].

Оптическая нагрузка

Термин «оптическая полезная нагрузка» относится к приборам, которые собирают свет и другие данные в электромагнитном спектре. Обычно это камеры, спектрометры, радиометры и другие датчики. В целом, существует две категории оптических полезных нагрузок – пассивные и активные.

В настоящее время широко распространено использование алгоритмов искусственного интеллекта для обработки изображений, получаемых от различных видов оптической полезной нагрузки, на Земле. Однако поскольку алгоритмы выполняются уже после передачи данных на Землю, что занимает определенное время, это может внести задержку в принятие решений, если таковые потребуются.

В любой системе распознавания изображений с глубоким обучением важную роль играет качество входного изображения. Поэтому если изображение напрямую передается с датчика в устройство обработки, важно определить соответствующие проблемы и ограничения и с учетом этого образом спроектировать оптическую полезную нагрузку.

Для начала определим ключевые характеристики, определяющие качество обрабатываемого изображения. К ним, в первую очередь, относят разрешение. Различают следующие виды разрешения: спектральное, радиометрическое, временное и пространственное [8]. Сенсоры также характеризуют с помощью так называемого расстояния выборки до земли (Ground Sampling Distance, GSD), которое определяется как расстояние между двумя точками на Земле, соответствующим центрам двух соседних пикселей. Чем большее значение GSD, тем ниже пространственное разрешение изображения [3].

Кроме того, существует характеристика, называемая временным разрешением, которая является особенностью систем ДЗЗ [4]. Временное разрешение означает частоту, с которой спутник повторно пролетает определенное место на поверхности Земли.

Еще одной важной характеристикой оптической полезной нагрузки является ширина полосы захвата, которая представляет собой ширину поверхности, охватываемой оптическим датчиком на спутнике. Эта величина определяет площадь, которую спутник может охватить за один проход.

Перечисленные характеристики помогают в выборе конкретного типа датчика для оптической системы полезной нагрузки. Проектирование оптической системы, в свою очередь, тесно связано с разработкой бортовых алгоритмов обработки данных на основе искусственного интеллекта. Любое небольшое отклонение в проектировании оптического датчика может привести к изменению значения GSD, например, с 10 м до 100 м. Это означает, что один пиксель в полученном изображении на Земле представляет не 10 м, а 100 м. При таком изменении значения данной характеристики алгоритм распознавания изображений на основе искусственного интеллекта не сможет даже обнаружить ни одного объекта, не говоря уже о распознавании.

Устройства памяти

В типичном спутнике ДЗЗ есть массив памяти, который отвечает за хранение данных полезной нагрузки. Объем необходимой бортовой памяти с годами увеличивается, так как растет разрешение снимков. Если первое поколение спутников ДЗЗ имело сравнительно небольшой объем памяти, от 16 до 64 Гбайт, то в

настоящее время он увеличился более чем на порядок. Например, на спутнике GeoEye-1, запущенном в 2008 году размер памяти составлял порядка 1000 Гбайт, на спутниках WorldView-1, -2, -3 (2007 г., 2009 г. и 2014 г., соответственно) он составлял более 2000 Гбайт, а на спутнике WorldView-4 (2016 г.) – более 3000 Гбайт [4]. Дальнейшее увеличение размера памяти возможно, но не беспредельно.

На размер бортовой памяти систем ДЗЗ в общем случае влияют следующие параметры: количество изображений, полученных за период обращения или за день, размер отдельных изображений, время до следующей возможности сброса данных по нисходящей линии связи, скорость передачи по нисходящей линии связи и т.д.

Для бортовых алгоритмов на основе искусственного интеллекта необходимый объем памяти зависит от веса, топологии спутника и объема обрабатываемых данных. Существуют и другие факторы, такие как стоимость, устойчивость к радиации, энергопотребление и др., которые могут существенно ограничивать возможный объем памяти. Для CubeSat или многоспутниковых группировок эти факторы не имеют большого значения, поскольку в них обычно используются коммерческие блоки памяти.

Для повышения эффективности использования бортовой памяти предлагается использовать обмен данными между различными спутниками группировки с помощью межспутниковых линий связи, рассмотренных в предыдущем разделе (рис. 2). В этом случае для более эффективного распределения ресурсов можно задействовать алгоритмы, аналогичные алгоритмам, используемым для решения задачи балансировки нагрузок.

В алгоритмах обработки, использующих методы искусственного интеллекта, при ограниченном объеме доступной памяти некоторые модели глубокого обучения можно сделать более компактными с помощью методов обрезки. При этом может немного снизиться точность модели.

Помимо размера памяти и размера входных данных, есть еще ряд аспектов, которые следует учитывать при построении бортовых устройств памяти. Это стратегии управления памятью, включая скорость передачи данных, скорость записи и считывания, обеспечение надежности и оптимизация производительности, которые могут иметь решающее значение при проектировании и разработке бортовых алгоритмов на основе искусственного интеллекта.

Производительность вычислительных устройств

В любом спутнике ДЗЗ основные вычисления выполняются на процессоре, который имеет ограничения, связанные с его вычислительной мощностью (производительностью). Ограничения на вычислительную мощность существуют, поскольку процессоры выбираются с учетом массы, объема, способности выдерживать радиацию, соображений безопасности и других факторов, которые часто связаны с общими требованиями к спутнику. Во всех традиционных бортовых компьютерах технология отстает примерно на 10–15 лет по сравнению с наземными аналогами. Это делает даже самый простой алгоритм с применением искусственного интеллекта слишком медленным, а в некоторых случаях и вовсе невыполнимым.

В настоящее время большинство алгоритмов распознавания изображений используют свёрточные нейронные сети (CNN), 90% вычислений которых выполняются в свёрточных слоях, поэтому для их реализации требуются большая производительность и большие объемы памяти.

Например, популярная архитектура CNN для обнаружения объектов, модель YOLOv4, может иметь более 60 миллионов параметров/весов. В большинстве случаев, эти веса хранятся в виде 32-битных чисел с плавающей точкой, таким образом, объем памяти для хранения весов для модели YOLOv4 может составлять около 240 000 000 байт.

В последние годы различные производители разработали ускорители, включающие графические процессоры, ПЛИС (FPGA), системы на кристалле (MPSoC) и адаптивную платформу ускорения вычислений (ACAP).

Кроме того, следует отметить, что существует тенденция использования микропроцессоров ARM, которые можно заменить на RISC-V с открытым исходным кодом из-за его доступности. Многие из спутников кубсат используют процессоры типа COTS (Commercial-off-the-shelf, готовое коммерческое устройство), которые обеспечивают гораздо более высокую вычислительную мощность [10].

Проблема выбора платформы (ускорителя) заключается, с одной стороны, в поддержке высоких потребностей по производительности, поддержке инструментов (фреймворка) искусственного интеллекта, совместимости управления памятью и других потребностей совместного проектирования оборудования и программного обеспечения. С другой стороны, вычислительная платформа должна подходить для интеграции в спутник ДЗЗ.

Энергопотребление

Спутники дистанционного зондирования Земли используют целый ряд бортовых устройств, таких как оптоэлектронное оборудование, датчики, приводы, передающее оборудование, для работы которых необходима электроэнергия. Двумя основными источниками питания на борту спутника являются солнечные панели и аккумулятор. На этапе проектирования спутника выполняется расчет распределения энергетических ресурсов (бюджета) [11], для гарантии того, что у спутника будет достаточно электроэнергии для поддержания в рабочем состоянии всех этих подсистем на время расчетного срока его пребывания на орбите.

Энергетический бюджет является основным ограничивающим фактором применения бортовых алгоритмов обработки изображений на основе искусственного интеллекта. Это связано с высоким энергопотреблением процессора, выполняющего вычисления. Поэтому вычислительная платформа, на которой реализован алгоритм распознавания изображений, должна быть выбрана с учетом ее энергопотребления при различных нагрузках.

Просчитать все варианты и принять решение заранее довольно сложно, поскольку результаты, полностью зависят от используемой конфигурации. Эту конфигурацию, возможно, придется изменить, в зависимости от объема обрабатываемых данных и вычислительной сложности применяемых алгоритмов.

Скорость передачи информации

Спутники ДЗЗ обычно передают не только обрабатываемые данные, но и телеметрическую информацию, собранную с различного оборудования на борту спутника, на наземную станцию (станции). Для передачи информации на ЗС каждому спутнику выделяется полоса частот в определенном частотном диапазоне, например, S-диапазоне, X-диапазоне и т.д.

Скорость передачи, с которой спутник может отправлять и передавать данные, в основном зависит от: эффективной изотропно излучаемой мощности, ширины полосы частот, метода модуляции и помехоустойчивого кодирования (а также демодуляции и декодирования, соответственно). При проектировании спутника рассчитывается бюджет линии связи с учетом всех перечисленных выше факторов.

Минимально необходимую скорость передачи в заданном временном окне можно рассчитать, зная размер бортовой памяти, разрешение изображения и количество битов на пиксель [3].

Очевидно, что при увеличении разрешения изображений увеличивается объем передаваемых данных, что в свою очередь требует увеличения скорости передачи данных. Например, если для спутника GeoEye-1 требуемая скорость передачи через бортовую радиолинию составляла 740 Мбит/с, то для спутника WorldView-4 она увеличилась до 1200 Мбит/с [4].

S-диапазон (2-4 ГГц) широко используется для передачи телекоманд и приема телеметрии, связанной с шиной спутниковой платформы. С другой стороны, скорость передачи в системах связи S-диапазона может достигать только нескольких кбит/с.

Для спутника ДЗЗ, расположенного на типичной орбите на высоте до 1000 км, существует довольно много систем связи в S-диапазоне, которые обеспечивают скорость передачи данных по восходящей линии связи порядка 64 кбит/с и скорость передачи данных по нисходящей линии связи 128 кбит/с. По современным меркам это чрезвычайно низкая скорость передачи данных.

X-диапазон (8-12 ГГц) активно используется для приема данных, связанных с полезной нагрузкой, таких как изображения. X-диапазон имеет более короткую длину волны и обеспечивает хорошую скорость передачи данных, достигающую от нескольких Мбит/с до десятков Мбит/с.

Системы связи X-диапазона доступны, в том числе, и как коммерческие системы (COTS). Они могут обеспечить скорость передачи данных по нисходящей линии связи 60-200 Мбит/с. Однако в X-диапазоне на основе COTS обычно не предоставляются готовые решения для восходящей линии связи. При частичной обработке данных на Земле это создает проблему, заключающуюся в том, что, необходимо разработать собственную систему связи X-диапазона, что увеличивает стоимость системы.

В настоящее время радиолинии передачи информации «вниз» в X-диапазоне практически достигли предельных скоростей передачи, в новых поколениях систем ДЗЗ рассматривается использование других диапазонов частот, а также исследуются (в том числе и экспериментально) возможности передачи данных на наземные пункты по оптическим каналам [3, 4].

Заключение

Алгоритмы искусственного интеллекта все глубже проникают в повседневную жизнь, затрагивая самые различные сферы человеческой деятельности, включая системы дистанционного зондирования Земли. Облегчая обработку больших данных, эти алгоритмы накладывают определенные ограничения на построение системы и состав оборудования.

После анализа открытых источников информации выделим следующие основные рекомендации по применению алгоритмов искусственного интеллекта в задачах обработки информации со спутников ДЗЗ.

В большинстве случаев системы дистанционного зондирования Земли используют спутники на низких круговых орбитах. Поэтому спутники ДЗЗ сначала собирают информацию и хранят некоторый её объем на борту, а затем сбрасывают накопленную информацию земным станциям (ЗС). В этом случае наиболее значимым параметром, определяющим производительность системы, является скорость передачи информации через радиолинию.

При небольшом числе ЗС целесообразно проводить обработку информации на борту, при этом наиболее ресурсозатратные этапы обработки, например, этап обучения, можно оставить в земном сегменте. В этом случае значимыми параметрами системы являются объем бортового запоминающего устройства, производительность вычислительных устройств и энергопотребление. Необходимо также провести собственную разработку восходящей радиолинии связи.

В многоспутниковых группировках малых космических аппаратов требования к устройствам памяти можно снизить за счет перераспределения данных между спутниками по межспутниковым линиям связи.

Основным ограничивающим фактором применения бортовых алгоритмов обработки изображений на основе искусственного интеллекта является энергетический ресурс (бюджет) спутника ДЗЗ.

