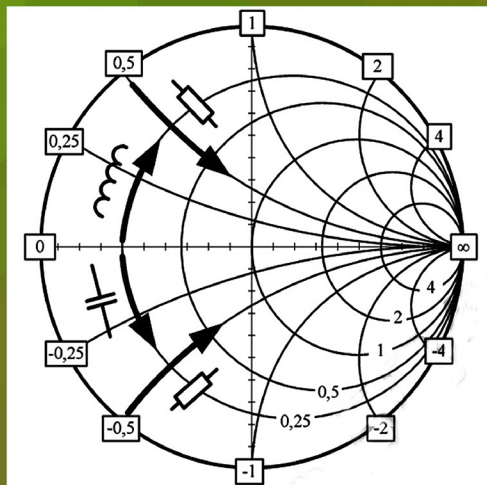




Современные проблемы радиофизики и радиотехники

Сборник докладов
Омского научного
семинара



Выпуск 11

Омский научно-исследовательский институт приборостроения
Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН

**СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
РАДИОФИЗИКИ И РАДИОТЕХНИКИ**

Сборник докладов Омского научного семинара

Выпуск 11

Омск
2024

УДК 621.396+654.02+681.2
ББК 32.95+32.97
С56

Ответственный редактор *С. В. Кривальцевич*

С56 **Современные проблемы радиофизики и радиотехники:**
сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред.
С. В. Кривальцевич – Вып. 11. – Омск : ОНИИП, 2024. – 102 с.

ISBN 978-5-6046517-9-7

В сборник вошла часть докладов, сделанных участниками семинара на заседаниях в 2022–2024 гг.

В докладах рассмотрены вопросы зондовых измерений параметров интегральных схем в СВЧ-диапазоне, влияния подстилающей поверхности на антенны КВ-диапазона, освещены методы и технологии обработки данных спутниковых изображений и др.

Для студентов, аспирантов и преподавателей технических специальностей высших и среднеспециальных учебных заведений, а также сотрудников учреждений РАН и предприятий радиоэлектронной отрасли.

УДК 621.396+654.02+681.2
ББК 32.95+32.97

ISBN 978-5-6046517-9-7

© АО «ОНИИП», 2024
© Авторы, 2024

СОДЕРЖАНИЕ

КРИВАЛЬЦЕВИЧ С. В.	
Вступительное слово	5
ВОРОЖЦОВ А. Л.	
Степан Ревутский и сообщество «СВЧушки»	8
ВОРОЖЦОВ А. Л.	
Организация измерений S-параметров бескорпусных кристаллов монолитных интегральных схем в сверхширокополосном СВЧ-диапазоне	16
ВОРОЖЦОВ А. Л., СУНЦОВА И. В., ЧЕРНЯВСКАЯ М. В.	
Разработка калибровочной платы для зондовых измерений S-параметров бескорпусных интегральных схем в СВЧ-диапазоне	27
КРИВАЛЬЦЕВИЧ В. С.	
Разработка и изготовление 3D-макета радиостанции	33
ПУЦЫКОВИЧ А. А.	
Моделирование ДКМВ-радиосети	36
СИНКЕВИЧ В. С.	
Программный модуль автоматического измерения блокирования и динамического диапазона по интермодуляционным составляющим 3-го порядка	46
ТУЙМИТОВА М. Н., КОСАРЕВ Б. А.	
Оценка интервала рабочих температур одноэлектронных приборов	59

ХМЕЛЬНИЦКИЙ К. Е.	
Исследование влияния подстилающей поверхности на характеристики антенн КВ-диапазона разных конструкций	63
ШАГАРОВА Л. В.	
Методы и технологии оперативного приема, архивации и обработки данных с низкоорбитальных спутников дистанционного зондирования Земли	69
ШАГАРОВА Л. В.	
ChatGPT & Google Earth Engine: современные возможности для обработки спутниковых изображений	81

Вступительное слово

Омский научный семинар «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» проводится с января 2010 года в Омском государственном университете им. Ф. М. Достоевского. Заседания проходят на базе кафедры общей и экспериментальной физики ОмГУ им. Ф. М. Достоевского. Работа научного семинара поддерживается АО «ОНИИП», ведущим отраслевым НИИ в области систем радиосвязи, и Институтом радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, занимающимся поисковыми исследованиями в области создания инфокоммуникационных систем, включающих связь, навигацию и мониторинг, а также в области разработки электронной компонентной базы для таких систем.

Основными целями научного семинара являются:

- создание благоприятной среды для обмена опытом;
- обсуждение новых идей и подходов в радиофизике и радиотехнике;
- привлечение студентов, выпускников и молодых специалистов к научной, научно-технической и преподавательской деятельности в области радиофизики и микроэлектроники.

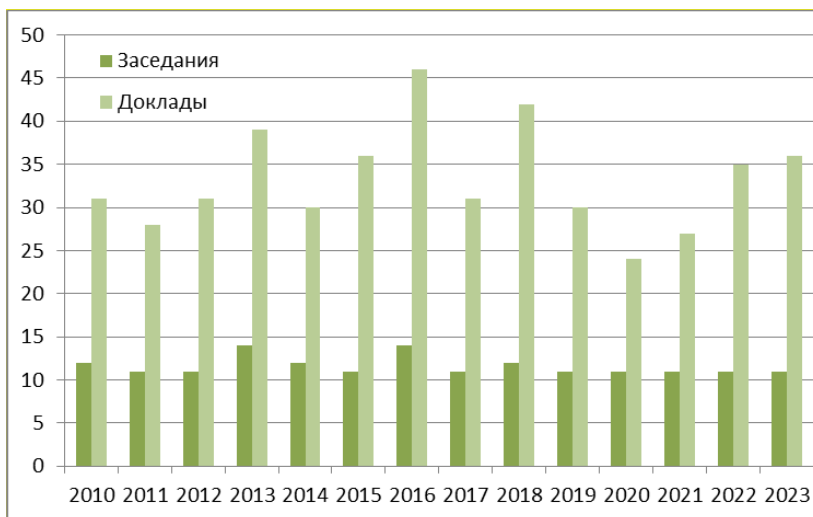
В настоящее время работа семинара организована по следующим предметным секциям:

- «Радиофизическое зондирование»;
- «Антенно-фидерные устройства»;
- «Моделирование процессов и устройств»;
- «Цифровая обработка сигналов»;
- «Разработка, конструирование и производство аппаратуры»;
- «Техника СВЧ»;
- «Инженерная археология»;
- «Перспективные технологии в производстве РЭА».

Плановые заседания семинара проводятся в последнюю субботу каждого месяца (за исключением июля) с 11:30 в 1-м корпусе ОмГУ (пр. Мира, 55а). Участниками и докладчиками являются студенты, магистранты, аспиранты, преподаватели и

научные сотрудники ОмГУ им. Ф. М. Достоевского, ОмГТУ, ОмГПУ, ОмГУПС, СибАДИ, Омавиат им. Н. Е. Жуковского, ОЛТК ГА – филиала ФГБОУ ВО УИ ГА и других учебных заведений Омска; научные сотрудники ИРФЭ ОНЦ СО РАН, ОФ ИМ СО РАН, ОНЦ СО РАН специалисты и научные сотрудники АО «ОНИИП», АО «ЦКБА» и других радиоэлектронных предприятий Омска и других городов России, а также учащиеся школ.

30 января 2010 г. состоялось первое заседание семинара, на котором были представлены первые 2 доклада. Всего в 2010–2024 гг. состоялось 169 заседаний семинара, было заслушано 482 доклада.



Количественные показатели заседаний и докладов семинара в 2010–2023 гг.

Продолжается работа семинара и в 2024 г.: на состоявшихся шести заседаниях было заслушано 16 докладов.

Организованы трансляция заседаний и подключение выступающих в дистанционном режиме с помощью сети Интернет. Это позволило расширить географию докладчиков и участников семинара.

Работа о сайте семинара (www.радиосеминар.рф) и трансляции его заседаний лежит целиком и полностью на Александре Леонидовиче Ворожцове. На сайте всегда можно ознакомиться с программой предстоящего заседания, отчетами о предыдущих заседаниях, новостями об омских конференциях и семинарах. С электронными версиями сборников также можно ознакомиться на сайте семинара.

Благодарим за поддержку семинара декана физического факультета ОмГУ им. Ф. М. Достоевского Марию Геннадьевну Потуданскую, заместителя начальника отдела АО «ОНИИП», старшего научного сотрудника ИРФЭ ОНЦ СО РАН Дмитрия Евгеньевича Зачатейского, старшего научного сотрудника ИРФЭ ОНЦ СО РАН Александра Сергеевича Ященко, доцента ОмГУ им. Ф.М. Достоевского Анатолия Александровича Ляхова, младшего научного сотрудника ИРФЭ ОНЦ СО РАН Юрия Александровича Костычова и, конечно, огромное спасибо всем участникам семинара.

Издание данного сборника, как и десяти предыдущих, осуществлено благодаря поддержке генерального директора АО «ОНИИП» Владимира Александровича Березовского.

Приглашаем на наш семинар всех желающих поделиться результатами своих научных достижений и узнать про исследования и разработки омских ученых, преподавателей и инженеров.

С. В. Кривальцевич,
руководитель семинара,
kriser2002@mail.ru

А. Л. Ворожцов

СТЕПАН РЕВУТСКИЙ И СООБЩЕСТВО «СВЧУШКИ»

Доклад посвящен Степану Дмитриевичу Ревутскому – радиоинженеру и блогеру, основателю сообщества «СВЧушки». Освещены этапы его профессиональной деятельности. Особое внимание уделено развитию его сообщества «СВЧушки», а также планам на будущее.

Ключевые слова: *Ревутский, СВЧушки. сообщество радиоинженеров СВЧ.*

На нашем семинаре «Современные проблемы радиофизики и радиотехники» есть секция «Инженерная археология», которая занимает особое место. Во-первых, на ней мы говорим, как развивалось знание о каком-либо явлении, как появлялись новые теории и конструкции. И то, что сейчас для нас выглядит очевидным и само собой разумеющимся, в те времена, когда это создавали, было совсем не так очевидно и однозначно, а являлось предметом жарких споров и обсуждений, проб и ошибок. Во-вторых, «Инженерная археология» – это единственная секция, где мы рассказываем о людях, которые стоят за физическими открытиями и ключевыми технологиями. Всегда полезно помнить, как тернист путь таких первооткрывателей и как мало у них помощников или единомышленников. Безусловно, часть из них потом получает мировую известность и признание, их именами называют законы или явления, предприятия или улицы городов. Обычно, это происходит спустя десятки лет после публикации открытия, после многократной проверки временем и практикой, когда без результатов поиска этого ученого-первооткрывателя уже невозможно представить себе современный уровень науки или техники.

Но настоящий доклад посвящен человеку, который сейчас живет и здравствует, и нам не нужно ждать много лет, чтобы всем причастным стало очевидно, какую большую пользу принесла и продолжает приносить его деятельность профессиональ-

ному сообществу радиоинженеров СВЧ.

Современная концепция организации электронного производства заключается в переходе от стандартизации конструкции к стандартизации технологических процессов, так называемому формату *fables/foundry*, в котором происходит разделение многотысячных предприятий на множественные дизайн-центры и крупные технологические фабрики. Если 20–30 лет назад под одной крышей трудились разработчики самых разных направлений, то в современных дизайн-центрах работают по 10–15 человек, а ближайшие к ним по тематике специалисты могут находиться за 1000 км, на другом краю страны или мира. Это, безусловно, затрудняет обмен опытом между специалистами в решении текущих вопросов. Журналы с возможностью заочного общения или конференции с личным участием обладают низкой периодичностью и мало подходят для кооперации в решении текущих вопросов. В таких условиях особую роль начинают играть профессиональные публичные интернет-ресурсы с возможностью доступа 24/7. Об одном из самых известных среди специалистов СВЧ нашей страны интернет-ресурсе – сообществе «СВЧушки» [1] и его создателе С.Д. Ревутском этот доклад.

Лучше всего направление деятельности сообщества раскрывает фраза из описания к данному ресурсу «Немного обо всем, что связано с СВЧ. СВЧ – это не только печка!». К сожалению, попытки создать ресурс с общей тематикой редко имеют успех. Долголетие показывают, как правило, узкоспециализированные ресурсы, которые поддерживаются коммерческими компаниями – лидерами в данной технологической области. Например, в сфере измерения СВЧ-устройств сайты компаний производителей измерительного оборудования являются еще и базами знаний разнообразных методик измерений. Но на таких сайтах и блогах отсутствуют новости общего характера и обсуждаются вопросы, касающиеся непосредственно только темы ресурса. Соответственно, вопросы стратегического характера не найдут своей аудитории. Нужно признать, что сообщество «СВЧушки» является исключением и, охватывая самый широкий круг вопросов СВЧ-устройств, существует уже более 10 лет.

Начиналось оно на платформе «Я.ру» в 2012 г. Через

2 года «СВЧушки» переместились на платформу Google Blogspot [2], где и сегодня можно посмотреть архив публикаций и обсуждений за 2014–2019 гг., в том числе и заметку о нашем семинаре от 19.09.2017 г. Спустя 5 лет, в 2019 г. сообщество обособилось на платформе «ВКонтакте» (рис. 1), являющейся основной площадкой сегодня, помимо действующих телеграмм-канала [3] и блога на Дзене [4].

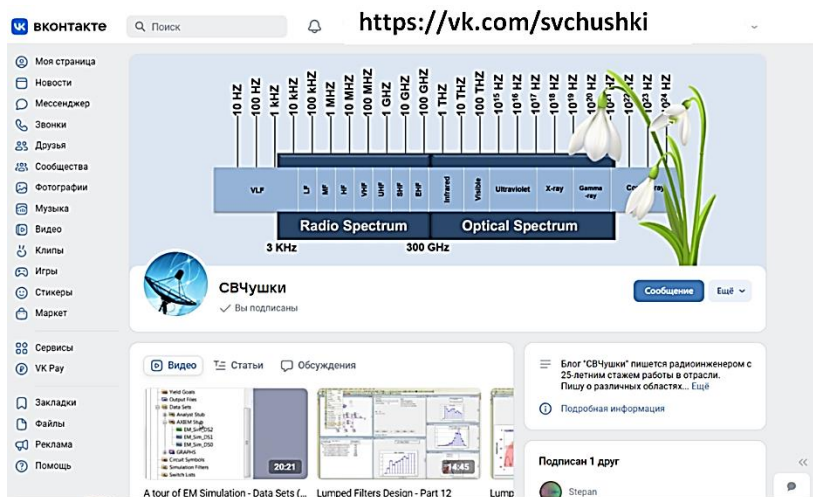


Рис. 1. Скриншот страницы сообщества «СВЧушки» в социальной сети «ВКонтакте»

Помимо регулярных публикаций в ленте новостей «СВЧушек», очень важную роль играет чат сообщества, где и происходит основное общение и обмен опытом между специалистами СВЧ (рис. 2).



Stepan Revutsky 21:11

Владислав

У кого-то был опыт построения биконических антенн?

Каких именно? Разных вариантов много 😊

Вот, например,

<https://www.mathworks.com/help/antenna/ug/vhf-uhf-biconical-antenna-for-testing-applications.html>

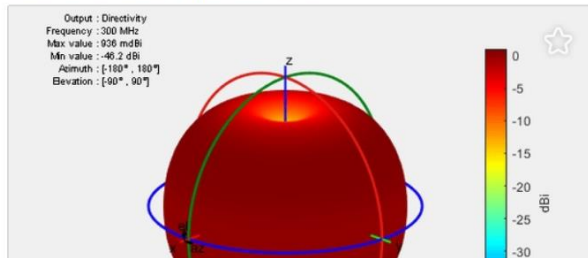


Рис. 2. Скриншот чата сообщества «СВЧушки»

На рис. 2 приведен пример такого общения в чате. Автору вопроса нужна была консультация по проектированию биконических антенн, и ему мог ответить любой из участников сообщества, кто ближе к теме, но в этот раз ответ дал непосредственно Степан Дмитриевич Ревутский (рис. 3).

Степан Дмитриевич – радиоинженер с 25-летним стажем работы и необычным хобби. Более 10 лет занимается популяризацией тематики СВЧ в социальных сетях. Сейчас это занятие съедает почти все его свободное время. В рабочее время сфера его профессиональных интересов – моделирование, включающее различные методы и подходы, позволяющие решать инженерные задачи в области СВЧ, и методы векторного анализа для тестирования СВЧ-устройств.

С детства Степан Дмитриевич занимался радио во всех его проявлениях. Закончил среднюю общеобразовательную школу с углубленным изучением технических дисциплин (физика, математика, химия), затем Московский авиационный институт, факультет радиоэлектроники летательных аппаратов по кафедре антенн и устройств СВЧ.

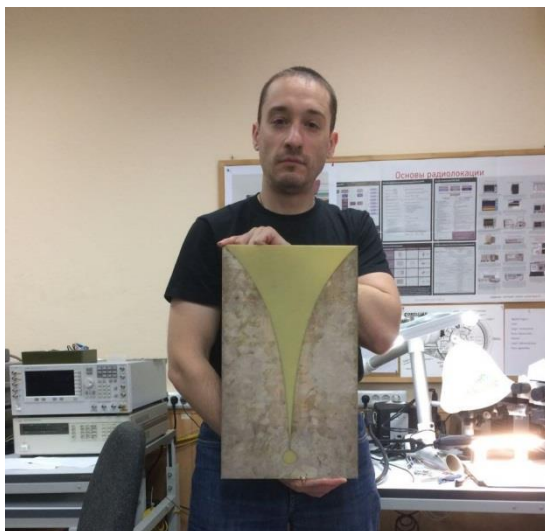


Рис. 3. Фотография С. Д. Ревутского на рабочем месте с макетом антенны



Рис. 4. Первый набор слушателей курса «Современные методики векторного анализа цепей» (слева-направо: 4-й – автор доклада, 8-й – С.Д. Ревутский)

В апреле 2024 г. на базе Центра проектирования РТУ МИРЭА совместно с ООО ПКФ «Планар» проводился курс повышения квалификации «Современные методы векторного анализа цепей» [5], на котором и состоялось очное знакомство автора доклада и С. Д. Ревутского (см. рис. 4). Пользуясь возможностью, удалось задать несколько вопросов Степану Дмитриевичу о его профессиональном становлении, взглядах на современного радиоинженера СВЧ и перспективы выбранной профессии.

– Какие направления внесли наибольший вклад в твоё развитие как инженера?

– Еще в вузе начал подрабатывать в Центре специальных разработок при НИИ радиосвязи, в отделе линейного приемного тракта. Занимался разработкой различных СВЧ-устройств. Именно работа в ЦСР позволила понять, что реальность может сильно отличаться от тех знаний, которые дают в вузе. Появилось понимание некоторых вещей, которые не мог понять, изучая только теорию. Вообще, в любом деле очень важно гармоничное сочетание теории и практики, так как вместе они хорошо друг друга дополняют.

Работа в НИИ космического приборостроения дала мне больше всего знаний именно как инженеру-разработчику. Очень повезло с коллективом и руководителем.

Начиная с 2001 г. принимал активное участие в самых разных проектах, связанных с разработкой аппаратуры для космоса; в испытательной лаборатории; работал над проектами, связанными с СШП-системами связи и локации; много разных проектов было в Бауманке; занимался разработкой антенных систем для РЛ-датчиков автомобильных РЛС диапазона 77 ГГц; различных фильтров (тематика фильтров имеет для меня очень большое значение и вызывает особый интерес).

– Что интересного в технике СВЧ и почему, по-твоему, не всем нужно идти в ИТ или бизнес?

– СВЧ – это очень обширная тема. Каждый раз, подключаясь к новому проекту, узнаю для себя много нового, в том числе в смежных областях. То есть скучать не приходится, так как по-

стоянно учишься и осваиваешь что-то новенькое.

Никогда не считал себя IT-специалистом, но сейчас работаю именно в IT-компании и занимаюсь радиосвязью. Сейчас область IT достаточно обширна, и в ней есть место радиоинженерам. Приобретенные за время работы в отрасли знания и умения помогают адаптироваться к новому и искать нестандартные решения в тех областях, которые нельзя назвать привычными для радиоинженера (например, исследования метаматериалов и их применение в современной аппаратуре).

В дальнейшем человечество ждет развитие систем связи и переход на более высокие частоты. Это значит, что область СВЧ по-прежнему будет востребована, так как нужно будет разрабатывать новые устройства и антенны, тестировать новые материалы, создавать новые алгоритмы и т.д. Проще говоря, потенциал у тематики СВЧ сохраняется неплохой.

– Радиоинженер сегодня – каким он должен быть?

– Радиоинженер сегодня – это универсал, который постоянно обучается и расширяет свои компетенции. С 2001 г. удалось поработать в различных областях, и сейчас есть понимание, что радиоинженер может быть востребован практически в любой области. Это могут быть, скажем так, классические области: связь и передача данных, радиолокация, радионавигация, исследования компонентов и устройств, моделирование. А могут быть и менее привычные области: параметры материалов и неразрушающий контроль; агротех, системы безопасности, медицина, биология, фармацевтика, метаматериалы. Радиоинженеры работают везде.