Литература

1. Маркетинговое исследование, отчет «Анализ потребностей рынка, интересов частных космических организаций, занимающихся разработкой изделий и предоставлением услуг в области космонавтики и сопряженных технологий» [Электронный ресурс] // Центр коммерческого космоса: [сайт]. 2022. URL: https://kosmos.ssau.ru/files/Kosmos_SSAU_marketrepot_2022.pdf (дата обращения: 28.11.2024).
2. Белый Р.В., Мовляв А.С. Требования к построению орбитальной группировки при проектировании перспективных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2021. Т. 182, № 3. С. 32-38.
3. Косичкина Т.П., Анисимов М.А. Особенности применения оптических линий связи в системах дистанционного зондирования Земли // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2022. Т. 12, № 2. С. 12-16.
4. Бакланов А.И. Новые горизонты космических систем оптико-электронного наблюдения Земли высокого разрешения (часть II) // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2018. Т. 5, № 4. С. 14-27.
5. Ziaja M., Bosowski P., Myller M., Gajoch G., Gumiel M., Protich J., Borda K., Jayaraman D., Dividino R., Nalepa J. Benchmarking Deep Learning for On-Board Space Applications. Remote Sens. 2021, 13(19).
6. Giuffrida G. et al., The Φ-Sat-1 Mission: The First On-Board Deep Neural Network Demonstrator for Satellite Earth Observation, in IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 60, pp. 1-14, 2022.
7. Melega N., Marchese V., Paškevičiūtė-Kidron A., Dominguez B.C., Longepe N., Casaled O.A., Babkina I., Marin A., Steyn H., Buckley L., Nalepa J., Oliveira S., Guerrisi G. The ESA ΦSat-2 Mission: An A.I Enhanced Multispectral CubeSat for Earth Observation, Lohan, Utah, Aug. 2023. [Электронный ресурс] // 37th Annual Small Satellite Conference [сайт]. URL: <https://digitalcommons.usu.edu/smallsat/2023/all2023/35> (дата обращения: 25.01.2025).
8. Kabir S., Leigh L., Helder D. Vicarious Methodologies to Assess and Improve the Quality of the Optical Remote Sensing Images: A Critical Review. Remote Sens. 2020, 12, 4029.
9. Schildknecht T., Hinze A., Schlatter P., Silha J., Peltonen J., Sääntti T., Flohrer T. Improved Space Object Observation Techniques using CMOS Detectors. Proceedings of 6th European Conference on Space Debris, Darmstadt, Germany, 2013.
10. Cratere A., Gagliardi L., Sanca G.A., Golmar F., Dell'Olio F. On-Board Computer for CubeSats: State-of-the-Art and Future Trends, in IEEE Access, vol. 12, pp. 99537-99569, 2024.
11. Меньшиков В.А., Перминов А.Н., Рембеза А.И., Урличич Ю.М. Основы анализа и проектирования космических систем мониторинга и прогнозирования природных и техногенных катастроф. М.: Машиностроение, 2014. 732 с.

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ УРОВНЯ РАДИОЧАСТОТНЫХ ПОМЕХ ОТ МНОГОСПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ, ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА РАДИОАСТРОНОМИЧЕСКИЕ СТАНЦИИ

Иванкович Мария Владимировна

МТУСИ, и.о. зав. каф. ПССиТ, доцент, к.т.н., Москва, Россия

ivankovich@mail.ru

Кузнецов Никита Сергеевич

МТУСИ, магистрант, Москва, Россия

yknettt@mail.ru

Аннотация

Рассмотрены типы помеховых электромагнитных воздействий, оказывающих негативное воздействие на полезный сигнал, принимаемый радиоастрономической станцией. Упомянуты причины происхождения радиочастотных помех, а также проблема применения существующих стандартов ЭМС. Рассмотрены существующие методы снижения уровня радиочастотных помех: Упреждающие меры, метод пространственной фильтрации, метод адаптивного шумоподавления, метод антисовпадений, частотно-временной метод гашения помехи.

Ключевые слова

Электромагнитная совместимость, многоспутниковые системы связи широкополосного доступа, радиоастрономические станции, методы ЭМС, стандарты ЭМС.

Введение

С 2019 года количество спутников неуклонно растет, с менее чем 2000 активных спутников в 2018 году до более чем 8000 к августу 2024 года. Такое резкое увеличение плотности космических аппаратов на орбитах стало сказываться на исследованиях, проводимых в радиоастрономических обсерваториях. Несколько обсерваторий сообщили об обнаружении электромагнитных воздействий исходящих от многоспутниковых систем связи [1, 2]. Выявленные электромагнитные воздействия делятся на два типа: непреднамеренное электромагнитное излучение (EMI – Electromagnetic Interference), помеховое излучение, формируемое нисходящими линиями связи многоспутниковых систем. EMI является электромагнитным излучением до 1 ГГц, присутствующим в любом электрическом устройстве или оборудовании, и возникает как продукт токовых контуров в импульсных источниках питания, а также при быстром переключении сигналов в печатных платах [3].

Стандарты ЭМС для наземных устройств устанавливаются международными органами, такими как комитет CISPR в рамках IEC (Международная электротехническая комиссия), [4]. Эти стандарты затем принимаются государствами и преобразуются в региональное законодательство и становятся законодательным требованием для производителей оборудования. Для космических миссий имеются собственные стандарты ЭМС: ГОСТ Р 56529-2015, [5]; NASA MFSC-SPEC-521, [6] или ESA ECSS-E-ST-20-7C, [7]. Основное использование этих типов стандартов заключается в том, чтобы при тестировании убедиться в самосовместимости космического аппарата. Это означает, что излучение бортовой электроники не создает помех приемникам или чувствительным приборам. А также для обеспечения совместимости с системой пусковой установки. Стандарты не учитывают того, что спутник может излучать относительно сильные сигналы EMI за пределами диапазонов, создавая помехи другим системам связи.

Защита радиоастрономических станций от нежелательных излучений является актуальной проблемой. В связи с этим в следующем разделе будут рассмотрены методы снижения уровня радиочастотных помех. Анализ существующих методов снижения радиочастотных помех послужит фундаментом для дальнейшего исследования помехового воздействия многоспутниковых систем связи на радиоастрономические станции и разработке мер по снижению их влияния для обеспечения совместной беспомеховой работы.

Методы снижения уровня радиочастотных помех

1. Упреждающие меры

Зона радиомолчания имеет различные размеры, которые варьируются в зависимости от рассматриваемой радиоастрономической системы. Например, Китайская радиоастрономическая обсерватория FAST (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope – Сферический телескоп с пятисотметровой апертурой)

имеет радиус зоны радиомолчания равный 30 км. Охраняемая территория разделена на три подзоны: зона ограничения ($R < 5$ км), центральная зона ($5 \text{ км} < R < 10 \text{ км}$), координационная зона ($10 \text{ км} < R < 30 \text{ км}$), рисунок 1, [8].

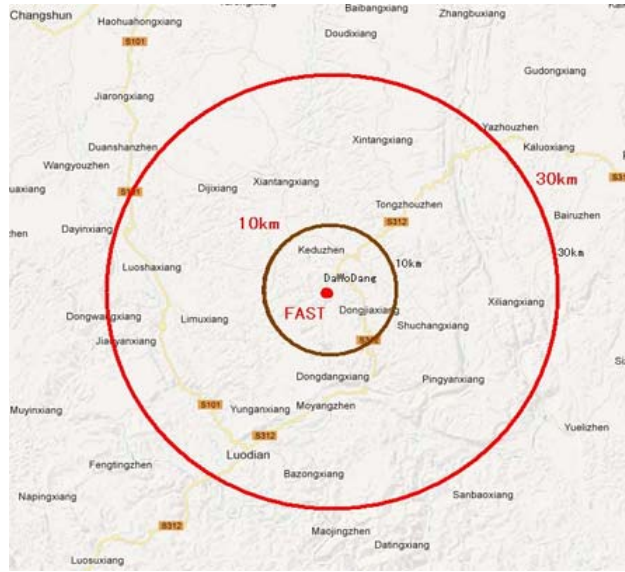


Рис. 1. Радиус зоны радиомолчания радиоастрономической обсерватории FAST

В пределах координационной зоны разрешается размещать передающие устройства, однако все передачи необходимо координировать с операторами телескопа. Проведение успешных координационных мероприятий поможет уменьшить частоту возникновения радиочастотных помех, так и ее влияние на наблюдения. Поскольку проблемы нежелательных помех лучше решать до их появления, важно определить существующие, так и новые передающие устройства. Следить за изменениями в местных правилах лицензирования и следовать им.

Помимо проблем с координированием действий, часто присутствует проблема формирования ЕМІ самой радиоастрономической станцией. Вычислительное оборудование и электронные установки, генерируют гармонические и широкополосные излучения, которые могут попасть в приемный тракт радиотелескопа. Использование экранированных шкафов и клеток фарадея для электроники и оборудования, а также дистанционное взаимодействие с антенной способствует тому, что обсерватория становится «радиотихой» [9, 10].

2. Метод пространственной фильтрации

Данный метод применим для радиоастрономических станций состоящих из линий параболических антенн (ССРТ, WSRT). Метод заключается в формировании нулей диаграммы направленности в направлении прихода радиочастотной помехи [11]. Направление прихода мешающего сигнала определяется с помощью временных задержек прихода сигнала между каждой из антенн (рис. 2).

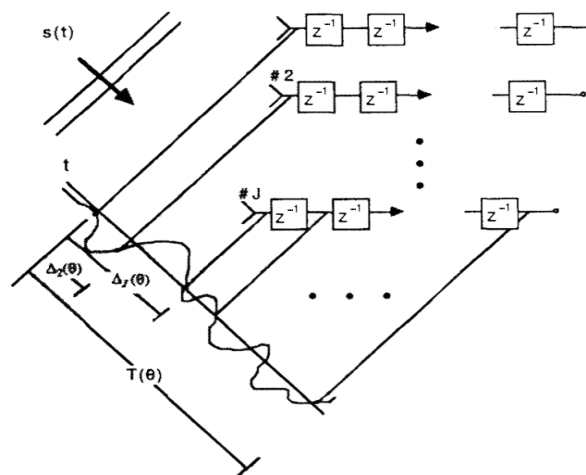


Рис. 2. Определение положения мешающего сигнала с помощью временных интервалов между антеннами

Полученный сигнал можно представить в виде произведения вектора весовых коэффициентов, с помощью которых формируется необходимая диаграмма направленности, и вектора принятого сигнала (на рисунке 3 представлена схема пространственной фильтрации [12]:

$$y(k) = W^H X(k) \quad (1)$$

где W – вектор весовых коэффициентов, X – вектор принятого сигнала.

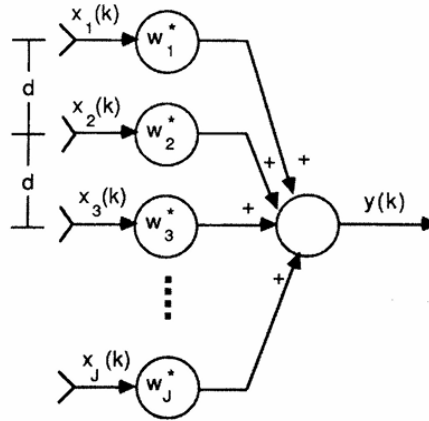


Рис. 3. Схема пространственной фильтрации

Для получения вектора весовых коэффициентов необходимо сформировать краткосрочные корреляционные оценки радиочастотных помех, [13]:

$$\hat{R} = \frac{1}{T} \sum_{n=KM}^{(k+1)M} x_n x_n^H \quad (1)$$

где M – количество краткосрочных выборок для усреднения результата, x – отсчеты входного сигнала.

Формула для определения вектора весовых коэффициентов выглядит следующим образом:

$$W = \hat{R}^{-1} V \quad (3)$$

где V – вектор направления прихода полезного сигнала.

В общем случае, такой метод требует высокого отношения INR (Interference-to-noise power ratio – отношение мощности сигнала помех к мощности шума в канале связи) и ограничен небольшим числом целей в виде радиочастотных помех, которые должны отслеживаться во время наблюдения.

3. Метод адаптивного шумоподавления (ANC)

Адаптивная система шумоподавления для использования с радиотелескопом представлена на рисунке 4.

Радиоастрономическая станция принимает как полезный сигнал (поступающего на основной лепесток диаграммы направленности), так и радиочастотную помеху (поступающую на боковые лепестки диаграммы направленности), [14]. Основной вход адаптивного фильтра представляет собой сумму этих двух сигналов $s(n) + i_p(n)$. Опорная антенна с низким коэффициентом усиления, которая принимает только радиочастотную помеху, подключается ко второму входу адаптивного фильтра. Опорная антенна направлена в сторону источника помех (спутник или в сторону горизонта). Площадь опорной антенны намного меньше, чем у основной антенны, и поэтому полезный сигнал практически отсутствует на опорной антенне адаптивного фильтра.

Задача адаптивного фильтра состоит в корреляционной оценке помех в опорном канале с помехами в основном канале. Адаптивный алгоритм сравнивает предыдущее решение с текущей информацией и отправляет обновленные коэффициенты в цифровой фильтр. Цифровой фильтр использует эти коэффициенты для изменения $i_R(n)$ производя $y(n)$, который очень похож на помехи в основном канале. $y(n)$ вычитается из сигнала с основного входа для получения выходного сигнала с отсутствием радиочастотных помех, [15].