Профессия радиоинженера – это хороший выбор для человека, увлеченного техникой.

– Планы на будущее?

– Если ничто не помешает, то планирую дальше развивать сообщество «СВЧушки». Все-таки основная задача – привлечь тех, кому интересна тематика СВЧ, дать возможность свободно общаться в сообществе, делиться информацией, обсуждать новости, искать единомышленников. Всегда радуюсь, когда вижу, что коллеги смогли найти ответ на вопрос в чате сообщества или позитивно воспринимают опубликованный материал. В такие

минуты понимаю, что не зря тратил время.

Кстати, тематические публикации в сообществе размещаются бесплатно, поэтому призываю коллег делиться информацией.

В завершении доклада остается пожелать Степану Дмитриевичу продолжать удерживать этот хрупкий баланс между работой радиоинженера, «СВЧушками» и своей семьёй. И, безусловно, дальнейшего развития сообщества, особенно в плане появления единомышленников, сети корреспондентов на местах и т.д.

ЛИТЕРАТУРА

[1] СВЧушки – немного об СВЧ. URL: <https://vk.com/svchushki>.

[2] СВЧушки : Немного обо всем, что связано с СВЧ (СВЧ – это не только печка!). URL: <https://svchushki.blogspot.com>.

[3] СВЧушки : Немного обо всем, что связано с СВЧ (СВЧ – это не только печка). URL: <https://t.me/svchushki>.

[4] СВЧушки. URL: <https://dzen.ru/svchushki>.

[5] Центр проектирования РТУ МИРЭА. URL: https://vk.com/design_centre_of_rtu_mirea?w=wall-166069202_16.

Ворожцов Александр Леонидович, сотрудник Центрального конструкторского бюро автоматики, инженер Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, alek.vorog@yandex.ru.

А. Л. Ворожцов

**ОРГАНИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ S-ПАРАМЕТРОВ
БЕСКОРПУСНЫХ КРИСТАЛЛОВ
МОНОЛИТНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
В СВЕРХШИРОКОПОЛОСНОМ СВЧ-ДИАПАЗОНЕ**

Освещены актуальные проблемы измерения S-параметров бескорпусных интегральных схем в сверхширокополосном СВЧ-диапазоне. Приведены факторы, вносящие погрешность в такие измерения, и показаны способы их коррекции. Особое внимание уделено калибровке SOLT, а также её физической реализации в измерениях на зондовой станции.

Ключевые слова: зондовые СВЧ-измерения, калибровка SOLT, ошибки измерений.

В настоящее время наиболее предпочтительна организационная форма процессов разработки кристаллов монолитных интегральных схем (МИС) – структура взаимоотношений «фаундрии» или fables/foundry. Это форма организации производства, в которой был совершен переход от обработки и сертификации множественных конструкций кристаллов МИС к стандартизации технологического процесса, по которому эти конструкции можно будет изготовить [1]. Полупроводниковая фабрика, стандартизируя свой технологический процесс, создает библиотеку стандартных элементов и предоставляет её дизайн-центрам для проектирования кристаллов МИС. Процедура верификации технологического процесса как обязательный этап стандартизации обеспечивает хорошее совпадение результатов проектирования и изготовления. Это значительно экономит временные и материальные ресурсы, поскольку практически исключает этап макетирования из процессов разработки кристалла МИС, но при этом вся ответственность за конструкцию (схему) кристалла МИС возлагается на дизайн-центр. В такой ситуации дизайн-центрам становится важно получать максимально достоверные результаты измерений изготовленных образцов кристаллов МИС для верификации своих расчетных моделей и проектов. Главным обра-

зом это данные измерений комплексных коэффициентов передачи и отражения, составляющих матрицу рассеяния или S-параметров, но на большинстве предприятий-разработчиков радиоэлектронной аппаратуры нет опыта тестирования бескорпусных интегральных схем.

Цель работы – выполнение обзора доступных в настоящее время «измерительных решений» для тестирования бескорпусных кристаллов МИС.

Ошибки измерений S-параметров и способы их коррекции

Классическая схема измерений S-параметров в комплексном виде – это векторный анализатор цепей, фазостабильные коаксиальные кабели и исследуемое устройство с коаксиальными разъёмами (рис. 1). Как видно на рис. 1, результаты измерений могут отличаться друг от друга [2].

В общем случае ошибки измерений S-параметров можно разделить на 2 группы – случайные (дрейф, шум) и систематические (паразитное проникновение и отражение, рассогласование приемника и источника сигнала измерительного прибора, потери в кабеле, подключенном к исследуемому устройству) [3]. Случайные ошибки не устранимы в полной мере, но можно уменьшить их влияние, увеличив количество повторных измерений. Коррекция систематических ошибок, как правило, основана на методе «искажающего адаптера», как бы подключенного между портами измерительного прибора и разъёмами исследуемого устройства. Имея комплексное описание «искажающего адаптера», т.е. его S-параметры, векторный анализатор цепей (ВАЦ) может скорректировать получаемые данные измерений, исключая его влияние от портов прибора до разъёмов исследуемого устройства. Известны два подхода к получению S-параметров «искажающего адаптера». Один основан на непосредственном измерении S-параметров всего «искажающего адаптера» и называется «калибровка». Второй подход допускает замену данных измерения на результаты моделирования и расчетов некоторых элементов «искажающего адаптера» и называется «внедрение/удаление виртуальных цепей, или де-эмбендинг» (Embedding/De-embedding) [4].

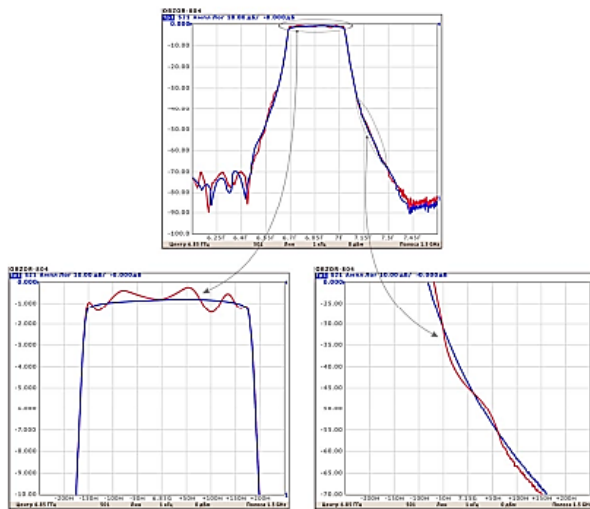
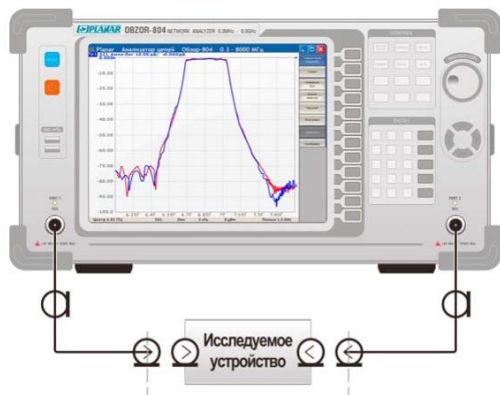


Рис. 1. Измерительная схема полосового фильтра (вверху) и графики результатов измерений фильтра с разными калибровками

Выбирая между методами коррекции ошибок измерений, нужно помнить, что идеального способа нет, и остаточная погрешность будет присутствовать в любом случае. Источником остаточной погрешности в калибровке являются погрешности, доразнесенные в описании калибровочных мер при создании набо-

ра. Кроме того, механический износ мер в процессе эксплуатации также увеличивает расхождение данных между описанием мер и текущим фактическим состоянием. Погрешность модели виртуальных цепей, в свою очередь, не устранима полностью из-за погрешности расчетов, допущенных при моделировании, кроме того, механический износ мер в процессе эксплуатации увеличивает расхождение данных модели виртуальной цепи и текущего состояния.

Калибровка, если есть возможность её технической реализации, позволяет получить точность измерений выше, чем де-эмбендинг. Для успешной калибровки необходимо предварительное измерение S-параметров заранее известных калибровочных мер, помещенных на место исследуемого устройства. Зная параметры мер, которые ВАЦ должен получить в результате их измерения на этапе калибровки, и сравнивая их с полученными результатами, ВАЦ таким образом определяет параметры «искажающего адаптера», чтобы исключить его влияние. Конструкция калибровочных мер зависит от метода калибровки. Широкое распространение получили семейства калибровочных методов, использующие дискретные меры коэффициента передачи и отражения, а также калибровки на базе мер волнового сопротивления и отражения. Калибровочные наборы (комплекты калибровочных мер) в коаксиальном и волноводном исполнении давно имеют метрологическое обоснование своего применения. Для них существуют эталоны измерений, аттестованные методики поверки и т.д., а вот калибровочные наборы с интегральными элементами (тонкопленочными калибровочными мерами), коаксиально-микроразрывными переходами – этот вопрос с точки зрения метрологии остается открытым.

Де-эмбендинг

Одним из вариантов повышения точности измерений для бескорпусных кристаллов МИС являются методы де-эмбендинга, или внедрения/удаления виртуальных цепей. Примером де-эмбендинга может послужить метод удвоенной перемины «2x-Through», или в русскоязычном варианте этот алгоритм получил название «деление пополам» [5].

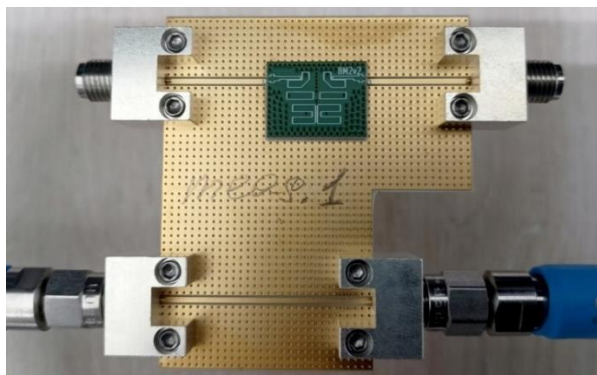


Рис. 2. Оснастка для измерения кристалла МИС методом деления пополам

Для переноса плоскости измерений с портов прибора на входы исследуемого устройства, т.е. на контактные площадки кристалла, предварительно измеряются S-параметры калибровочного коаксиально-микрополоскового устройства подключения с целой микрополосковой линией, без разрыва для установки кристалла. Полученный результат измерения делится пополам и заносится в ВАЦ. Затем подключается устройство с кристаллом, прибор из полученных значений вычитает занесенные в него значения подводящих микрополосковых линий калибровочного устройства, исключая их влияние на результаты измерений. В этом методе делаются два допущения: линии и разъемы калибровочного устройства и устройства подключения идентичны; нет разбега фаз, поэтому геометрическая середина микрополосковой линии калибровочного устройства совпадает с точкой деления фазы пополам.