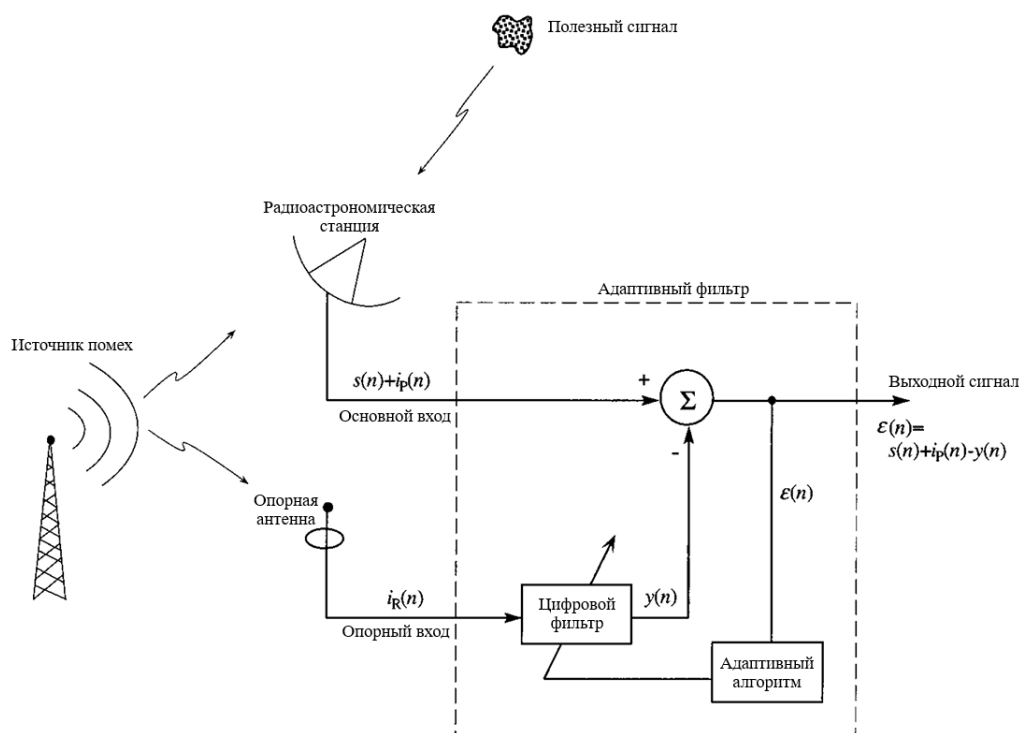


Рис. 4. Обработка сигнала методом адаптивного шумоподавления

Данный метод потенциально превосходит частотно-временной метод гашения помехи (будет рассмотрен в 5 пункте) в том смысле, что помеха удаляется без влияния на полезный сигнал. Однако, компромисс в отношении метода частотно-временного гашения помехи заключается в том, что подавление в этом методе зависит от качества оценки помехи получаемых радиоастрономической станцией.

4. Метод антисовпадений

Вместо того, чтобы смягчать радиочастотную помеху, метод антисовпадений обнаруживает ее присутствие в данных. Этот метод использует тот факт, что широко разнесенные антенны воспринимают астрономические сигналы одинаково, а сигналы радиочастотных помех по-разному.

В упрощенном виде данную схему можно представить в виде логического элемента исключающего или, рисунок 5.

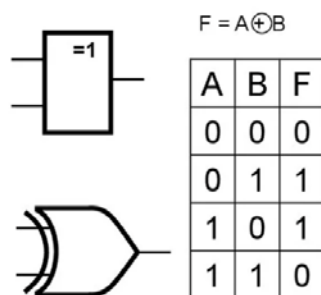


Рис. 5. Схема антисовпадений

Схема антисовпадений будет сигнализировать о наличии помехи при поступлении неперекрывающихся во времени сигналов на ее входы. Таким образом данная схема позволяет отбросить случайные (некоррелированные) события, [16, 17]. Чтобы исключить радиочастотные помехи, необходимо иметь возможность определять одновременность прихода сигнала от объекта к объекту, что требует точного метода измерения времени. Это обеспечивается системой глобального позиционирования (GPS).

В зависимости от диапазона частот радиочастотных помех, может потребоваться расстояние между антеннами порядка сотен километров, это является главным минусом этого метода, за исключением редких случаев, когда похожие телескопы уже разнесены соответствующим образом и имеют одно и тоже наведение.

5. Частотно-временной метод гашения помехи

Метод основан на выполнении быстрого преобразования Фурье (БПФ). Первоначально устанавливается необходимый размер окна БПФ (длительность БПФ), что определяет количество операций БПФ в схеме. Например, если длительность принятого сигнала составляет 25 мс, а размер окна 50 мкс, то необходимо последовательно выполнить 500 операций БПФ. Для каждого выходного значения преобразования устанавливается пороговое значение, если накопленная энергия в полосе превышает пороговое значение, то этот частотный интервал исключается для этого блока БПФ. Схема данного метода изображена на рисунке 6.

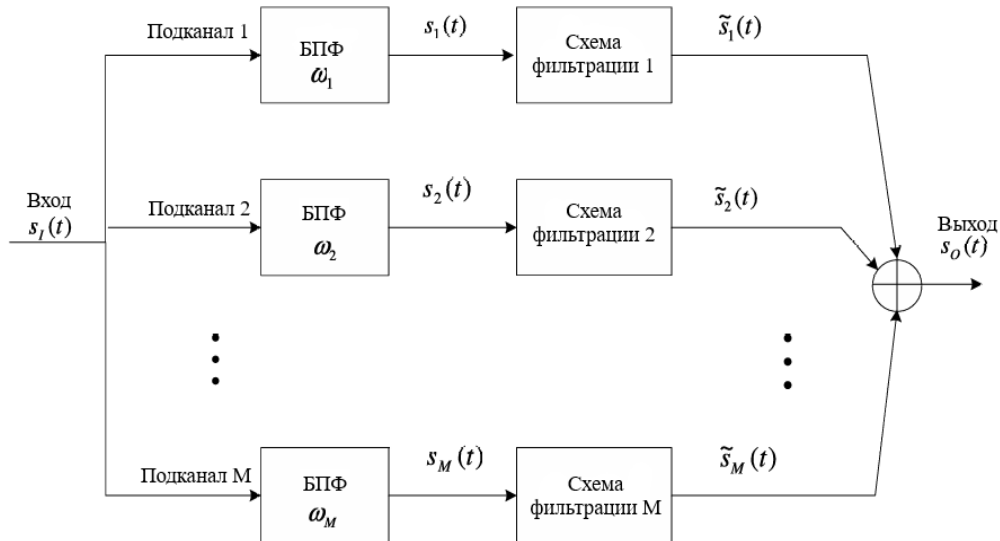


Рис. 6. Схема частотно-временного метода гашения помехи

Входной сигнал разделяется на M подканалов с помощью массива полосовых фильтров, затем обнаружение помех и их гашение выполняется отдельно в каждом подканале исходной полосы частот [18].

Главным минусом этого метода является потеря полезных данных с возможным искажением, оставшихся артефактами, внесенными в процессе обработки сигнала. Такая проблема имеется из-за сложности подбора оптимального порогового значения обнаружения помехи и длительности окна БПФ.

6. Обмен данными в реальном времени

Радиоастрономические станции все больше и больше стали подвержены влиянию передающих устройств, расположенных на космических аппаратах. Особенно сильное влияние оказывают спутниковые группировки расположенные на низкой околоземной орбите из-за их высоты орбиты и увеличивающейся плотности космических аппаратов, нисходящие передачи становятся постоянными и их все труднее избежать с помощью простого планирования, даже если они расположены в самых отдаленных регионах Земли. Были проведены скоординированные эксперименты между радиоастрономической станцией GBT (Green Bank Telescope) и спутниковой группировкой Starlink [19]. В результате серии экспериментов были попытки по уменьшению негативного воздействия нисходящих лучей спутниковой группировки на радиоастрономическую станцию, в конечном итоге был принят метод Обмена данными в реальном времени (ODS – Operational data sharing). Метод заключается в предоставлении информации о наведении и полосе пропускания станции спутниковой группировке. Основываясь на этой информации, расположенные в непосредственной близости и предоставляющие потенциальные помехи спутники уменьшают мощность нисходящих лучей.

Заключение

Данный анализ позволил рассмотреть существующие методы снижения уровня радиочастотных помех, а также их прикладное назначение в обеспечении защиты полезных сигналов, принимаемых радиоастрономической станцией.

Методы смягчения радиочастотных помех позволяют обеспечить оптимальный прием полезного сигнала. Однако еще предстоит разработать технологию, которая могла бы быть практичной и применимой во многих сценариях использования, а также обеспечивала бы целостность полученных данных при исследовании.

Очевидно, что технология подавления помех не может рассматриваться как автономное решение от внешних радиочастотных помех, с которыми могут столкнуться современные радиоастрономические станции. Эффективность того или иного выбранного метода будет зависеть от: архитектуры радиоастрономической станции или ее конфигурации для конкретного наблюдения, режима наблюдения, характера радиочастотной помехи, наличие необходимых вычислительных ресурсов для реализации сложных алгоритмов.

На рынок выходят новые телекоммуникационные технологии, многие из которых представлены в виде мобильных устройств. Поскольку их постоянно меняющееся местоположение невозможно контролировать. Сигналы, исходящие от таких устройств, сильно влияют на радиоастрономические станции. Активное развертывание широкополосных спутниковых систем, а также и узкополосных с прямым доступом на мобильное устройство (D2D – Direct-to-Device) требует более жестких критериев ЭМС учитывающих совместимость космических аппаратов с радиоастрономическими станциями. Так как существующие стандарты электромагнитной совместимости разработаны только для защиты подсистем внутри космического аппарата друг от друга или от системы запуска ракеты носителя.

Литература

1. *Di Vruno F. et al.* Unintended electromagnetic radiation from Starlink satellites detected with LOFAR between 110 and 188 MHz // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. Т. 676. С. A75.
2. *Grigg D. et al.* Detection of intended and unintended emissions from Starlink satellites in the SKA-Low frequency range, at the SKA-Low site, with an SKA-Low station analogue // *Astronomy & Astrophysics*. 2023. Т. 678. С. L6.
3. *Иванкович М.В., Кузнецов Н.С.* Проблема электромагнитного воздействия многоспутниковых систем связи на радиоастрономические станции // *Телекоммуникации и информационные технологии*. 2024. Т. 11. № 2. С. 142-148.
4. ИЕС [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iec.ch/>. (Дата обращения 20.01.2025).
5. ГОСТ Р 56529-2015. Совместимость космической техники электромагнитная. Общие требования и методы испытаний. М.: Стандартинформ. 2016. 73 с.
6. MFSC-SPEC-521. Electromagnetic compatibility requirements for equipment and subsystems. 2013, 75 p.
7. ECSS-E-ST-20-7C. Space engineering. Electromagnetic compatibility. 2012, 91 p.
8. *Zhang H., Chen Z., Li B., Chen M. et al.* Radio Quiet Zones in China // XXXIth URSI General Assembly and Scientific Symposium. 2014. P. 1-3.
9. *Gerhard P. Swart, Peter E. Dewdney, Andrea Cremonini.* Highlights of the SKA1-Mid telescope architecture // *J. Astron. Telesc. Instrum. Syst.* 8(1) 011021 (24 January 2022) <https://doi.org/10.1117/1.JATIS.8.1.011021>.
10. *Rogers A.E.E., Pratap P., Carter J.C., Diaz M.* Radio frequency interference shielding and mitigation techniques for a sensitive search for the 327 MHz line of Deuterium, *Radio Science*. 2005. Vol. 40, No. 5.
11. *Van Veen B.D., Buckley K.M.* Beamforming: A versatile approach to spatial filtering, *IEEE Acoustic, Speech and Signal Processing*. 1988.
12. *Ellingson S.W., Hampson G.A.* A subspace-tracking approach to interference nulling for phased array-based radio telescopes. *IEEE Trans. Antenn. and Prop.* 2002. Vol. 50, 1, pp. 25-30.
13. *Boonstra A.J., Van Der Tol S.* Spatial filtering of interfering signals at the initial low frequency array (LOFAR) phased array test station. *Radio Sci.* 2005. Vol. 40, 5, RS5S09.
14. *Kesteven M.* Adaptive filters revisited: radio frequency interference mitigation in pulsar observations, *Radio Sci.* 2005. Vol. 40, 5, RS5S06.
15. *Barnbaum C., Bradley R.F.* A new approach to interference excision in radio astronomy: real-time adaptive cancellation, *A J* 116, 2598. 1998.
16. *Katz C.A.* A Survey for transient astronomical radio emission at 611 MHz, *PASA* 115, 675. 2003.
17. *Bhat N.D.R., Cordes J.M., Chatterjee S., Lazio T.J.W.* Radio frequency interference identification and mitigation using simultaneous dual frequency observations, *Radio Sci.*, Vol. 40, 5, RS5S14. 2005.
18. *Zheng Q., Zheng Y., Wilson S.G., Fisher J.R., Bradley R.F.* Excision of distance measuring equipment interference from radio astronomy signals, *AJ* 129, 2933. 2005.
19. *Nhan B.D., De Pree C.G., Iverson M., Gregory B. et al.* Toward spectrum coexistence: First demonstration of the effectiveness of boresight avoidance between the NRAO Green Bank Telescope and Starlink satellites. 2024, pp. 1-10.

АДАПТИВНАЯ ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ ЭФФЕКТОВ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В АТМОСФЕРНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЯХ СВЯЗИ

Топоровский Владимир Владимирович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, Москва, Россия
toporovskii_v@mail.ru

Галактионов Илья Владимирович

Московский Технический Университет Связи и Информатики, к.ф.-м.н., Москва, Россия

Аннотация

При создании атмосферных оптических линий связи возникает проблема с коррекцией турбулентности при передаче лазерного излучения ввиду наличия локальных флуктуаций показателя преломления. В работе предлагается использовать адаптивную оптическую систему замкнутого цикла на основе биморфного деформируемого для компенсации aberrаций волнового фронта диаметром 50 мм с 31 управляющим элементом и датчиком волнового фронта Шака-Гартмана для анализа характеристик лазерного излучения.