Калибровка SOLT

Название метода состоит из первых букв имен калибровочных мер Short, Open, Load и Thru. Первые три меры реализуют режимы «Короткое замыкание», «Холостой ход», «Согласованная нагрузка 50 Ом» и служат для определения коэффициента отражения, а четвертая мера «Перемычка» обладает минимальной длиной и служит для определения коэффициента передачи (рис. 3).

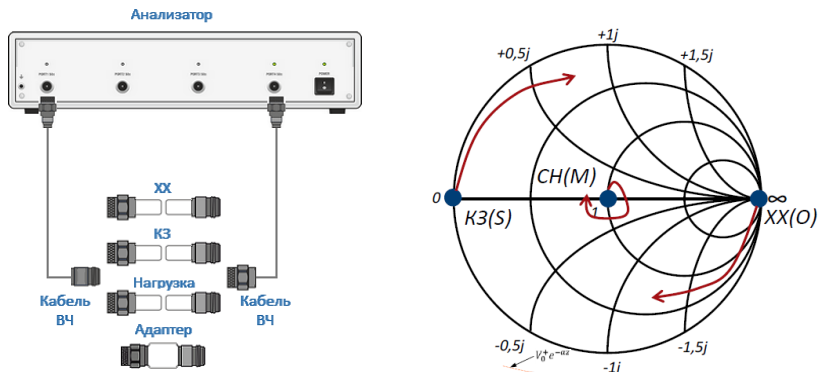


Рис. 3. Автоматический калибровочный модуль (слева) и набор коаксиальных мер SOLT (справа)

Для калибровки необходимо произвести семь измерений: по три измерения на каждый порт для определения коэффициентов отражения и одно измерение для определения коэффициента передачи с использованием меры «Перемычка». Одним из главных преимуществ этого метода является относительная техническая простота изготовления мер для коаксиального или интегрального (тонкоплёночного) исполнения.

Калибровка TRL

Название метода состоит из первых букв имен, используемых в нем калибровочных мер Thru, Reflection, Line. Одна мера на определение отражения (ОХ или КЗ) и две на определение волнового сопротивления линии – перемычки с нулевой длиной и отрезка линии с изменением фазы от 20° до 160° . Если этого отрезка не хватает, чтобы перекрыть весь диапазон рабочих частот, то калибровочный набор дополняется отрезками линии, рассчитанными на другую длину волны, но с сохранением условия положительного изменения фазы. Как правило, 3–4 отрезков линии хватает, чтобы перекрыть весь СВЧ-диапазон. Такое расширение метода получило название mTRL или multiTRL.

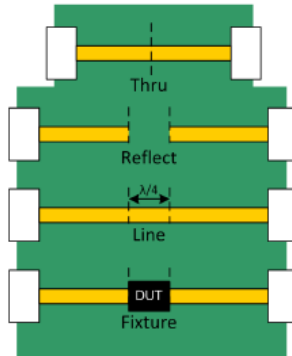


Рис. 4. Пример реализации калибровочных мер TRL в коаксиальном (слева) и тонкопленочном (справа) исполнении

Метод TRL обладает потенциально большей точностью, чем SOLT, но изготовление меры Line в коаксиальном исполнении – это дорогостоящая и технически сложная задача, как правило, область массового применения TRL – это измерения в волноводных трактах. В то же время, в случае интегрального исполнения калибровочных мер, оба метода одинаково применимы, поддерживаются большинством приборов ВАЦ, но следует признать, что SOLT получил более широкое распространение, в том числе и для калибровки зондовых измерений.

Подключение к бескорпусным кристаллам МИС

Особенность организации измерения S-параметров бескорпусных интегральных схем – это учет отсутствия разъемов, к которым можно подключить измерительный тракт, предварительно откалиброванный. Ввод/вывод измерительного сигнала на контактную площадку кристалла МИС можно реализовать двумя способами – механическим контактом шупа зондовой головки или монтажом перемычек от микрополосковой линии устройства подключения. Зондовые измерения возможны не только с помощью зондовой станции в различной конфигурации (от антивибрационного стола до климатической камеры), но и с применением более дешевых решений – настольных РСВ пробников (рис. 5).



Рис. 5. Настольные РСВ-пробники (слева), зондовая станция (справа)

Калибровка зондовых измерений осуществляется с помощью калибровочных плат, на которых роль коаксиальных нагрузок Short, Open, Load и Thru реализуют тонкопленочные элементы. В зависимости от конструкции контактных площадок кристалла МИС, могут встречаться разные конструкции зондовых головок и калибровочных мер, но на большинстве кристаллов МИС реализован ввод/вывод сигнала как G-S-G (Ground – Signal – Ground), так и на плате [6] (рис. 6).

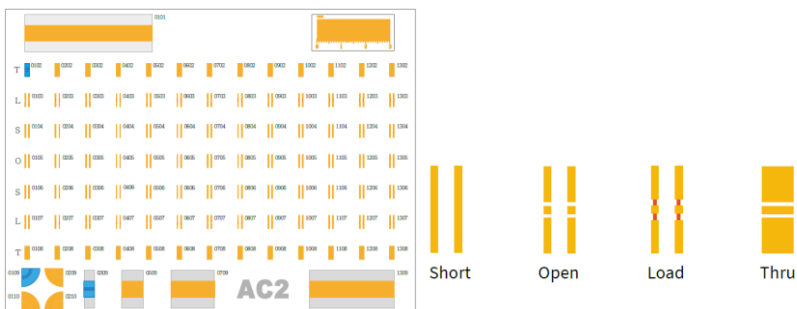


Рис. 6. Калибровочная плата MPI AC2 (слева) и тонкопленочные меры SOLT на ней (справа, увеличено) [6]

Щуп зонда касается калибровочных мер на этапе калибровки, затем на этапе измерений контактных площадок кристалла МИС, и, таким образом, зондовые измерения становятся од-

ними из самых точных, так как плоскость измерения переносится прямо на контактную площадку кристалла МИС. Вторым несомненным преимуществом зондовых измерений является возможность неразрушающего контроля. Недостаток метода – высокая цена зондовой станции. Очень часто тестирование кристаллов МИС необходимо выполнять не только для нормальных условий (комнатные температура, влажность), но и в широком диапазоне температур. Стоимость организации зондовых измерений в составе климатических испытаний, особенно при отрицательных температурах, возрастает многократно. Помимо традиционных антистатических требований к помещению, для зондовой станции потребуется ещё размещение дополнительной инженерной инфраструктуры, приобретение зондовых головок, кабелей в климатическом исполнении и т.д. Помимо этого нужно учитывать, что последние 30 лет почти всё в области СВЧ-зондовых измерений – зондовые станции, калибровочные платы, программное обеспечение для калибровки векторных анализаторов цепей и сами приборы ВАЦ – было зарубежного производства и в настоящее время труднодоступно. Вселяет надежду появление в 2022–2023 годах отечественных ВАЦ до 40 ГГц от предприятий «Планар» (г. Челябинск) и «Микран» (г. Томск), а также начало работ по созданию системы метрологического обеспечения СВЧ-измерений на подложке в ФГУП «ВНИИФТРИ».

При всех сложностях приобретения и обслуживания зондовой станции менее дорогостоящие настольные РСВ пробники (зонды) являются далеко не лучшей для неё альтернативой. Отсутствие антивибрационного стола сильно осложняет измерения, значительно увеличивая время позиционирования и планаризации зондов.

Решения на базе устройств подключения чрезвычайно разнообразны. Установку кристалла МИС в разрыв полосковой линии можно рассматривать как этап тестирования кристалла в составе конструкции микроэлектронного устройства. Такое «мини-макетирование» имеет свои плюсы и минусы. С одной стороны, каждый новый тип кристалла требует разработки нового устройства подключения, с другой – полученные результаты служат основанием для выработки технических требований к

монтажу кристалла МИС. К другим достоинствам можно отнести низкую цену изготовления каждого отдельного устройства подключения и возможность установить разнообразную «обвязку» кристалла непосредственно рядом с ним (рис. 7).

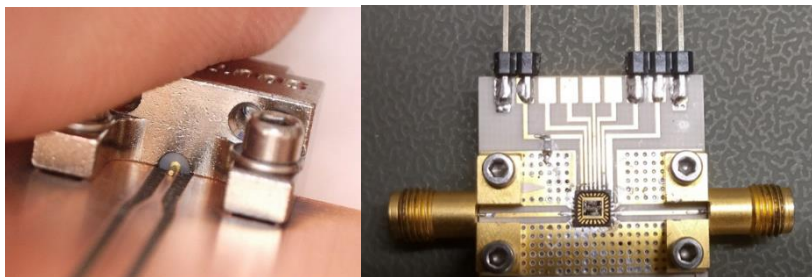


Рис. 7. Коаксиально-микрорословый переход (слева) и устройство подключения (справа)

Главным недостатком метода является неоднородность коаксиально-микророслового перехода. Его влияние можно достаточно хорошо скомпенсировать, используя методы дембендинга. Если требования к точности измерений относительно невысоки, а рабочие частоты меньше гигагерца, влиянием перехода и подводящих полосковых линий можно пренебречь и выполнить калибровку только измерительных кабелей традиционным коаксиальным калибровочным набором.

Заключение

Анализ причин возникновения ошибок измерений S -параметров и методов их коррекции с учетом технической реализации подключения к бескорпусным кристаллам МИС и температурного диапазона измерений позволяет сделать вывод о бесперспективности поиска универсального измерительного решения в пользу подбора комбинации из нескольких решений. С учетом накопленного опыта тестирования кристаллов в АО «ЦКБА» можно сказать, что оптимальным будет организация двух измерительных решений. Основная масса кристаллов МИС направляется на зондовую станцию для измерения S -параметров в нормальных условиях. Для проведения климатических испыта-

ний и некоторых других часть из этих кристаллов МИС выборочно монтируется в специально разработанные для этого кристалла устройства подключения.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Ворожцов А. Л.* Развитие технологии производства отечественной ЭКБ // Современные проблемы радиофизики и радиотехники : сб. докл. Ом. науч. семинара / отв. ред. С. В. Кривальцевич. Вып. 8. Омск : ОНИИП, 2020. С. 27–35.

[2] Калибровка перемычкой с неизвестными параметрами. URL: <https://planarchel.ru/upload/iblock/858/d9i51w8x50gae4rfb1pugn6udhjtkyu5/Калибровка%20ВАЦ%20перемычкой%20с%20неизвестными%20параметрами.pdf>.

[3] *Дансмор Д. П.* Настольная книга радиоинженера. Измерение параметров СВЧ устройств с использованием передовых параметров методик векторного анализа цепей. М. : Техносфера, 2018.