Ключевые слова

квантовые коммуникации, адаптивная оптика, корректор волнового фронта, лазерное излучение, квантовые битовые ошибки

Введение

Передача информации путём оптического излучения обладает неоспоримыми преимуществами над микроволновыми и радиочастотными системами. Именно поэтому сейчас является высокоперспективным создание оптических линий связи при помощи лазерного излучения, так как это позволяет увеличить полосу пропускания сигнала, обеспечить высокую стойкость к электромагнитным помехам [1, 2]. При этом обеспечение связи труднодоступных регионов может быть создана относительно лёгким способом, благодаря низкой трудоемкости размещении терминалов связи. Однако, распространение оптического лазерного излучения сопряжено с негативным воздействием турбулентной атмосферы из-за локальных флуктуаций показателя преломления. Это приводит к ряду нежелательных эффектов, таких как появление изменение интенсивности (мерцания) на мишени, перераспределение плотности мощности излучения на удаленном объекте. При возникновении данных эффектов возникает проблема с передачей сигнала, которые видятся в виде задержки скорости либо потере части информации. Снижение негативных эффектов при передаче лазерного излучения через турбулентную атмосферу может произведено путем использования различных методов как активных, так и пассивных. Первая группа методов зачастую ограничивается пространственным/временным разнесением и алгоритмизацией (кодированием сигналов) [3]. Ко второй категории методов относится когерентное сложение оптических пучков, а также методы и средства адаптивной оптики [4-6]. В современных исследованиях последний метод показал высокую эффективность и относительную простоту в реализованных системах атмосферной оптической связи [7].

Адаптивная оптическая система

Адаптивная оптика как направление в современной оптике, которое занимается разработкой и созданием систем для определения характеристик волнового фронта и управления его формой в режиме реального времени с целью коррекции фазовых искажений, а также повышения предела разрешения наблюдательных приборов, увеличения плотности мощности оптического потока в плоскости регистрации фотоприемного устройства или плоскости мишени и т.п. [9].

Впервые идея компенсировать волновой фронт пришла к Х.У. Бэбкоку, конструктору множества астрономических инструментов, в 1953 году [10]. Он предложил нанести на поверхность главного зеркала слой масла, чтобы корректировать в реальном времени искажения атмосферы путем изменения локальной толщины этого слоя при облучении электронным пучком.

Адаптивная оптическая система состоит из корректора волнового фронта, датчика для измерения искажений волнового фронта и системы управления, реализующей связь между датчиком и корректором. Принцип коррекции волнового фронта состоит в изменении профиля поверхности адаптивного зеркала таким образом, чтобы фазовое распределение излучения, отраженного от зеркала, соответствовало заданному (зачастую плоскому).

Схематически адаптивная оптическая система представлена на рисунке 1. Часть энергии, отраженной от корректора волнового фронта, ответвляется с помощью светоделительной пластины на датчик волнового фронта, анализирующий распределение фазы. Затем информация о волновом фронте, полученная с датчика, поступает в вычислительное устройство (например, персональный компьютер), после чего в программе выполняется расчет управляющих сигналов, необходимых для коррекции aberrаций оптического излучения. Подача сигналов осуществляется при помощи системы управления адаптивным зеркалом.

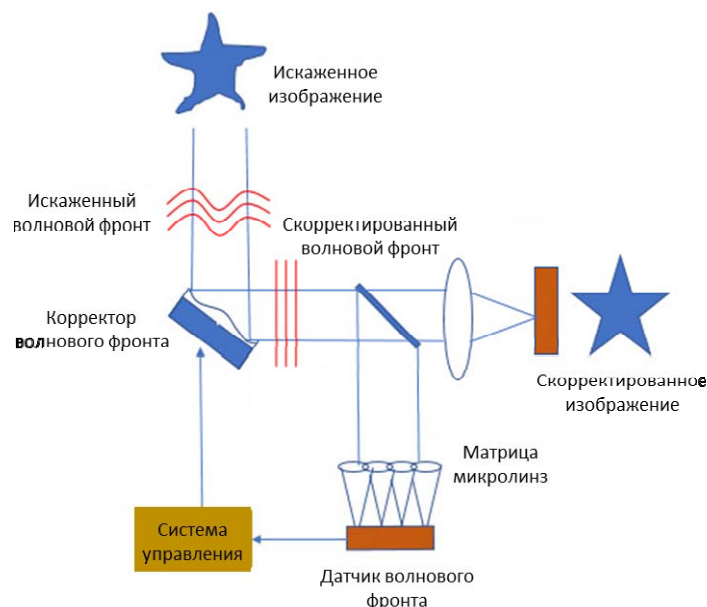


Рис. 1. Традиционная адаптивная оптическая система замкнутого цикла

Традиционно считается, что ключевым элементом адаптивной оптической схемы является корректор волнового фронта лазерного излучения, к которому предъявляются основные требования. На данный момент принято их разделять по двум крупным категориям: корректоры с сегментированной и сплошной поверхностью. Сегментированные представляют собой толстое основание, к которому прикрепляются управляющие элементы, далее к свободной стороне каждого из них устанавливается небольшая подложка с отражающим покрытием. Подобные корректоры волнового фронта обеспечивают коррекцию aberrаций волнового фронта лазерного излучения путем локального перемещения микрозеркала при помощи подачи управляющих напряжений на актюаторы такого деформируемого зеркала. Однако, ввиду наличия между подобными отражающими сегментами конструктивного зазора впоследствии можно наблюдать снижение качества коррекции aberrаций волнового фронта и потерю части излучения, которые вызваны эффектом дифракции на краях микрозеркал корректора. Существует два основных типа модификаций актюаторов для зеркал: зеркала могут иметь одну степень свободы (вверх-вниз) или три (включая наклон). Это улучшает пространственное разрешение зеркала и повышает эффективность коррекции лазерного излучения.

Корректоры с цельной зеркальной поверхностью обладают отражающей подложкой в виде единого элемента, под которым расположены управляющие актюаторы с определенным геометрическим распределением. Для изготовления подложки используются оптические материалы — монокристаллический кремний, стекло или медь с отражающим покрытием. На данный момент преимущественное количество корректоров волнового фронта используют сплошную отражающую поверхность. При подаче напряжения на актюаторы происходит локальная деформация отражающей подложки, позволяющая воссоздать необходимые формы поверхности. Потери оптической мощности в таких системах менее выражены, чем у сегментированных зеркал, однако необходимо учитывать влияние актюаторов друг на друга, что уменьшает деформацию отражающей поверхности. В некотором смысле это является недостатком в сравнении с корректорами сегментированного типа, где локальная деформация ограничена только параметрами управляющих элементов зеркала.

Увеличение областей использования лазерного излучения в качестве инструмента для задач обработки материалов, передачи информации, имэджинга и т.д. возрастает количество разновидностей управляющих оптических элементов, что приводит к расширению элементной базы адаптивной оптики.

На данный момент различают несколько типов корректоров волнового фронта лазерного излучения, характеризующиеся своими принципиальными отличиями, которые вызваны зачастую физическими принципами работы их управляющих элементов. В зависимости от области использования корректоры волнового

фронта могут иметь определенные достоинства и недостатки [11-30]. По принципу действия их можно разделить на: механические, мембранные, микроэлектромеханические (МЭМС), магнитострикционные, термомодеформируемые, пьезоактюаторные, биморфные, комбинированные зеркала (использующие несколько технологий одновременно), жидкокристаллические модуляторы света, устройства с матрицей микрозеркал (DMD-технология).

Каждый из типов корректоров волнового фронта имеет свои уникальные характеристики, которые делают их более подходящими для определенных задач. Например, механические корректоры часто используются в системах, где требуется высокая стабильность и простота конструкции. Их недостатком может быть медленная реакция на изменения, что ограничивает их применение в динамических условиях. Мембранные корректоры, напротив, предлагают большую гибкость и быструю реакцию, что делает их идеальными для систем, где требуется высокая частота коррекции.

Микроэлектромеханические системы (МЭМС) становятся все более популярными благодаря своей миниатюризации и способности обеспечивать значительную точность компенсации искажений волнового фронта. Они находят применение в оптике и лазерных технологиях, где компактные размеры и высокая производительность критичны. Однако их стоимость и сложность производства могут быть препятствием для широкого внедрения.

Комбинированные типы, использующие несколько технологий, могут предоставить наилучшие характеристики для специализированных применений. Они позволяют комбинировать преимущества различных систем, таких как высокое разрешение и быстродействие, что является ключевым аспектом в современных оптических устройствах.

Корректоры волнового фронта имеют апертуру порядка нескольких миллиметров как, например, МЭМС-зеркала или ЖК-модуляторы света (5-20 мм). В то время как другие имеют диаметр в несколько десятков сантиметров. К примеру, пьезоэлектрические или магнитострикционные корректоры достигают размеров до 500 мм. Зеркала с большой апертурой также могут быть использованы как вторичные зеркала в астрономических телескопах (иногда даже как первичные). В большинстве случаев отражающая поверхность имеет круглую форму, хотя иногда используются подложки прямоугольной формы.

Количество актюаторов определяет возможное число степеней свободы гибкого зеркала для деформации поверхности отражающей подложки. В случае коррекции аберраций волнового фронта в мощных лазерных установках иногда бывает достаточно 13 управляющих элементов, так как в пучке преобладают крупномасштабные флуктуации фазы (дефокусировка, астигматизмы, комы). Из-за значительного влияния мелкомасштабных аберраций (параметр Фрида увеличивается) для больших астрономических телескопов требуются адаптивные системы с сотнями или тысячами исполнительных элементов. Это вызвано необходимостью уменьшения соотношения между апертурой зеркала и величиной параметра Фрида (D/r_0), т.е. увеличения плотности расположения управляющих элементов.

Расстояние между исполнительными элементами определяет плотность расположения актюаторов на апертуре корректора волнового фронта (пространственное разрешение). Некоторые технологии производства корректоров позволяют разместить на апертуре большое количество управляющих элементов при относительно малом диаметре (это, например, характерно для МЭМС-технологии). В то же время в случае деформируемых зеркал небольшого размера со сплошной отражающей поверхностью малое расстояние между исполнительными элементами может в значительной степени снизить максимальную локальную деформацию поверхности подложки, так как каждый актюатор будет иметь влияние на соседний. Для больших зеркал расстояние между исполнительными элементами не имеет столь критического влияния, поэтому оно может составлять от нескольких миллиметров до нескольких сантиметров.

В отдельных случаях в конструкции корректоров волнового фронта необходимо предусмотреть наличие охлаждения. Причем рассматривать стоит два вида охлаждения: охлаждение актюаторов, так как в некоторых корректорах волнового фронта разогреваются управляющие элементы (например, как в деформируемых зеркалах на основе постоянных магнитов), а также охлаждение отражающей поверхности, что характерно при работе с источниками излучения с высокой средней мощностью (от 100 Вт), так как часть излучения поглощается, что может привести к выходу из строя корректора. Активные системы охлаждения (с применением вентиляторов, нагнетателей охлаждающих жидкостей) значительно усложняют конструкцию, а также создают риск потери герметичности каналов охлаждения, что может привести к выходу из строя корректирующего элемента. Более того, поток жидкости вносит дополнительные вибрационные колебания с амплитудой порядка десятков нанометров.

Для корректоров волнового фронта важным показателем является величина деформации поверхности под действием одного управляющего элемента. Она определяет максимальные искажения волнового фронта, которые могут быть скомпенсированы при помощи корректора, и, как правило, не превышает нескольких десятков микрометров.

Для некоторых видов корректоров волнового фронта (биморфные, зеркала пьезоактюаторного типа) возникает необходимость учитывать гистерезис пьезокерамики и так называемое явление «дрейфа» (нежелательное изменение в параметрах перемещения со временем). Эти эффекты приводят к снижению точности коррекции aberrаций.

В данной работе предлагается использовать биморфное деформируемое зеркало в качестве корректора волнового фронта лазерного излучения.

Атмосферный оптический канал связи с коррекцией искажений лазерного излучения биморфным деформируемым зеркалом

Коррекция aberrаций волнового фронта на экспериментальном лабораторном стенде будет осуществлена при помощи адаптивной оптической системы замкнутого цикла, принципиальная схема которой представлена на рисунке 2. В данной системе используется излучение от двух лазерных источников: 1550 нм – для передачи основного излучения, и ослабленное излучение в 830 нм, которое используется для анализа характеристик вносимой турбулентности на датчик волнового фронта Шака-Гартмана, так как чувствительность сенсора лежит в диапазоне частот от 400-1100 нм. Для коррекции aberrаций волнового фронта лазерного излучения применялось пьезоэлектрическое деформируемое зеркало биморфного типа 50 мм с 31 электродом. Оценка эффективности коррекции фазовых флуктуаций оценивалась путем анализа сигнала на принимающем волокне, которое было сопряжено с измерителем мощности.

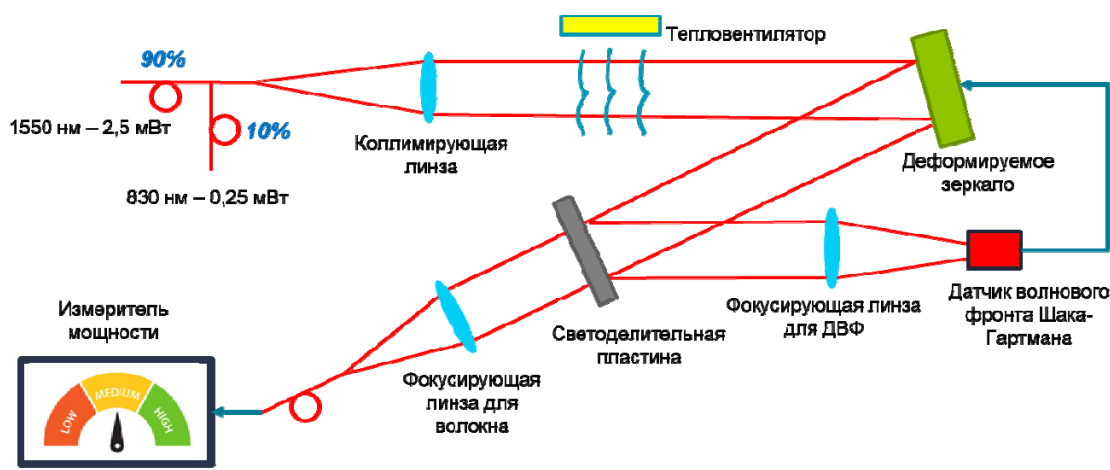
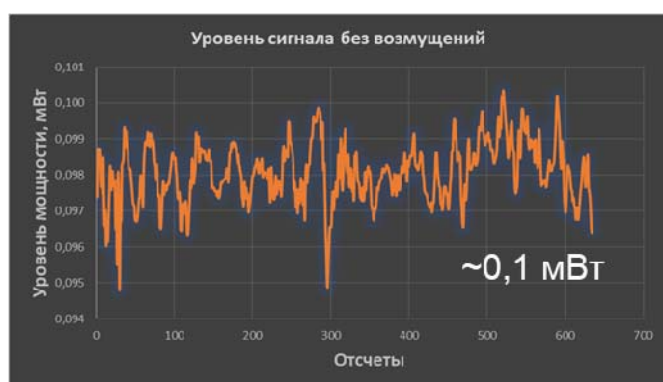


Рис. 2. Принципиальная схема атмосфера оптического канала связи для физического моделирования передачи лазерного излучения

Данная система была протестирована в трех режимах: без коррекции (рис. 3а), при внесении искусственной турбулентности при помощи тепловентилятора (рис. 3б) и при коррекции aberrаций волнового фронта при помощи деформируемого зеркала биморфного типа (рис. 3в).



а)



б)

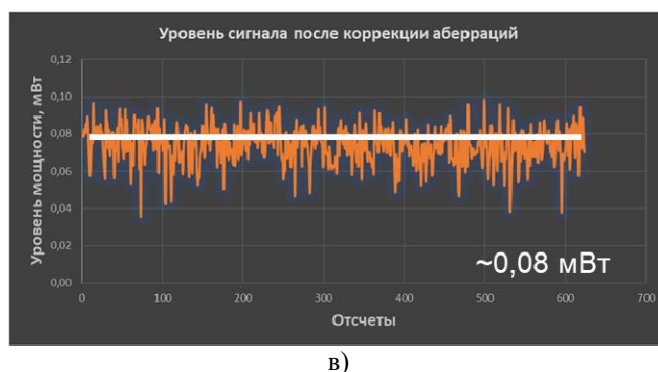


Рис. 3. Динамика изменения уровня интенсивности на анализаторе мощности:

а) без возмущений; б) с возмущениями; в) после коррекций биморфным деформируемым зеркалом

Заключение

В работе представлена адаптивная оптическая система замкнутого цикла для компенсации искажений лазерного излучения, где в качестве корректора волнового фронта предлагается использовать биморфное деформируемое зеркало диаметром 50 мм. В качестве анализирующего излучения был использован лазер с длиной волны 830 нм, так как чувствительность сенсора лежит в диапазоне частот от 400-1100 нм. Основным источником излучения являлся диодный лазер длиной волны 1550 нм с волоконным выводом. Эффективность коррекции осуществлялась при помощи оценки уровня сигнала на анализаторе мощности, сопряженным с принимающим волокном. Была продемонстрирована возможность коррекции аберраций волнового фронта, что позволило увеличить эффективность передачи лазерного излучения на 20% и обеспечило стабилизацию сигнала на измерителе мощности.

Литература

1. Qu Z., Djordjevic I.B. 500 Gb/s free-space optical transmission over strong atmospheric turbulence channels // Optics Letters, vol. 41, pp. 3285-3288, 2016.
2. Li Z., Cao J., Zhao X., Liu W. Combinational-deformable-mirror adaptive optics system for atmospheric compensation in free space communication // Optics Communications, vol. 320, pp. 162-168, 2014.
3. Churnside J. Aperture averaging of optical scintillation in the turbulent atmosphere // Appl. Opt., vol. 30, pp. 1982-1994, 1991.
4. Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., et.al. Robust stack-array deformable mirror for laser beam control // Proc. SPIE, vol. 11987, pp. 119870M, 2022.
5. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I. et al. Wide-Aperture Bimorph Deformable Mirror for Beam Focusing in 4.2 PW Ti:Sa Laser // Appl. Sci., vol. 12, pp. 1144, 2022.
6. Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Galaktionov I., Panich A., Malykhin A. Investigation of PZT Materials for Reliable Piezostack Deformable Mirror with Modular Design // Micromachines, vol. 14, pp. 2004, 2023.
7. Wang Y., Xu H., Li D., Wang R., Jin C., Yin X., Gao S., Mu Q., Xuan L., Cao Z. Performance analysis of an adaptive optics system for free-space optics communication through atmospheric turbulence // Scientific Reports, vol. 8, pp. 1124, 2018.
8. Rukosuev A., Nikitin A., Belousov V., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A. Expansion of the Laser Beam Wavefront in Terms of Zernike Polynomials in the Problem of Turbulence Testing // Appl. Sci., vol. 11, pp. 12112, 2021.
9. Воронцов М.А., Шмальгаузен В.И. Принципы адаптивной оптики. М.: Наука, 1985. 336 с.
10. Babcock H.W. The possibility of compensating astronomical seeing // Publications of the Astronomical Society of the Pacific. 1953. V. 65. P. 89-98.
11. Топоровский В.В., Кудряшов А.В., Самаркин В.В. и др. Модульное пьезоэлектрическое деформируемое зеркало из актюаторных линеек // Наука, техника, педагогика высшей школы. Новые технологии = Science, Engineering, Higher Education Pedagogics. New Technologies, Москва, 01-04 марта 2022 года / Материалы Всероссийской научно-практической конференции. М.: Московский политехнический университет, 2022. С. 93-99.
12. Samarkin V., Alexandrov A., Galaktionov I., Kudryashov A., Nikitin A., Rukosuev A., Toporovsky V., Sheldakova J. Wide-Aperture Bimorph Deformable Mirror for Beam Focusing in 4.2 PW Ti:Sa Laser // Appl. Sci. 2022. V. 12. P. 1144.
13. Samarkin V.V., Alexandrov A.G., Galaktionov I.V., Kudryashov A.V., Nikitin A.N., Rukosuev A.L., Toporovsky V.V., Sheldakova Yu.V. Large-aperture adaptive optical system for correcting wavefront distortions of a petawatt Ti:sapphire laser beam // Quantum Electronics. 2022. V. 52. P. 187-194.
14. Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Panich A., Sokallo A., Malykhin A., Sheldakova J. Robust stack-array deformable mirror for laser beam control // Proc. SPIE. 2022. V. 11987. P. 119870M.
15. Toporovsky V., Samarkin V., Kudryashov A., Alexandrov A., Galaktionov I., Nikitin A., Rukosuev A., Sheldakova J. Wide-aperture deformable mirror for correcting and improving focusing of multi-petawatt Ti:Sa laser beam // Proc. SPIE.

2022. V. 11987. P. 119870F.

16. *Toporovsky V., Lyuy P., Denisov D., Zolotukhina A., Nikitin A., Kudryashov A.* The method of designing an optical-electronic imaging system for correcting the parameters of the wavefront of laser radiation transmitted through a turbulent atmosphere // *Proc. SPIE*. 2022. V. 11987. P.119870N.

17. *Galaktionov I., Nikitin A., Sheldakova J., Toporovsky V., Kudryashov A.* Focusing of a Laser Beam Passed through a Moderately Scattering Medium Using Phase-Only Spatial Light Modulator // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 296.

18. *Toporovsky V., Kudryashov A., Skvortsov A., Rukosuev A., Samarkin V., Galaktionov I.* State-of-the-Art Technologies in Piezoelectric Deformable Mirror Design // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 321.

19. *Rukosuev A., Nikitin A., Toporovsky V., Sheldakova J., Kudryashov A.* Real-Time Correction of a Laser Beam Wavefront Distorted by an Artificial Turbulent Heated Airflow // *Photonics*. 2022. V. 9. P. 351.

20. *Toporovsky V.V., Kudryashov A.V., Skvortsov A.A., Samarkin V.V., Sheldakova J.V., Rukosuev A.L.* Nanotechnology for Creating Modern Piezoelectric Wavefront Correctors // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. 2022. V. 86. P. 733-737.

21. *Varkentina N., Dovillaire G., Legrand J., Beaugrand G., Stefanon I., Treimany P., Levecq X.* New adaptive optics control strategy for petawatt-class laser chains // *Quantum Electronics*. 2017. V. 47. №8. P. 711-717.

22. *Yellin M.* Using membrane mirror in adaptive optics // *Proc. of SPIE*. 1976. V. 75. P. 97-102.

23. *Dyson H.M., Sharples R.M., Dipper N.A., Vdovin G.V.* Cryogenic wavefront correction using membrane deformable mirrors // *Opt. Express*. 2001. V. 8. P. 17-26.

24. *Vdovin G., Sarro P.M.* Flexible mirror micromachined in silicon // *Applied Optics*. 1995. V. 34. №16. P. 2968-2972.

25. *Bifano T.* MEMS deformable mirrors // *Nature Photonics*. 2011. V. 5. P. 21-23.

26. *Cornelissen S.A., Hartzell A.L., Stewart J.B., Bifano T.G., Bierden P.A.* MEMS deformable mirrors for astronomical adaptive optics // *Proc. of SPIE*. 2010. V. 7736. 77362D.

27. *Helmbrecht M.A., He M., Kempf C.J., Besse M.* MEMS DM development at Iris AO, Inc. // *Proc. of SPIE*. 2011. V. 7931. 793108.

28. *Cornelissen S.A., Bifano T.G., Bierden P.A.* MEMS deformable mirror actuators with enhanced reliability // *Proc. of SPIE*. 2012. V. 8253. 825306.

29. *Hartzell A.L., Cornelissen S.A., Bierden P.A., Lam C.V., Davis D.F.* Reliability of MEMS deformable mirror technology used in adaptive optics imaging systems // *Proc. of SPIE*. 2010. V. 7595. 75950B.

30. *Van Spengen W.M.* MEMS reliability from a failure mechanisms perspective // *Microelectron. Reliab.* 2003. V. 43. №7. P. 1049-1060.

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ЗАРУБЕЖНЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ КАЧЕСТВА ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Цветков Вячеслав Эдуардович

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», аспирант, Москва, Россия
vetsvetkov@edu.hse.ru

Ландер Леонид Борисович

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», аспирант, Москва, Россия
lblander@edu.hse.ru

Буцкий Дмитрий Олегович

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
dobutskiy_1@edu.hse.ru

Зубрильцев Егор Евгеньевич

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, Россия
eezubriltssev@edu.hse.ru

Королев Павел Сергеевич

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», доцент, к.т.н., Москва, Россия
pskorolev@hse.ru

Аннотация

В работе приведён анализ подходов ведущих стран мира к оценке качества проектирования и производства электронных модулей (ЭМ) телекоммуникационных систем и радиотехнических устройств (РУ). Рассмотрены методы оценки надёжности (безотказности) ЭМ от первого уровня и выше в соответствии с российским, американским и французским национальными стандартами. Также в работе предложена оригинальная дифференциальная методика оценки качества производства телекоммуникационных систем, учитывающая не только качество технологического процесса, но и показатели эффективности функционирования системы менеджмента качества (СМК) предприятия-изготовителя РУ.

Ключевые слова

Электронный модуль, радиотехническое устройство, надёжность, безотказность, система менеджмента качества, коэффициент качества производства.

Введение

Развитие инфокоммуникационных технологий по всему миру в течение последнего столетия способствовало значительному росту спроса на производство качественных и надёжных телекоммуникационных устройств, чья безотказность определяется показателями надёжности составляющих их ЭМ.

Однако, в настоящее время можно наблюдать существенное различие между рассчитанными на этапе проектирования ЭМ показателями надёжности и реальной статистикой отказов составных частей систем, возникающих в ходе эксплуатации телекоммуникационных устройств [1]. Подобное различие в показателях надёжности свидетельствует о том, что применяемые методы оценки показателей надёжности ЭМ не удовлетворяют уровню непрерывно совершенствующихся технологий электронно-компонентной базы (ЭКБ), что соответственно приводит к существенной разнице между прогнозируемой оценкой надёжности на ранних этапах проектирования РУ телекоммуникационных систем и фактической на этапе производства ЭМ.