[4] *Торгованов А.* Внедрение и удаление виртуальных цепей // Клуб радиоинженеров. 11.10.2019. Калибровка ВАЦ, Embedding/De-embedding. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=RpZOWFXzs8w>.

[5] *Ревутский С.* De-embedding от «Планар» URL: <https://vk.com/@svchushki-de-embedding-ot-planar>.

[6] MANUAL - AC-2. MPI Corporation 2022. URL: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-AC-2-Manual.pdf>.

Ворожцов Александр Леонидович, сотрудник Центрального конструкторского бюро автоматики, инженер Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, alek.vorog@yandex.ru.

А. Л. Ворожцов, И. В. Сунцова, М. В. Чернявская

**РАЗРАБОТКА КАЛИБРОВОЧНОЙ ПЛАТЫ
ДЛЯ ЗОНДОВЫХ ИЗМЕРЕНИЙ S-ПАРАМЕТРОВ
БЕСКОРПУСНЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ**

Доклад посвящен опыту разработки специальной калибровочной платы с набором тонкопленочных калибровочных мер SOLT (XX, K3, CN 50 Ом и Перемычка), необходимой для проведения измерений S-параметров бескорпусных кристаллов монокристаллических интегральных схем в СВЧ-диапазоне на зондовой станции и отечественном векторном анализаторе цепей S50244.

Ключевые слова: зондовые СВЧ-измерения, тонкопленочные калибровочные меры SOLT.

Осваивая разработку полупроводниковых интегральных схем в формате фаундри, отечественные предприятия радиоэлектронной промышленности получают преимущества от применения в своих изделиях уникальной электронной компонентной базы, разработанной под собственные нужды, но сталкиваются с необходимостью организации зондового контроля изготовленных образцов для верификации своих проектов разработанных кристаллов монокристаллических интегральных схем (МИС). Получение необходимых для верификации «истинных значений» S-параметров бескорпусных кристаллов МИС требует переноса плоскости измерения от портов векторного анализатора цепей (ВАЦ) непосредственно к входам схемы, т.е. на контактные площадки кристалла. Применение традиционных устройств подключения с установкой кристалла в разрыв микрополосковой линии ограничено неустранимыми ошибками, вызванными потерями и рассогласованием на коаксиально-микрополосковых переходах. Традиционная калибровка на базе коаксиального калибровочного набора переносит плоскость измерения от порта ВАЦ только до конца коаксиального кабеля, а следующую, микрополосковую, часть измерительного тракта она не учитывает, что осложняет верификацию. Измерения на

зондовой станции позволяют перейти от коаксиальных калибровочных мер к тонкопленочным калибровочным платам и учесть влияние не только кабелей, но и зондовых головок, т.е. перенести плоскость измерения на контактную площадку кристалла МИС при условии применения калибровочной платы и программного обеспечения (ПО) для внесения данных её калибровочных мер в ВАЦ. Долгое время в области зондовых СВЧ-измерений приборы, платы и ПО были зарубежного производства, но в последние несколько лет ситуация стала меняться. На рынке появились ВАЦ до 40 ГГц от отечественных производителей – Р4М-40 от АО «НПФ «Микран» (г. Томск) и S50244 от ООО «Планар» (г. Челябинск). Альтернативы калибровочному ПО, аналогичному QAlibria, в настоящее время нет, но в современных ВАЦ есть возможность создания собственных калибровочных наборов.

Целью исследования стали разработка и изготовление калибровочной платы, внесение параметров её калибровочных мер в отечественный ВАЦ для проведения зондовых измерений S-параметров кристаллов МИС в СВЧ-диапазоне.

Поставленная цель достигается последовательным решением следующих задач:

1. Выбор метода калибровки.
2. Проектирование тонкопленочных калибровочных мер.
3. Изготовление калибровочной платы.
4. Формирование калибровочного набора и внесение его в ВАЦ.
5. Проведение измерений S-параметров образцов кристаллов МИС с разными калибровками для оценки достигнутых результатов.

В основу выбора метода калибровки были положены два требования: поддержка его отечественными ВАЦ и технологическая возможность изготовления его мер. Самыми распространёнными методами является SOLT (Short Open Load Thru) и TRL (Thru Reflection Line). Первый представляет собой набор дискретных мер коэффициента передачи и отражения: короткое замыкание – КЗ (Short), холостой ход – ХХ (Open), согласованная нагрузка 50 Ом – СН (Load) и перемычка нулевой длины – Пе-

ремычка (Thru). Второй метод – это набор мер волнового сопротивления и отражения [1]. Считается, что TRL потенциально обладает большей точностью, чем SOLT [2], но изготовление калибровочных мер для TRL в диапазоне 0,1–1 ГГц связано с определёнными трудностями из-за больших размеров линий, поэтому был выбран метод SOLT.

Проектирование тонкопленочных калибровочных мер начинается с формирования технических требований к ним. Такие требования включают рекомендации по выбору материала подложки, её толщину, габариты, диэлектрические свойства и т.д. Затем определяется состав осаждаемых слоев (металлизированного, резистивного и защитного). Топология интегральных элементов калибровочных мер должна не только реализовывать режимы XX, KЗ, СН и передачу с минимальными потерями, но и учитывать при этом конструкцию зондовой головки G-S-G (Ground-Signal-Ground) или G-S, а также шаг между её щупами (pitch), площадь контактной поверхности зонда и т.д.

Как правило, этот выбор зависит от топологии исследуемого кристалла МИС. В кристаллах, разработанных АО «ЦКБА», контактные площадки ввода и вывода сигнала располагаются, как правило, по типу G-S-G с межцентровым расстоянием между контактными площадками 150 или 250 мкм. После согласования всех требований был разработан эскиз калибровочной платы, приведенный на рис. 1.

Далее методами вакуумного осаждения и фотолитографии, согласно разработанному эскизу, была изготовлена калибровочная плата из корундового материала ВК 100-1 толщиной 0,25 мм с тонкопленочными калибровочными мерами SOLT по типу G-S-G с поддержкой зондовых головок с шагом 0,15–0,4 мм. Металлизация Cr-Cu толщиной 4 мкм осаждалась вакуумным напылением, а защитный слой Ni-Au (Н1.Зл2) – гальваническим наращиванием в «окна». Рисунок топологии платы и совмещение резистивного и проводящего слоев были сформированы на установке безмасковой литографии MIVA 12100 Laser Mask Writer. Фоточувствительный материал (позитивный фоторезист) методом центрифугирования наносился на пластину из ВК 100-1. Затем на установке MIVA 12100 без использования фотошабло-

на и других видов промежуточных масок формировался резистивный слой с реперными знаками (D-кодами), необходимыми для последующего совмещения с проводящим слоем. В результате несовмещение между сформированными слоями на плате составило не более 5 мкм, а полученная топология в маскирующем слое пластины была сформирована с точностью ± 2 мкм. Зазоры между площадками Ground (Земля) и Signal (Сигнал) в мерах СН, XX и Перемычка были изготовлены по 50 мкм при ширине площадки Signal – 100 мкм. Резисторы были сформированы из материала РС3710 размерами 0,05×0,15 мм номиналами по 100 Ом. С учетом параллельного включения резисторов в конфигурации G-S-G результирующей номинал сопротивления меры СН составил 50 Ом. На рис. 2 приведено фото фрагментов изготовленной калибровочной платы с увеличенным изображением меры КЗ, XX, СН и Перемычка (Short, Open, Load, Thru).

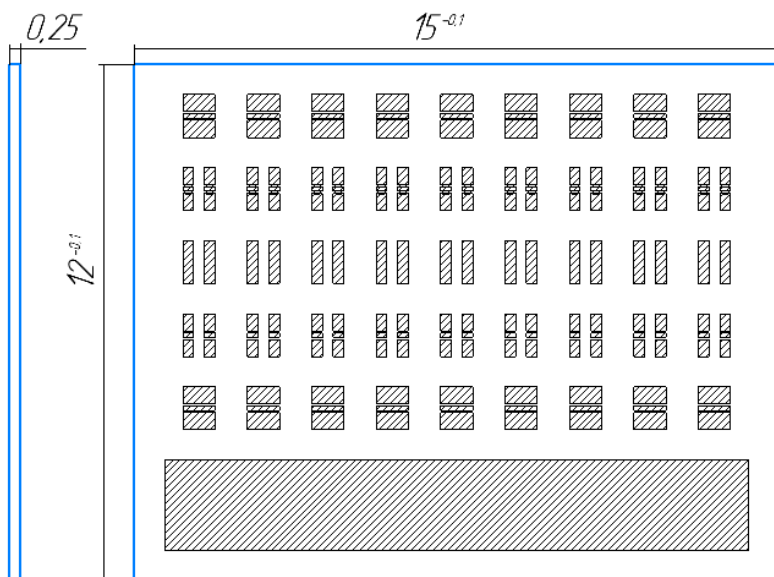


Рис. 1. Эскиз калибровочной платы

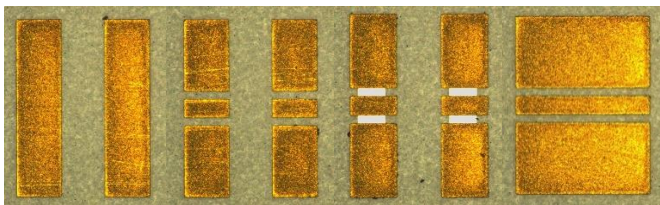


Рис. 2. Изготовленные калибровочные меры К3, XX, СН и Перемычка (увеличено)

В современных ВАЦ поддерживаются два подхода к формированию описания параметров калибровочных мер: модельный и табличный. В первом случае каждая мера представляется в виде модели эквивалентной цепи, как, например, мера XX представляется краевой емкостью и описывается функцией частоты в виде полинома 3-го порядка (рис. 3). Во втором подходе калибровочные меры определяются с помощью таблицы S-параметров в формате s2p или s1p, полученной либо в результате ЭМ моделирования меры, либо после её измерений на другом аттестованном оборудовании.