Целью работы является повышение достоверности количественной оценки показателей надёжности ЭМ, учитывая не только качество налаженного технологического процесса организации-исполнителя, но и СМК предприятия. С этой целью были изучены различные математические модели – подходы к расчёту показателей безотказности телекоммуникационной аппаратуры для возможных категорий отказов инфокоммуникационных устройств.

В ходе данной работы проанализированы методы оценки показателей надёжности двух стран-лидеров в сфере надёжности, а именно – США и Франции. Применяемые в них подходы к расчёту показателей безотказности электронной аппаратуры послужат основой для разработки собственного метода оценки. После

этого будет предложена оригинальная методика расчёта качества производства ЭМ инфокоммуникационных систем, учитывающая преимущества и недостатки национальных стандартов расчёта показателей надёжности. В тексте будет приведена её структура и соответствующая математическая модель.

Анализ методов оценки надёжности электронных модулей первого уровня в справочниках RIAC-HDBK-217Plus и FIDES Guide 2009

Одной из ключевых задач на ранних стадиях проектирования РУ является проведение расчётов показателей надёжности электронных модулей. Обеспечить требуемый уровень достоверности этой оценки невозможно без справочной информации о значениях характеристик электрорадиоизделий (ЭРИ).

Основной характеристикой, используемой для оценки отказоустойчивости РУ является интенсивность отказов РУ λ_p . В американском справочнике RIAC-HDBK-217Plus [3] приведены следующие формулы (1)-(2), составляющие математическую модель расчёта λ_p .

$$\lambda_p = \lambda_{IA} K_A + \lambda_{SW} \quad (1)$$

$$K_A = (\Pi_p \Pi_{IM} \Pi_E + \Pi_D \Pi_G + \Pi_M \Pi_{IM} \Pi_E \Pi_G + \Pi_S \Pi_G + \Pi_I + \Pi_N + \Pi_W) \quad (2)$$

где λ_{IA} – первоначальная оценка интенсивности отказов; λ_{SW} – первоначальная оценка интенсивности отказов ПО; K_A – коэффициент качества производства, а $\Pi_p, \Pi_{IM}, \Pi_E, \Pi_D, \Pi_G, \Pi_M, \Pi_S, \Pi_I, \Pi_N, \Pi_W$ – коэффициенты, учитывающие различные категории отказов ЭРИ.

Каждый коэффициент Π_i может быть рассчитан по формулам (3)-(4):

$$\Pi_i = \alpha_i (-\ln(R_i))^{\frac{1}{\beta_i}} \quad (3)$$

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} G_{ij} W_{ij}}{\sum_{j=1}^{n_i} W_{ij}} \quad (4)$$

где α_i и β_i – константы для каждого вида отказов, численные значения которых представлены в [3]; R_i – рейтинг процесса для i -го вида отказов, принимающий значения от 0 до 1; G_{ij} – оценка от 0 до 1 для j -го элемента i -го вида отказа; W_{ij} – вес j -го элемента i -го вида отказа; n_i – количество критериев оценивания i -го вида отказа.

Сами же вопросы в опроснике, из которого берутся варианты ответов и их веса, представлены следующим образом (рис. 1).

Вопрос	Вариант ответа	Вес
Были ли определены ответственные специалисты для поддержки ключевых технологий и специализированных областей, таких как оптоэлектроника, управление сервоприводами, проектирование интегральных схем (ASIC) и др., для обеспечения руководства и поддержки программы?	Да = 1, Нет = 0	7
Сколько (0, 1, 2, 3) целей программы по затратам, графику и надёжности менеджер успешно достиг в последней программе, за которую он/она отвечал(а)?	3 = 1, 2 = 5, 1 = 25, 0 = 0	10

Рис. 1. Примеры вопросов из опросника для определения коэффициента качества производства из справочника RIAC-HDBK-217Plus

В статье [4], которая базируется на французском справочнике FIDES Guide 2009, приведена иная математическая модель расчёта интенсивности отказов РУ λ , описываемая выражениями (5)-(6).

$$\lambda = \Pi_{PM} \Pi_{Process} \lambda_{Phy} \quad (5)$$

$$\lambda_{phy} = \sum_{i=1}^{Phase} \left[\frac{t_{annual}}{8760} \right] \Pi_i \lambda_i \quad (6)$$

где Π_{PM} Π_{PM} – коэффициент, учитывающий влияние контроля и качества производства; $\Pi_{Process}$ $\Pi_{Process}$ – коэффициент, учитывающий все процессы, начиная от создания спецификации и заканчивая эксплуатацией и обслуживанием; λ_{Phy} λ_{Phy} – оценка интенсивности отказов физического воздействия с учетом профиля миссии, где t_{annual} t_{annual} – продолжительность i-ой фазы в течение одного года; Π_i Π_i – коэффициент, учитывающий электрические, механические и тепловые перегрузки; λ_i – интенсивность отказов, которая соответствует каждому профилю миссии.

Французский опросник, в отличие от американского, применяется для подсчета надежности всех ЭРИ. Он так же состоит из семи факторов, для каждого из которых есть отдельный сборник вопросов с уже рекомендованными весами, однако тут представлен другой набор критериев, при этом у них есть стандартное распределение по весам (рис. 2).

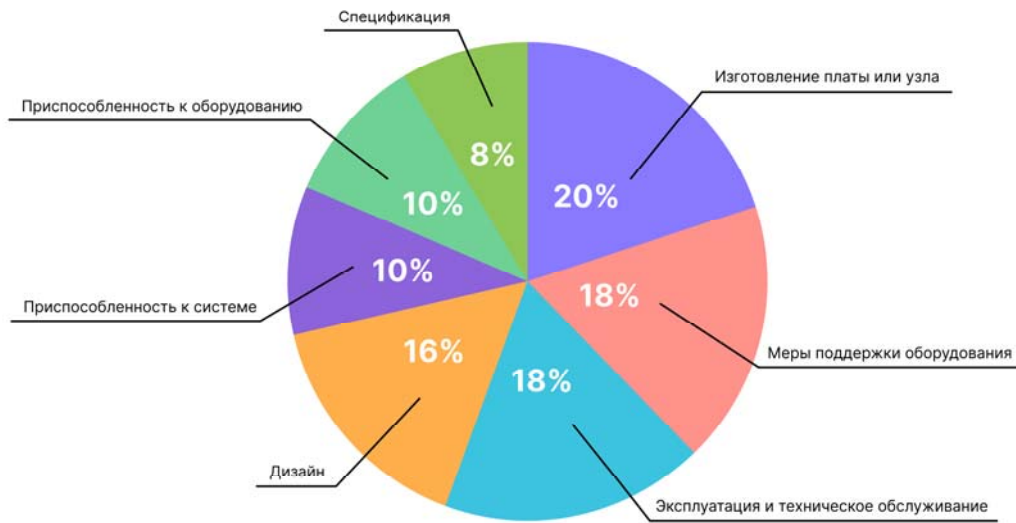


Рис. 2. Распределение весовых значений для факторов, которые учитываются при подсчёте коэффициента качества РУ в справочнике FIDES Guide 2009

Веса могут перераспределяться в зависимости от конкретного ЭРИ или РУ, к примеру – для радиооборудования нет смысла учитывать приспособленность к системе, поэтому вес данного параметра можно переложить на ближайшего по смыслу – приспособленность к оборудованию. Также в случаях, когда не один подрядчик работает над фактором, а, допустим, две компании разрабатывали меры поддержки оборудования, то выбирается худший результат аудита, проведенного в этих компаниях.

Π_{PM} Π_{PM} определяется следующими формулами (7)-(8):

$$\Pi_{PM} = e^{\delta_1 (1 - Part_Grade) - \alpha_1} \quad (7)$$

$$Part_Grade = \frac{(QM + QA + RA)}{36} * \varepsilon \quad (8)$$

где δ_1 и α_1 – коэффициенты корреляции, которые определяют степень влияния Π_{PM} Π_{PM} на итоговую оценку надежности, константы; ε – опыт взаимодействия покупателя товара со своим поставщиком; QM $QM_{manufacturer}$ – гарантия качества производителя; QA QA_{item} – гарантия качества товара; RA $RA_{component}$ – обеспечение надежности компонентов. Все вышеперечисленные коэффициенты уникальны для каждого ЭРИ и РУ и уже описаны в справочнике, компании надо только выбрать подходящий вариант.

$\Pi_{Process}$ $\Pi_{Process}$ вычисляется следующим образом (9)-(10):

$$\Pi_{Process} = e^{\delta_2 (1 - Process_Grade)} \quad (9)$$

$$Process_Grade = \sum_{i=1}^7 (C_P_i * \frac{A_M_i}{M_A_M_i}) \quad (10)$$

где δ_2 – коэффициент корреляции, который определяют степень влияния $P_{Process}$ на итоговую оценку надежности, константа; C_P_i – вес фактора из рисунка 2; A_M_i и $M_A_M_i$ – оценка по итогу аудита, проведенного по определённому фактору, и максимальная оценка за этот аудит соответственно.

Оценка за аудит по конкретному фактору производства складывается из суммы итоговых весов всех рекомендаций, относящихся к данному фактору. А итоговый вес в свою очередь формируется из рекомендованного веса рекомендации, умноженного на коэффициент качества её исполнения, варьирующееся от 0 до 3.

В FIDES Guide 2009 рекомендации, вопросы и их рекомендованные веса представлены в следующем виде (рис. 3).

Номер	Рекомендация	Вопрос	Рекомендованный вес
1	Выделить ресурсы в виде персонала и средств для исследований надежности.	Есть ли финансируемый элемент для исследований надежности? Определены ли необходимые средства и персонал?	10.7

Рис. 3. Пример вопроса из опросника для определения коэффициента $P_{Process}$ из справочника FIDES Guide 2009

Разработанная уточненная методика оценки коэффициента качества производства

Основным параметром при расчёте показателей надёжности телекоммуникационных систем является коэффициент качества производства РУ. Рассмотрим недостатки данного коэффициента, представленного в российском справочнике «Надёжность ЭРИ 2006» [2].

Существенной проблемой является отсутствие корреляции между его значением и показателями эффективности и организации принятия управленческих решений руководством предприятия-изготовителя несмотря на то, что в ГОСТ Р МЭК 60300-1-2017 [5] закреплён перечень производственных процессов, недостаточная организация которых может нанести серьёзный удар по качеству изготавливаемых ЭМ и РУ в целом, значительно ухудшив их показатели надёжности.

В оборонной промышленности коэффициент качества производства РУ, предлагаемый российским справочником, не находит своего применения в силу того, что при оценке показателей надёжности РУ его значение всегда принимается равным единице, как бы не было организовано управление производственными процессами предприятия-изготовителя. Таким образом, влияние данного параметра на результаты расчёта отказоустойчивости телекоммуникационных систем обесценивается [6].

Также стоит заметить, что существенные недостатки имеются и в справочниках американцев и французов. По итогу подсчета качества надёжности ЭРИ или РУ, компания-заказчик не получит точную информацию, на каком моменте жизненного цикла изделия произошла ошибка, какая именно компания-исполнитель виновна, какие меры надо принять; хоть и стоит отметить, что французский FIDES гораздо ближе подобрался к выполнению данных задач, чем его конкуренты, но с его помощью можно сделать лишь косвенные выводы.

Именно из-за таких недочётов было решено создать и представить собственную методику определения надёжности ЭРИ. В ней были учтены лучшие международные практики, а также национальные особенности российских предприятий для наиболее точного и корректного прогнозирования надёжности.

Одним из самых главных преимуществ разработанного решения является его формат – веб сервис, что делает его доступным и удобным для любого предприятия. В то же время немаловажным преимуществом является созданная база данных, находящаяся на удалённом сервере, благодаря чему пользователь может вернуться в любой момент к своим данным и результатам и продолжить работать с ними. Более того, веб сервис не просто собирает ответы, но и формирует аналитические материалы в виде графиков, показателей и текстовых сводок, позволяющих быстро оценить сильные и слабые стороны предприятия. Пользователь получает наглядное процентное соотношение положительных и отрицательных характеристик по различным направлениям и этапам производственного цикла изделия. Если предприятие занимается разработкой нескольких проектов одновременно, то в сервисе также реализована возможность проведения оценки качества электронных модулей по каждому проекту в отдельности. Это обеспечивает детализированный анализ

специфики каждого проекта. Для каждого проекта формируются индивидуальные отчеты и результаты.

В ходе работы была сформирована многофункциональная и адаптивная структура опросника, представленная на рисунке 4.