Мера		Частота		Описание					Импеданс нагрузки	C0-1e-15 Ф	C1-1e-27 Ф/Гц	C2-1e-36 Ф/Гц ²	C3-1e-45 Ф/Гц ³
Тип	Наименование	F min	F max	Задержка	Z0	Потери	Среда	n/W					
XX	Open	0 Гц	999 ГГц	23.35 пс	50 Ω	3.2 ГΩ/с	Ковксон			4,3	-718	26,7	-0,3
K3	Short	0 Гц	999 ГГц	23.35 пс	50 Ω	3.5 ГΩ/с	Ковксон		4	0	0	0	0
Мер.	Load	0 Гц	999 ГГц	0 с	50 Ω	0 Ω/с	Ковксон	50 Ω					
Проч/Линия	Thru-F/F-	0 Гц	999 ГГц	87.394 пс	50 Ω	4 ГΩ/с	Ковксон						
Мехов. прен.	Unk1 Thru	0 Гц	999 ГГц	ABTO			Ковксон						

Рис. 3. Скриншот редактора калибровочных мер в ВАЦ S50244 с внесенными данными мер калибровочной платы MPI AC2-2 как моделей эквивалентной цепи

Был выбран второй способ. На первом этапе зондовая станция калибровалась с помощью калибровочной платы MPI AC2-2 [3], затем производились измерения мер разработанной платы и на третьем этапе на основании полученных данных формировался её калибровочный набор в ВАЦ S50244 с использованием встроенного ПО ВАЦ.

Для оценки полученных результатов были проведены измерения S-параметров IPD (Integrated Passive Device) кристалла полосового фильтра ПФ1928 с помощью разработанной калиб-

ровочной платы с последующим сравнением с данными независимых измерений, выполненных фабрикой на этапе изготовления этого фильтра. Полученные АЧХ практически полностью совпали, и отклонение S21 в полосе пропускания 1,9–2,8 ГГц не превысило 0,1 дБ.

В заключение можно сказать, что в настоящее время зондовые измерительные решения на базе приборов и калибровочных плат отечественного производства могут быть адекватной заменой иностранному оборудованию и ПО.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дансмор Д. П. Настольная книга радиоинженера. Измерение параметров СВЧ-устройств с использованием передовых параметров методик векторного анализа цепей. М. : Техносфера, 2018.

[2] *Errikos Lourandakis*. On-Wafer Microwave Measurements and De-Embedding // 2016 ARTECH HOUSE 685 Canton Street Norwood, MA 02062.

[3] MANUAL - AC-2. MPI Corporation 2022 URL: <https://www.mpi-corporation.com/wp-content/uploads/ASTPDF/MPI-AC-2-Manual.pdf>.

Ворожцов Александр Леонидович, сотрудник Центрального конструкторского бюро автоматики, инженер института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, alek.vorog@yandex.ru.

Сунцова Ирина Владимировна, сотрудник Центрального конструкторского бюро автоматики, microelectronics@ckba.net.

Чернявская Мария Владимировна, сотрудник Центрального конструкторского бюро автоматики, microelectronics@ckba.net.

В. С. Кривальцевич

РАЗРАБОТКА И ИЗГОТОВЛЕНИЕ 3D-МАКЕТА РАДИОСТАНЦИИ

Рассмотрен процесс создания 3D-модели КВ-радиостанции Р-610-3 и изготовление её макета с использованием 3D-принтера.

Ключевые слова: *макет радиостанции, 3D-проектирование, 3D-печать.*

Введение

Создание макета предполагает возможность изготовления объекта в будущем. Макет [1, 2] является уменьшенной копией предмета, что предоставляет возможность человеку понять, как будет выглядеть прибор или механизм после постройки или изготовления. Таким образом, покупатели, например, могут заранее оценить все преимущества будущего объекта [1].

Для макетирования была выбрана радиостанция Р-610-3 (рис. 1), которая предназначена для обеспечения радиосвязи с аварийными объектами и аварийно-спасательными силами ВМФ, а также с подвижными объектами других министерств и ведомств России, аварийно-спасательных служб на суше и на море [3].



Рис. 1. Внешний вид радиостанции Р-610-3 [3]

Р-610-3 обеспечивает [3]: ведение радиотелефонного обмена и работу в телеграфных режимах; автоматическое определение координат и времени по сигналам навигационных систем GPS/ГЛОНАСС; автоматическую передачу идентификатора абонента; селективный избирательный вызов абонентов; автоматическое установление связи в Глобальной морской системе связи при бедствии и для обеспечения безопасности.

Порядок проектирования модели

1. В специальном ПО была спроектирована 3D-модель, которая в точности повторяет радиостанцию.

2. После этого были настроены материалы (наложены цвета на каждый объект).

3. Далее были добавлены текстуры, чтобы модель выглядела более реалистично.

4. Предпоследним этапом были настройка камеры и света в сцене для создания анимации, которая нужна для подробного изучения модели.

5. Создание самой анимации: постановка объекта, света, камеры, их перемещения и интенсивности.



Рис. 2. Изображение 3D-модели

Печать 3D-модели на 3D-принтере

Когда уже была готова модель, началась подготовка к переработке модели под печать, были убраны мелкие детали, которые могли помешать печати. После преобразования модели в специальную программу Cura для печати на 3D-принтере также

были исправлены все недостатки и настроены поддержки. Подбору пластика для печати придавалось особое значение: был выбран специальный пластик, довольно прочный и гибкий при механических воздействиях. Последним этапом стала печать на 3D-принтере. Модель получилась с первого раза, оставалось только убрать поддержки и обработать некоторые неровности.



Рис. 3. Вид изготовленного макета радиостанции

Таким образом, был спроектирован макет радиостанции P-610-3 (рис. 3). 3D-модель создана в программе Blender и отпечатана на 3D-принтере. После создания модели она была показана на уроке информатики, а также рассказано одноклассникам о её свойствах и принципах создания.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Макет // Википедия. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Макет> (дата обращения: 14.01.24).

[2] Макет // Media contented. URL: <https://media.contented.ru/glossary/maket/> (дата обращения: 14.01.24).

[3] P-610-1 // РОСОБОРОНЭКСПОРТ. URL: <https://roe.ru/catalog/sukhoputnye-vosyka/voennaya-tekhnika-svyazi-i-avtomatizirovannye-sistemy-upravleniya/sredstva-i-kompleksy-radiosvyazi/r-610-1> (дата обращения: 15.01.24).

Кривальцевич Виктор Сергеевич, ученик гимназии № 123 им. О.И. Охрименко, krviktor2018@mail.ru.

А. А. Пуцькович

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДКМВ-РАДИОСЕТИ

Реализовано ПО для моделирования радиосети ДКМВ-радиосвязи. Показано различие в оптимальных путях передачи данных в разных гелиогеофизических условиях. Исследована производительность алгоритмов поиска кратчайшего пути на множестве точек.

Ключевые слова: радиосеть, алгоритм Дейкстры, алгоритм Беллмана-Форда, алгоритм Флойда-Уоршелла, ДКМВ-радиосвязь, ионосферное распространение.

Для обеспечения радиосвязи на дальние расстояния и территории с низкой плотностью населения используются различные виды связи [1]: коротковолновая (КВ), средневолновая (СВ) и спутниковая. СВ-связь требовательна к размерам антенн, спутниковая связь качественная, но зависит от орбиты спутника и является слишком дорогой для абонентов. КВ-связь же доступна даже для мобильных абонентов, например геологических партий или кочующих оленеводов, в то же время особенности ионосферного распространения ДКМВ-волн, особенно на участках суши и моря, близких к полюсам, имеют малое отношение сигнал/шум и, как следствие, низкую скорость передачи, иногда связь между некоторыми точками может отсутствовать вовсе. Одним из выходов в этой ситуации является создание и/или использование КВ-станций как ретрансляторов.

Для эксперимента были выбраны радиосеть [2], состоящая из 15 поселений (табл. 1 и рис. 1), и определены необходимые условия для связи, наблюдавшиеся в определенные даты:

- 22 декабря – низкая солнечная активность со значением Вольфа 20;

- 22 июня в полдень – высокая солнечная активность со значением Вольфа 100. Маршрутизация информационных потоков в сети строится на базе краткосрочного прогноза распространения;

- 22 марта в 6:00 по UTC – неравномерная освещенность трасс со значением солнечной активности 75. Существует возможность оперативного обмена информацией между радиоканалами и Центром управления связью: сообщения о новых маршрутах доставки данных приходят не раз в сутки, а, например, ежечасно.

Список поселений для Арктического региона России

№ пункта	Наименование	Координаты		Населённость
		Широта	Долгота	
1	Земля Франца-Иосифа	80,62	58,03	0
2	Белушья Губа (Новая Земля)	71,53	52,33	1972
3	Рогачёво (Новая Земля)	71,6	52,4	330
4	Ямальский район	70,2	72,5	0
5	Диксон (Краснодарский край)	73,5	80,5	319
6	Караул (Краснодарский край)	71,7	83,6	781
7	Усть-Авам (Краснодарский край)	71,12	92,82	339
8	Хатанга (Краснодарский край)	72,83	105,1	2645
9	Жилиндийский национальный наслег (Якутия)	70,13	113,1	0
10	Усть оленек (Якутия)	72,98	119,8	27
11	Кюсюр (Якутия)	70,68	127,4	1345
12	Усть-Куйга (Якутия)	70	135,6	668
13	Юкагир (Якутия)	71,77	139,8	128
14	Русское Устье (Якутия)	71,13	149,3	118
15	Остров Врангеля	70,98	178,5	0

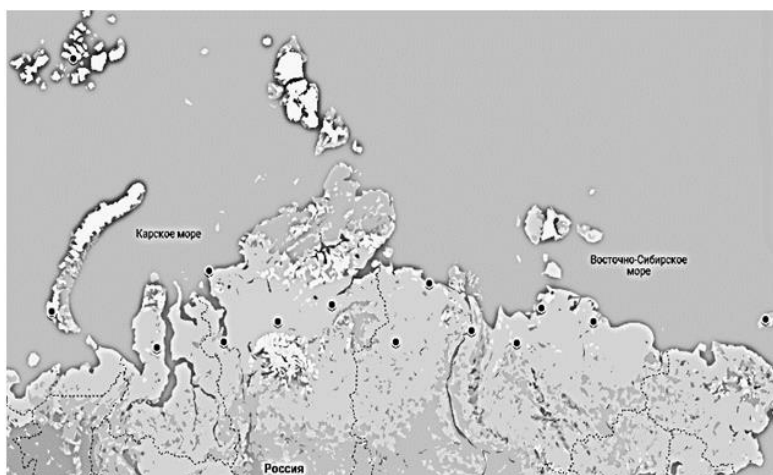


Рис. 1. Расположение рассматриваемых населенных пунктов на карте

Радиоканалы имеют полосу 3,1 кГц с мощностью радиопередающего устройства 1 кВт, применяются ненаправленные, развернутые над мерзлой почвой антенны с КСВ не более 4, уровень радишумов в пунктах соответствует сельской местности. Рабочие частоты назначены вблизи оптимальных, определенных по долгосрочному прогнозу условий распространения радиоволн.

Расчет для всех радионаправлений выполнялся на базе программного обеспечения «Трасса», где на основе встроенных моделей ионосферы и введенных параметров о месте, типе шума, мощности передатчика и т.д. рассчитываются средние отношения сигнал/шум (ОСШ). Исходя из них и используя зависимости скорости передачи информации от ОСШ [3], была оценена скорость передачи информации между всеми узлами радиосети (табл. 2–4).

Т а б л и ц а 2

Расчетные значения скорости в Кбит/с для условия 1

		Ширина	80,62	71,53	71,6	70,2	73,5	71,7	71,12	72,83	70,13	72,98	70,68	70	71,77	71,13	70,98
		Долгота	58,03	52,33	52,4	72,5	80,5	83,6	92,82	105,1	113,1	119,8	127,4	135,6	139,8	149,3	178,5
Ширина	Долгота	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
80,6167	58,033	1	12,8	12,8	14,4	12,8	12,8	12,8	12,8	11,2	9,6	11,2	11,2	11,2	9,6	6,4	6,4
71,5333	52,333	2			14,4	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	11,2	9,6	6,4	6,4	3,2	8,0	
71,6	52,4	3			14,4	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	11,2	9,6	6,4	6,4	3,2	8,0	
70,1667	72,517	4				4,8	6,4	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	11,2	9,6	8,0	8,0	
73,5	80,533	5					3,2	12,8	12,8	12,8	12,4	11,2	11,2	11,2	9,6	4,8	
71,7	83,55	6						3,2	12,8	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	11,2	4,8	
71,1167	92,817	7							3,2	12,8	12,8	12,8	12,8	11,2	11,2	6,4	
72,8333	105,08	8								4,8	3,2	12,8	12,8	12,8	12,8	9,6	
70,1333	113,08	9									3,2	12,8	12,8	12,8	12,8	11,2	
72,9833	119,82	10										3,2	12,8	12,8	12,8	11,2	
70,6833	127,37	11											3,2	4,8	12,8	11,2	
70	135,55	12													2,4	6,4	12,8
71,7667	139,83	13														3,2	12,8
71,1333	149,28	14															12,8
70,9833	178,48	15															

Таблица 3

Расчетные значения скорости в Кбит/с для условия 2

		Ширина	80,62	71,53	71,6	70,2	73,5	71,7	71,12	72,83	70,13	72,98	70,68	70	71,77	71,13	70,98
Ширина	Долгота	Долгота	58,03	52,33	52,4	72,5	80,5	83,6	92,82	105,1	113,1	119,8	127,4	135,6	139,8	149,3	178,5
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
80,6167	58,033	1	3,2	4,8	4,8	3,2	1,0	0	0	2,4	0	3,2	2,4	3,2	2,4	1,0	
71,5333	52,333	2			12,8	2,4	2,4	0	3,2	3,2	3,2	1,6	1,0	1,0	1,0	0	
71,6	52,4	3			12,8	2,4	2,4	0	3,2	3,2	3,2	1,6	1,0	1,0	1,0	0	
70,1667	72,517	4				2,4	2,4	2,4	1,0	0	0	8,0	3,2	2,4	1,6	0	
73,5	80,533	5					0	1,6	2,4	1,0	0	0	3,2	3,2	3,2	1,0	
71,7	83,55	6						0	1,6	1,0	0	0	0	3,2	3,2	1,0	
71,1167	92,817	7							0	2,4	1,6	1,0	0	0	0	1,0	
72,8333	105,08	8								0	0	2,4	1,6	1,6	0	3,2	
70,1333	113,08	9									0	2,4	3,2	2,4	1,6	6,4	
72,9833	119,82	10										1,0	2,4	2,4	2,4	0	
70,6833	127,37	11												0	2,4	3,2	0
70	135,55	12													0	4,8	1,0
71,7667	139,83	13														2,4	1,6
71,1333	149,28	14															3,2
70,9833	178,48	15															

Таблица 4

Расчетные значения скорости в Кбит/с для условия 3

		Ширина	80,62	71,53	71,6	70,2	73,5	71,7	71,12	72,83	70,13	72,98	70,68	70	71,77	71,13	70,98
Ширина	Долгота	Долгота	58,03	52,33	52,4	72,5	80,5	83,6	92,82	105,1	113,1	119,8	127,4	135,6	139,8	149,3	178,5
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
80,6167	58,033	1	9,6	9,6	11,2	9,6	6,4	4,8	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	3,2	1,6
71,5333	52,333	2			14,4	8,0	8,0	6,4	4,8	3,2	3,2	3,2	2,4	3,2	2,4	0	
71,6	52,4	3			14,4	8,0	8,0	6,4	4,8	3,2	3,2	3,2	2,4	3,2	1,6	0	
70,1667	72,517	4				6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	4,8	3,2	3,2	3,2	0	
73,5	80,533	5					1,6	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	4,8	4,8	4,8	1,0	
71,7	83,55	6						3,2	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	4,8	3,2	0	
71,1167	92,817	7							6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	4,8	4,8	6,4	1,0
72,8333	105,08	8								6,4	6,4	8,0	8,0	8,0	8,0	3,2	
70,1333	113,08	9									6,4	8,0	9,6	9,6	9,6	3,2	
72,9833	119,82	10										6,4	9,6	9,6	9,6	6,4	
70,6833	127,37	11											6,4	9,6	11,2	6,4	
70	135,55	12													4,8	11,2	8,0
71,7667	139,83	13														9,6	9,6
71,1333	149,28	14															9,6
70,9833	178,48	15															

Используя набор предоставленных данных, можно реализовать специальные алгоритмы, нацеленные на вычисление оптимальных, то есть обеспечивающих максимальные скорости информационного обмена, маршрутов передачи информации. Эти алгоритмы способны определить наиболее эффективные и

высокоскоростные маршруты для передачи данных. Таким образом, их применение позволит существенно улучшить стабильность радиосети, а также минимизировать влияние помех при передаче данных.

Всего было рассмотрено три алгоритма:

1) Алгоритм Беллмана-Форда, названный в честь Ричарда Беллмана и Лестера Форда. Он был разработан в 1950-х гг. для нахождения кратчайших путей между одной стартовой вершиной и всеми другими вершинами в графе, который может содержать ребра отрицательного веса, но без циклов отрицательного веса. Это делает его особенно полезным для решения задач, связанных с поиском кратчайших маршрутов в сетях, имеющих отрицательные веса ребер, например в протоколах дистанционно-векторной маршрутизации RIP (Routing Information Protocol). Алгоритм работает путем последовательного обновления расстояний до всех вершин в графе, начиная с начальной. В его основе лежит идея, что, зная минимальное расстояние до вершины, можно обновить расстояния до всех ее соседей, используя лучшие пути, которые проходят через эту вершину.

2) Алгоритм Флойда-Уоршелла, созданный в 1962 г. и предложенный Робертом Флойдом и Стивеном Уоршеллом. Это популярный алгоритм для нахождения кратчайших путей во взвешенном графе с положительными или отрицательными весами ребер. Он основан на динамическом программировании и использует принцип оптимальности Беллмана, итеративно обновляет матрицу расстояний, чтобы учесть все возможные пути между каждой парой вершин.

3) Алгоритм Дейкстры – еще один известный алгоритм нахождения кратчайшего пути в графе, но, в отличие от алгоритма Флойда-Уоршелла, больше подходит для нахождения кратчайшего пути от одной определенной начальной вершины до всех остальных. Этот алгоритм был разработан нидерландским компьютерным ученым Эдсгером Дейкстрой в 1959 г. Алгоритм работает только с графами, в которых все ребра имеют неотрицательные веса. Это связано с тем, что алгоритм использует «жадный» подход: он постоянно ищет следующую наименьшую вершину для добавления в путь.

Была написана программа, способная рассчитать оптимальные маршруты для выбранной радиосети. Она состоит из нескольких вызывных функций, включающих в себя алгоритмы для расчета оптимальных путей радиосети, создание случайной топографии радиосети и вывода информации результатов расчета, а также графа заранее заданной карты сети, блок-схема которой представлена на рис. 2.

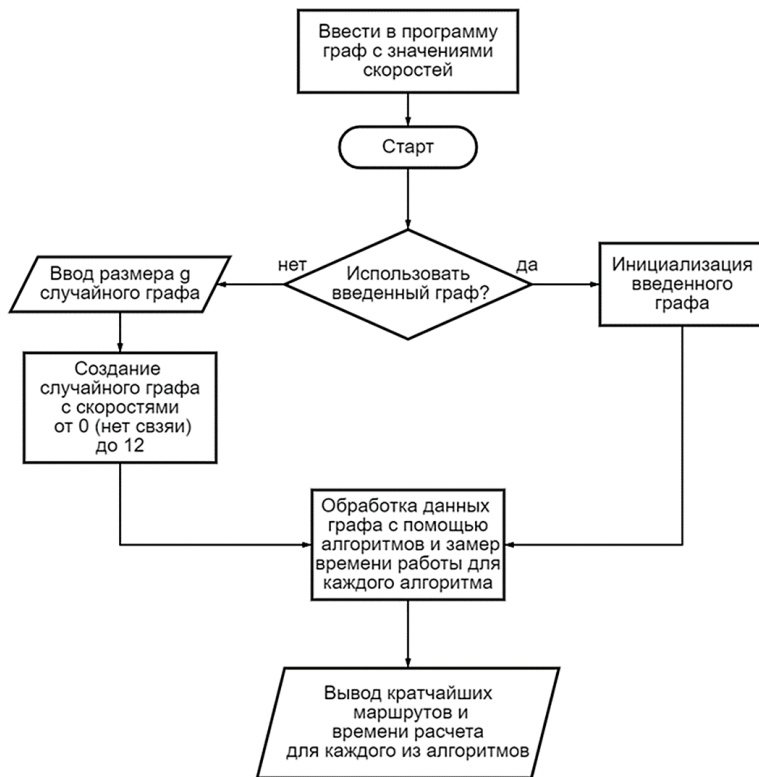


Рис. 2. Блок-схема программы

Программа работает со значениями времени передачи, которые записываются в виде матрицы смежности и отправляются в функции алгоритмов, где обрабатываются и выводятся в от-

дельный текстовый документ «Тест» в виде списка наиболее оптимальных (оптимальных) маршрутов между пунктами. Результаты моделирования сведены в табл. 5, где значение оптимальных маршрутов – условия 1/условия 2/условия 3, знак «+» – это оптимальный путь без ретранслятора.