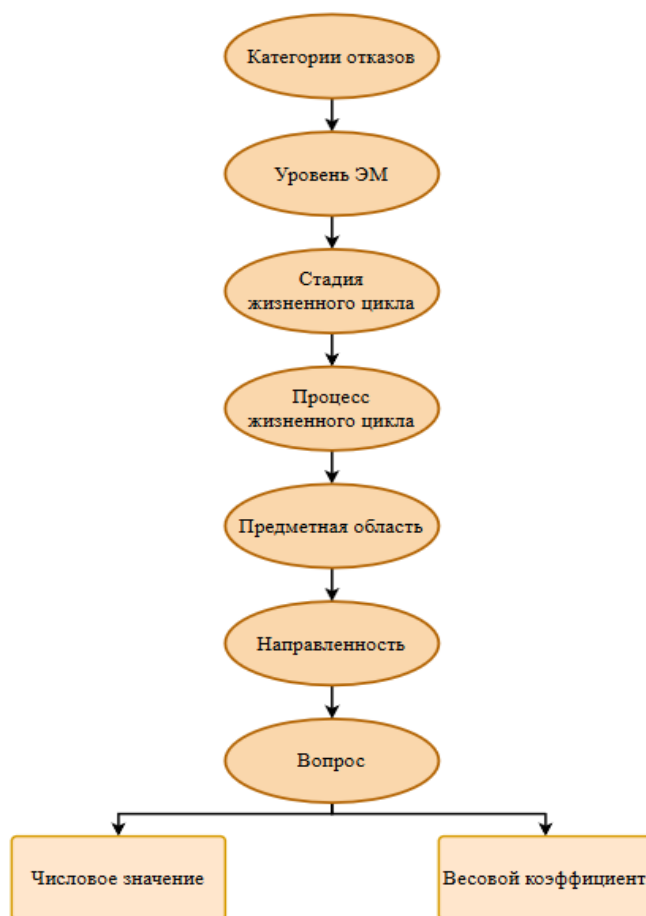


Рис. 4. Структура предлагаемого опросника

Основой структуры опросника является «категория отказов», определяемая по официальной статистике Центра исследования надежности RIAC. Далее идет уровень «элементной базы», а для более точного учета каждой стадии жизненного цикла добавлен уровень «процесс жизненного цикла», который помогает идентифицировать ключевые этапы в соответствии с российскими стандартами. Следующий уровень охватывает «предметную область», обеспечивая связь со структурами организации-исполнителя и позволяя отслеживать качество исполнения заказа каждым подразделением. Уровень «направленность» выявляет сильные и слабые стороны персонала и продукта внутри организации. Завершает структуру сам «вопрос», который имеет «весовой коэффициент», зависящий от статистики отказов, и «численное значение», зависящее от ответа пользователя.

В том числе уже сейчас имеется конкретный перечень вопросов, каждый из которых относится к определённому разделу, что помогает точнее обнаружить проблемные области компании-исполнителя, то есть определить, на каких этапах и стадиях жизненного цикла изделий не выполняются необходимые мероприятия для достижения целевого уровня качества и надежности (рис. 5).

Разработанный подход полностью основывается на аудитах, как внутренних – внутри компании-заказчика, так и внешних – в компаниях-исполнителях. Это необходимо для того, чтобы прийти к наиболее точной оценке качества производства ЭРИ. Также стоит заметить, что данный метод можно внедрить для определения надежности ещё до начала запуска серийного производства ЭРИ, что поможет значительно сократить денежные и временные ресурсы.



Рис. 5. Пример вопроса из предлагаемого опросника, реализованного в виде веб сервиса

Имеются и конкретные планы по улучшению предлагаемой методики. Чем больше компаний начнёт пользоваться сервисом, тем больше данных о причинах отказов будет собираться, благодаря чему в дальнейшем можно будет повысить точность прогнозирования показателей надёжности изделий.

Заключение

Рассмотренные в ходе работы подходы к оценке показателей надёжности обладают своими преимуществами и недостатками. При этом они нуждаются в серьёзной доработке, поскольку непрерывно обновляются международные требования, предъявляемые к СМК.

Принципиально новой системы оценки качества производства требует Российский подход, так как на данном этапе в нём не учитывается как качество технологического процесса, так и эффективность принятия управленческих решений руководством организации-исполнителя (предприятия).

Предложенный в работе метод позволяет учесть недостатки Российского подхода с применением международных требований и зарекомендовавших себя практик. При этом он также требует детальной проработки: необходимо точно определить весовые коэффициенты каждого из мероприятий опросника, усовершенствовать его структуру и разработать программное обеспечение для работы с экспертной системой и анализа результатов аудита.

Новая экспертная система рассматривает все стадии жизненного цикла ЭМ1 с применением оригинального дифференцированного подхода к оценке этапов технологического процесса, что поможет устранить возможные негативные последствия при проектировании ЭМ инфокоммуникационных устройств.

Благодарность

Публикация подготовлена в ходе проведения исследования (Проект № 24-00-024 «Развитие методов прогнозирования показателей надёжности электронных модулей») в рамках Программы «Научный фонд Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики» (НИУ ВШЭ)» в 2025 г.

Литература

1. *Королев П.С.* Комплексный метод оценки показателей безотказности радиотехнических устройств космической аппаратуры // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2021. Т. 64. № 4. С. 316-328.
2. Надёжность электрорадиоизделий: Справочник. М.: МО РФ, 2006. 641 с.
3. RIAC-HDBK-217Plus. Handbook of 217Plus™ Reliability Prediction Models. USA: RIAC, 2006. 170 p.
4. *Peyghami S., Wang Z., Blaabjerg F.* A Guideline for Reliability Prediction in Power Electronic Converters // IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, pp. 10958-10968, 2020.
5. ГОСТ Р МЭК 60300-1-2017. Менеджмент риска. Руководство по применению менеджмента надёжности. М., 2017. 40 с.
6. *Королев П.С., Жаднов В.В.* Оценка «коэффициента качества производства» для модели интенсивности отказов радиотехнических приборов непилотируемых автоматических космических аппаратов // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2020. Т. 63. № 3. С. 264-277.

ЗАХВАТ ДВИЖЕНИЙ ПЕРСОНАЖЕЙ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ВЕЩАТЕЛЬНОГО КОНТЕНТА

Воронков Глеб Алексеевич

Московский технический университет связи и информатики, техник, Москва, Россия
mybook3@mail.ru

Винецкий Всеволод Юрьевич

Московский технический университет связи и информатики, техник, Москва, Россия

Аннотация

В данной работе исследуется разработка программного обеспечения для захвата движений и генерации анимации. Будут проанализированы различные подходы к созданию анимации на основе технологии захвата движения (motion capture), а также выявлены основные трудности, возникающие при использовании этой технологии. Также предлагаются методы их преодоления.

Ключевые слова

захват движения, motion capture, анимации, компьютерная графика, трехмерная графика, искусственный интеллект.

Введение

Захват движения (англ. motion capture, сокращённо mocap) представляет собой метод анимации персонажей и объектов путём фиксации их перемещений в пространстве с последующим переносом данных на трёхмерную цифровую модель. Несмотря на то, что этот подход существенно ускоряет процесс создания анимации, он требует значительных финансовых затрат.

Основная цель настоящей работы заключается в разработке упрощённого и высокоточного метода захвата движений. Для этого предполагается использование нейросетевых технологий, способных распознавать человеческие позы на фотоснимках.

По данным аналитической компании Mordor Intelligence, объём мирового рынка систем 3D-захвата движения оценивался в 248,33 млн долларов США в 2024 году. Ожидается, что к 2029 году рынок вырастет до 467,74 млн долларов США, демонстрируя среднегодовой рост на уровне 13,5% в период с 2024 по 2029 год. Эти данные свидетельствуют о том, что технология захвата движения является перспективной областью в индустрии медиаконтента и продолжает активно развиваться.

Задачи исследования:

1. Изучение современных методов захвата движений;
2. Разработка нового метода для захвата движений;
3. Создание программного обеспечения на базе предложенного метода.

Результаты исследования

Актуальность технологии захвата движений обусловлена множеством факторов, связанных с технологическим прогрессом и возрастающими требованиями в различных отраслях.

Кинематография также активно применяет данную технологию для создания спецэффектов и анимированных персонажей. Современные фильмы и сериалы, такие как «Аватар» и «Планета обезьян», известны своими впечатляющими визуальными эффектами, основанными на захвате движений реальных актеров. Это позволяет создавать невероятно реалистичные цифровые копии живых существ и предметов.

В медицинской практике захват движений используется для диагностики и лечения заболеваний опорно-двигательного аппарата, а также для реабилитации пациентов после травм и операций. Точное отслеживание движений помогает врачам анализировать паттерны ходьбы, осанку и другие двигательные функции, что способствует более эффективному лечению и восстановлению.

В биомеханике захват движения используется для изучения кинематики и динамики человеческого тела, а также для анализа спортивных движений и разработки методик реабилитации после травм. Это позволяет исследователям точно измерять и анализировать параметры движений, такие как скорость, ускорение, сила и момент силы, что способствует более глубокому пониманию биомеханики движений человека.

В образовании и спортивной подготовке данная технология применяется для анализа техники выполнения упражнений, выявления ошибок и улучшения результатов. Тренеры могут отслеживать движения спортсменов и давать рекомендации по улучшению их производительности.

VR/AR-технологии становятся всё более популярными, и захват движений играет ключевую роль в обеспечении естественного взаимодействия пользователя с виртуальной средой. Возможность отслеживать движения тела и рук позволяет создавать более интуитивные интерфейсы и улучшать пользовательский опыт.

Наконец, научные исследования также используют захват движений для изучения поведения животных, анализа биомеханики и проведения экспериментов в различных дисциплинах, таких как биология, психология и антропология.

Всё это разнообразие сфер применения захвата движений привело к появлению множества видов систем захвата движений под разные типы задач.

Существуют два основных подхода к решению задачи захвата движений:

1. Маркерная система

Motion capture предполагает использование датчиков, закреплённых на теле актёра. Он обеспечивает высокую точность, но требует дорогостоящего специализированного оборудования. Нет единого универсального решения для захвата всех типов движений. Например, в киноиндустрии для захвата мимики лица используют маркеры (точки, нанесённые на лицо) и камеру, установленную прямо перед лицом актёра, тогда как для захвата положения конечностей и тела применяются датчики, распределённые по всему телу, и большое количество камер, снимающих с разных углов.

2. Безмаркерная технология

Более современный метод, не требующий применения специальных датчиков или костюмов. Основан на технологиях компьютерного зрения и распознавания образов. Появился сравнительно недавно и пока находится в стадии развития; его точность уступает маркерному методу, хотя она быстро улучшается. В ряде случаев высокая точность маркерного метода оказывается избыточной, поскольку на быстрых движениях человеческое восприятие не замечает незначительные погрешности.

Современные системы захвата движения делятся на несколько категорий в зависимости от используемой физической основы:

1. Оптическая система

Основывается на специальных костюмах с маркерами, расположенными на различных участках тела, и камерах, фиксирующими эти маркеры. С помощью множества камер, расположенных под разными углами, создаётся полная трёхмерная модель.

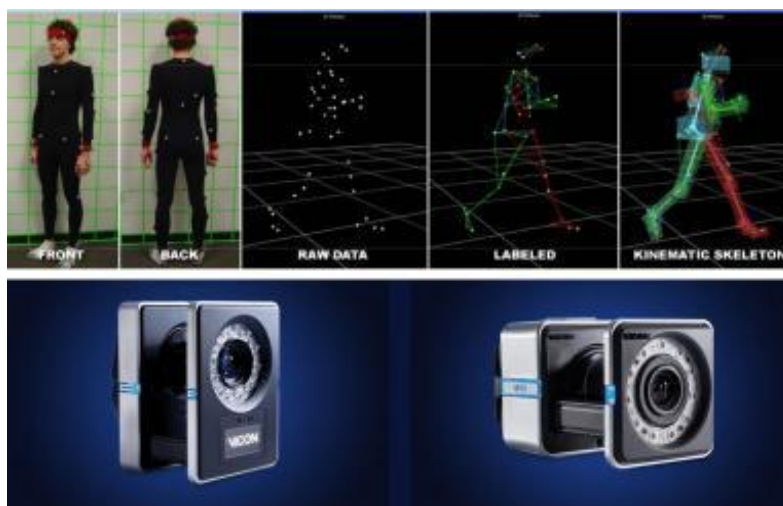


Рис. 1. Пример оптической системы захвата движений

Подвиды оптических систем:

Пассивная система: Маркеры отражают внешний инфракрасный свет, исходящий от камеры. У маркеров отсутствуют индивидуальные идентификаторы, поэтому во время обработки возможны ошибки идентификации.

Активная система: Датчики самостоятельно излучают свет и обладают уникальными идентификаторами, благодаря чему система точно определяет каждый маркер. Это позволяет создавать наиболее точные модели, но имеет свои недостатки: костюм оснащён дополнительным источником питания для светодиодов, что может ограничивать свободу движений актёров, а сами системы стоят дороже пассивных аналогов.

Недостатки оптических систем:

- Невозможность захвата мелких движений пальцев и мимики лица.
- Ограниченная свобода движений актёра из-за костюма.
- Хрупкость и высокая стоимость маркеров в активных системах.

2. Гироскопическая система

Используют гироскопы, акселерометры и инерционные сенсоры, прикрепляемые к костюму. Они измеряют перемещение тела в трёхмерном пространстве, включая углы наклона.

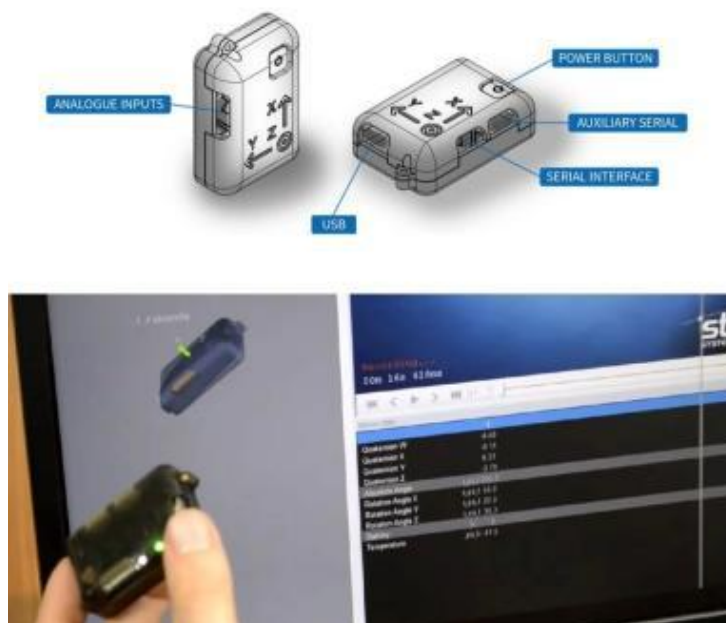


Рис. 2. Пример инерциальной системы захвата движений

Недостатки гироскопических систем:

- Отсутствие возможности захвата мелких движений пальцев и мимики лица.
- Необходимость передачи данных с датчиков на компьютер.
- Не подходят для определения положения в пространстве.

3. Механическая система

Представляет собой конструкцию, напоминающую экзоскелет, которая напрямую считывает движения суставов, формируя на их основе итоговую модель.



Рис. 3. Пример механической системы захвата движений

Недостатки механических систем:

- Трудности с захватом движений пальцев и мимики лица.
- Требуется передача данных с датчиков на компьютер.
- Полностью непригодна для определения положения в пространстве.
- Костюм сильно стесняет движения актёра из-за наличия многочисленных проводов и датчиков.

4. Гибридная система

Объединяет оптический и инерционный методы отслеживания, компенсируя недостатки каждого из подходов. Гибридные системы включают "шайбы", которые можно размещать на костюме или декорациях в необходимом количестве.



Рис. 4. Пример гибридной системы захвата движений

Недостатки гибридных систем:

- Отсутствует возможность захвата мелких движений пальцев и мимики лица.
- Требуется передача данных с датчиков на компьютер.

5. Система с датчиком глубины

Специальные устройства, определяющие положение объекта через анализ изменения структуры света вокруг него. Обычно используется для сканирования лица актёра и включает шлем с одной или двумя камерами, осветительными приборами и датчиками.



Рис. 5. Пример системы захвата движений с датчиком глубины

Недостатки систем с датчиком глубины:

- Применимы лишь для специфичных задач, таких как захват мимики лица.
- Камера, расположенная перед лицом актёра, мешает движению и ухудшает обзор.

Безмаркерные системы захвата движения отличаются меньшей вариативностью по сравнению с маркерными, так как основаны преимущественно на алгоритмах анализа изображения. Эти алгоритмы обычно функционируют в два этапа:

1. Обнаружение человека.
2. Локализация ключевых точек.

В зависимости от последовательности выполнения этапов, системы можно классифицировать на две группы: подходы «сверху вниз» и «снизу вверх».

Подходы «сверху вниз» осуществляется следующим образом. Сначала производится обнаружение человека, после чего для каждого из них определяются ключевые точки. Сложность вычислений возрастает пропорционально количеству людей. Эти подходы устойчивы к изменениям масштаба и демонстрируют хорошую точность на стандартных тестовых наборах. Однако из-за своей сложности они требуют значительных вычислительных ресурсов для достижения реального времени обработки.

Алгоритм подхода «снизу вверх» вначале выявляет ключевые точки (ориентиры) всех людей на изображении, а затем объединяет их в отдельные объекты.

Вероятностная карта, известная как тепловая карта, используется для оценки вероятности нахождения определенного ориентира в каждом пикселе. Лучшие ориентиры выделяются с помощью процедуры подавления не максимального значения. Такие подходы менее сложны по сравнению с методами «сверху вниз», но уступают им в точности.

При разработке программы для захвата движений встает выбор между маркерной и безмаркерной системой.

Маркерные методы обеспечивают наилучшую точность, однако их основной недостаток связан с необходимостью использования дорогостоящих, хрупких и сложных в установке маркеров. Для качественного трекинга может потребоваться установка сотен таких датчиков. Безмаркерные методы, наоборот, характеризуются меньшей точностью, но лишены необходимости использования маркеров, что делает их экономически более выгодными и простыми в применении. Проблема точности может быть частично решена путем увеличения числа камер или применением методов аппроксимации движений.

Для разрабатываемого программного обеспечения был выбран безмаркерный подход, так как он обладает большим потенциалом для дальнейшего совершенствования и лишен критических недостатков маркерных систем.

Основной алгоритм захвата движений выглядит довольно просто: получение данных с камеры, определение положения ключевых точек и их проецирование на 3D-модель.



Рис. 6. Блок-схема базового алгоритма

Хотя существует немного алгоритмов для безмаркерного захвата движений, каждое из решений может иметь разные реализации, обученные на различных наборах данных. Рассмотрим три успешные реализации: OpenPose, MediaPipe и YOLOv7 pose. Все они демонстрируют хорошие результаты в распознавании поз, причем среди них нет существенных отличий в плане захвата положения тела.

Однако MediaPipe дополнительно поддерживает захват движений лица и рук, что облегчает добавление поддержки этих функций в будущем.

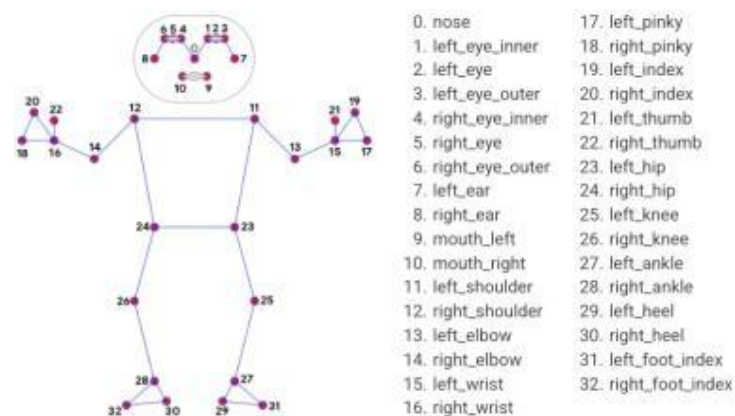


Рис. 7. MediaPipe скелет трекинга всего тела

MediaPipe удобен для захвата движений тела, пальцев и лица, однако имеет следующие недостатки:

- Псевдо 3D: MediaPipe предоставляет данные о точках в трехмерном пространстве XYZ, но координата Z (глубина) определяется приблизительно, что приводит к значительным ошибкам.
- Нестабильность: MediaPipe испытывает трудности при распознавании точек в сложных позах или при наличии нескольких близко стоящих людей.
- Ограниченность взаимодействия: MediaPipe не может обрабатывать видеопотоки в реальном времени и не умеет передавать или сохранять данные.



Рис. 8. Mediapipe скелет трекинга кистей рук

Решению этих проблем посвящено дальнейшее развитие алгоритма.

Применение двух камер решает проблемы псевдо 3D и нестабильного распознавания. Расположение камер спереди и сбоку позволяет объединить данные и обеспечить полноценный 3D-трекинг. Использование нескольких камер также помогает компенсировать ошибки распознавания с одного ракурса.

Важно учесть проблему корреляции точек, полученных с разных камер. Поскольку объект находится в разных позициях относительно каждой камеры, точки трекинга могут смещаться, что потребует специальной обработки для объединения данных без потери точности. В нашем решении координаты X и Y рассчитываются по передней камере, а координата Z – по боковой.

Для качественной анимации необходимо преобразовать данные о положениях точек в параметры поворотов и сгибов конечностей. Эти расчеты могут выполняться с использованием тригонометрии или, в случае затруднений, более простых методов, основанных на соотношении точек. Такой подход не гарантирует абсолютной точности, но позволяет получить приблизительные данные, которые впоследствии могут быть уточнены другими методами.

MediaPipe не предназначен для работы с видеопоследовательностями, что создает дополнительные сложности. Чтобы устранить эту проблему, создается виртуальный скелет, который движется в соответствии с данными трекинга по каждому кадру. Ограничивая минимальные и максимальные изменения положения точек в коротком временном интервале, удастся снизить влияние ошибок и повысить стабильность распознавания.

Симуляция скелета также упрощает расчет движений, позволяя использовать предыдущие кадры для интерполяции текущего движения.



Рис. 9. Блок схема улучшенного алгоритма

Разберём работу алгоритма.

Параллельно с двух камер мы получаем два разных ракурса.

Данные с камер обрабатываются Mediapipe и мы получаем два облака по 33 точки каждая точка имеет три параметра в хуз, однако параметр z – глубина имеет крайне высокую погрешность.

Происходит объединение двух облаков в одно, для уточнения параметров, это включает в себя триангуляцию, но не ограничивается ею. Данные о положении точек интерпретируются как повороты и сгибы суставов и корректируются в рамках человеческих возможностей, стоит отметить данный этап создан для уточнения положения точки, когда расчёт ее затруднён, или при определении этой точки есть слишком большая погрешность, в таком случае данные будут восстановлены по косвенным признакам. При создании облака точек есть постоянная небольшая погрешность так как Mediapipe работает с каждым кадром отдельно, данный блок сравнивает текущие значение точки с предыдущим и если разница в рамках погрешности, то движение игнорируется.

Также существуют помехи обратного типа на 1-2 кадра одна или несколько точек могут резко переместиться или пропасть, фильтр больших изменений, работает схоже с фильтром малых, однако он учитывает ситуацию, в которой быстрое перемещение точки не было ошибкой, поэтому он не полностью подавляет движение, а интерполирует его, начиная замедленное движение в сторону точки. После всех проделанных операций нам нужно сохранить данные о положении точек чтобы использовать эти данные для коррекции будущего облака точек.

После внесения всех вышеперечисленных изменений, алгоритм приобретает следующий вид:

1. Параллельное получение данных с двух камер.
2. Обработка данных с камер с помощью MediaPipe для получения двух наборов точек.
3. Объединение двух наборов точек в единый набор с учетом особенностей расположения камер.
4. Преобразование данных о положении точек в параметры сгибов и поворотов.
5. Корректировка данных в пределах физиологических возможностей человеческого тела.
6. Фильтрация небольших изменений для устранения шумов.
7. Фильтрация резких изменений для стабилизации траекторий движения.
8. Сохранение данных о текущем положении точек для последующей коррекции.

Заключение

В ходе работы были проанализированы современные методы захвата движений, включая маркерные и безмаркерные системы. Особое внимание уделялось изучению преимуществ и ограничений каждого из подходов, что позволило выявить ключевые направления для дальнейших исследований и разработок. Так, несмотря на высокую точность маркерных систем, их сложность и дороговизна остаются значимыми препятствиями для широкого внедрения. В свою очередь, безмаркерные системы, хоть и уступают в точности, предлагают гораздо более доступные и гибкие решения, что открывает широкие перспективы для их дальнейшего развития.

Разработанный алгоритм для безмаркерного захвата движений направлен на компенсацию недостатков существующих методов и предлагает новые пути улучшения качества трекинга. Применение этого алгоритма в сочетании с современными технологиями компьютерного зрения и машинного обучения позволяет создавать программное обеспечение, которое сочетает в себе высокую производительность и приемлемую точность, обеспечивая значительное снижение затрат на производство анимационного контента.

Созданное программное обеспечение реализует захват движений без использования маркеров, предоставляя пользователям более экономичное и удобное решение. Хотя оно и уступает маркерным системам в точности, его простота и доступность делают его привлекательным вариантом для многих сценариев использования, особенно там, где требования к качеству анимации не столь высоки. Тем не менее, продолжающееся совершенствование алгоритмов и внедрение новых технологий обещают значительный прогресс в ближайшие годы, что позволит безмаркерным системам стать еще более конкурентоспособными и востребованными в индустрии.

Литература

1. Гужов В.И. Методы измерения 3D-профиля объектов. Контактные, триангуляционные системы и методы структурированного освещения: учебное пособие. Новосибирск: НГТУ, 2015.
2. Куркова Н.С. Цифровые технологии и анимационное искусство // Визуальные искусства в современном художественном и информационном пространстве. Кемерово: Кемгуки, 2017. Выпуск 2. С. 351-365.
3. Введение расстояния взаимодействия в контексте геометрии расстояния для движений человека // Чебышевский сборник. 2019. № 2 (70). С. 273-283.
4. Петухов А.А. Проблемы проектирования мобильных систем для захвата движения пальцев рук. М.: Московский институт электроники и математики Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики».
5. Лутохин А.С., Тычков А.Ю., Сотников А.М., Алимуратов А.К. Анализ систем захвата движения в среде виртуальной реальности. Пенза: Пензенский государственный университет.
6. Конурова А.С., Бикмуллина И.И. Исследование безмаркерной системы захвата движения.
7. Анализ размера и доли рынка 3D-захвата движения – тенденции роста и прогнозы (2024-2029 гг.) <https://www.mordorintelligence.com/ru/industry-reports/3d-motion-capture-market> (дата обращения 24.12.2024).
8. Подробное сравнение YOLOv7 Pose и MediaPipe <https://learnopencv.com/yolov7-pose-vs-mediapipe-in-human-pose-estimation/> (дата обращения 05.01.2025).
9. Подробное сравнение OpenPose и MediaPipe <https://saiwa.ai/blog/openpose-vs-mediapipe/> (дата обращения 05.01.2025).
10. Motion Capture – технология захвата движения, как и где это работает <https://appfox.ru/blog/tehnologija-motion-capture/> (дата обращения 24.12.2024).