Т а б л и ц а 5

Транзитные узлы для оптимальных маршрутов между узлами

Широта	80,62	71,53	71,6	70,2	73,5	71,7	71,12	72,83	70,13	72,98	70,68	70	71,77	71,13	70,98
Долгота	58,03	52,33	52,4	72,5	80,5	83,6	92,82	105,1	113,1	119,8	127,4	135,6	139,8	149,3	178,5
Пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1		+/4/+	+/++	+/++	+/++	+13/+	+/4/+	+/3/4	+/+4	+/+5	+/+4	+/++	+/++	+/++	+9/5,10
2			4/4/4	+/++	+/++	+/++	+/4/+	+/++	+/+4	+/+4	+/4/+	+/4/7	+/4/+	8/4,11/7	+9/13
3				+/++	+/++	+/++	+/4/+	+/++	+/+4	+/+4	+/4/+	+/4/7	+/4/+	8/4,11/7	+9/13
4					1/++	1/++	+/++	+/2/+	+/2/4	+/2/+	+/++	+/+9	+/+9	+11/9	+2,9/10
5						1/13/2	+/++	+/++	+/12/+	+/12/+	+/4/+	+/++	+/++	+/++	9/14/10
6							1/4/2	+/++	+/13/+	+/13/+	+/4/+	+14/+	+/++	+/+11	9/14/10
7								1/4,2/+	+/++	+/++	+/4/+	+/4/+	+/4/+	+4,11/+	+9/14
8									4/15/+	6/2/+	+/++	+/++	+/++	+15/+	+9/13
9										6/2/+	+/++	+/++	+/++	+15/+	+9/13
10											6/4,2/+	+/++	+/++	+/++	+14/+
11												7/4/+	+/++	+/++	+9/+
12													8/5/14	+/++	+9/+
13														8/++	+9/+
14															+/++
15															

Было подсчитано количество связей напрямую, через 1 и 2 ретранслятора для трех условий и внесено в табл. 6.

Таблица 6

Количество транзитных узлов для оптимальных маршрутов

Условия	Напрямую	1 ретранслятор	2 ретранслятора
1. 22 декабря W=20	87 (83,1%)	18 (16,9%)	0
2. 22 июня W=100	53 (50,47%)	46 (43,8%)	6 (5,71%)
3. 22 марта W=75	74 (70,47%)	30 (28,57%)	1 (0,95%)

Для условия 1 около 83% маршрутов действуют напрямую и около 16,9% проходят через 2 и более транзитных узла, что соответствует литературным данным. Для условия 2 около 50,47% маршрутов действуют напрямую и около 49,53% проходят через 2 и более транзитных узла. По сравнению с условием 1, количество ретрансляций увеличилось на 32,7%.

Можно сделать вывод, что во многих случаях передать информацию при условии 1 можно и без ретранслятора. В условиях 2 и 3 же при большом поглощении в области D ионосферы необходимость в дополнительных маршрутах доставки информации возрастает. Наиболее часто используемые узлы – 4 (34 раза) и 9 (13 раз). Из этого можно сделать вывод, что в этих узлах высокая нагрузка на инфраструктуру, и, следовательно, необходимо увеличить количество/качество оборудования.

Для сравнения эффективности различных алгоритмов были взяты случайно сгенерированные графы размером 50, 100, 150, 200, 500, 1000 и 2000 с вероятностью в 7,5% на отсутствие связи и диапазоном скоростей от 1 до 12.

Таблица 7

Время работы программы для различных алгоритмов

Размер графа	Время работы Дейкстры	Время работы Беллмана-Форда	Время работы Флойда-Уоршелла
50	0,01 сек.	0,140 сек.	0,120 сек.
100	0,067 сек.	2,134 сек.	1,847 сек.
150	0,220 сек.	10,60 сек.	9,259 сек.
200	0,460 сек.	33,81 сек.	29,82 сек.
500	7,758 сек.	23,749 мин.	20,232 мин.
1000	62,751 сек.	6,417 часов	5,696 часов
2000	468,104 сек.	1,696 дней	1,484 дней

По этим данным составлен график зависимости (см. рис. 3). На нем видно, что при размере радиосети больше, чем 500, различие в скорости работы между алгоритмами становится значительным, хотя время работы алгоритма Беллмана-Форда больше Флойда-Уоршеллского только на 10–15%, алгоритм Дейкстры значительного роста времени не получил.

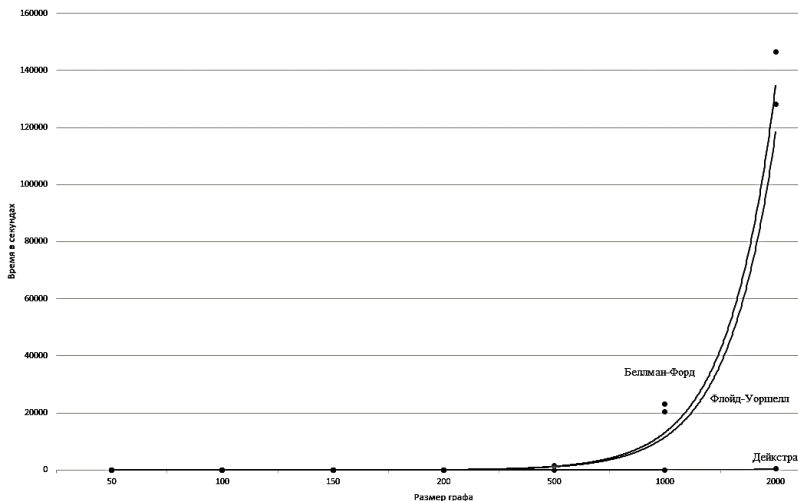


Рис. 3. График зависимости времени работы алгоритма от размера графа

Таким образом, при задаче моделирования радиосети алгоритм Дейкстры является наиболее предпочтительным.

Выводы

Написано программное обеспечение, использующее различные алгоритмы для вычисления оптимальных маршрутов в радиосети. Приведены примеры использования алгоритмов, проведено сравнение скорости связи в промежутках с низкой и высокой солнечной активностью. Показана изменчивость маршрутов в карте радиосети под влиянием солнечной активности на ионосферную связь со значением в 20, 75 и 100.

Таким образом, была показана возможность использования ДКМВ-радиосети для обеспечения более стабильной связи в Арктике. Расчет для большого количества точек показал, что при задаче моделирования радиосети алгоритм Дейкстры является наиболее предпочтительным выбором.

ЛИТЕРАТУРА

[1] *Березовский В. А., Дулькейт И. В., Савицкий О. К.* Современная декаметровая радиосвязь: оборудование, системы и комплексы. М., 2011. 441 с.

[2] *Ашагва П. А., Зачатейский Д. Е., Кривальцевич С. В., Степанова Е. А.* Моделирование ДКМВ-радиосети Арктического региона // Современные проблемы радиофизики и радиотехники : сборник докладов Омского научного семинара / отв. ред. С.В. Кривальцевич. Вып. 9. Омск : ОНИИП, 2021. С. 8–15.

[3] *Пукса Д. О., Романов Ю. В.* К вопросу о влиянии спектральной эффективности сигнала КВ-модемов на их энергетическую эффективность // Техника радиосвязи. 2017. Вып. 1 (32). С. 7–16.

Пуцыкович Андрей Андреевич, студент Омского государственного университета им. Ф.М. Достоевского, radioseminar@radioseminar.pf.

В. С. Синкевич

ПРОГРАММНЫЙ МОДУЛЬ АВТОМАТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ БЛОКИРОВАНИЯ И ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА ПО ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫМ СОСТАВЛЯЮЩИМ 3-ГО ПОРЯДКА

Рассмотрены классификация и применение РПУ, понятие автоматизированного рабочего места. Представлен алгоритм измерения блокирования и интермодуляции 3-го порядка РПУ. Представлены результаты расчета разработанной программы на языке C++, реализующей алгоритм. Проведен сравнительный анализ ручного и автоматизированного измерения.

Ключевые слова: *радиоприемное устройство, блокирование, динамический диапазон по интермодуляционным составляющим 3-го порядка, автоматизированное рабочее место, программная реализация.*

Введение

Коротковолновая (КВ) или декаметровая (ДКМВ) радиосвязь играет важную роль как средство магистральной внутренней и международной, зоновой, подвижной и производственно-диспетчерской связи общего и ведомственного пользования. Несмотря на то что в условиях быстрого развития высокоэффективных кабельных, радиорелейных, тропосферных и спутниковых линий связи удельный вес КВ-радиосвязи снизился, сохраняется необходимость ее технического совершенствования. Основанием для этого является правильная оценка КВ-радиосвязи, учитывающая ее технический потенциал, народнохозяйственное значение и экономическую эффективность, а также стратегическую роль как необходимого резерва [1].

Учитывая важную роль радиоприемных устройств (РПУ) и увеличивающееся количество каналов в создаваемых устройствах систем связи КВ-диапазона, стоит уделять повышенное внимание их параметрам, таким как блокирование, динамический диапазон по интермодуляционным составляющим 3-го порядка.

Актуальность работы определяется тем, что при массовом

производстве ручная проверка изделия не позволяет выпускать продукцию в необходимом объеме в установленные сроки. Реализация данных модулей позволяет существенно сократить время на проверку РПУ.

Целью данной работы является разработка алгоритмов измерения блокирования и динамического диапазона по интермодуляционным составляющим 3-го порядка, создание программного обеспечения в среде Qt Creator на языке программирования C++, проведение испытания программного обеспечения для проверки его работоспособности.

Классификация РПУ

В настоящее время радиосвязь успешно конкурирует с другими видами телекоммуникаций, такими как оптоволоконно или спутниковая связь, благодаря своей доступности, универсальности и гибкости. Современные РПУ обладают множеством функций и высоким качеством приема сигналов.

Радиоприемное устройство – это устройство, предназначенное для приема радиоволн и преобразования их в электрический сигнал, который передается для последующей обработки. РПУ может включать в себя антенну, усилитель, детектор, декодер и другие необходимые для преобразования элементы. Радиоприемники используются для приема радиовещания, передачи информации, беспроводной связи, в спутниковых системах навигации и др.

РПУ можно разделить на одноканальные и многоканальные. Одноканальные приемники используются для решения связанных задач и обеспечения приема стандартных видов модуляции. Суть работы одноканального РПУ заключается в приеме информации по одному каналу, например телеграфного или однополосного телефонного сигнала, после чего при помощи преселектора осуществляется выделение интересующей области спектра. Затем при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП) получаем исходный сигнал. Далее одноканальный приемник посредством выхода выдает обработанные данные на оконечную аналоговую аппаратуру, такую как наушники, телефонную линию.

В настоящее время многоканальное радиоприемное

устройство (МРПУ) представляет собой совокупность одноканальных с индивидуальными антенными входами и опциональным антенным разветвителем либо единое устройство с антенным входом и групповым преселектором.

Высокоизбирательное МРПУ может быть построено при использовании множества узкополосных полосовых фильтров с перекрытием по частоте для обеспечения приема в линейном режиме (без блокирования).

Такая структура построения имеет преимущества:

- коэффициент шума существенно меньше;
- возможность приема сигналов с информационной полосой в 5–10 раз больше, что является существенным для широкополосных сигналов;
- надежность приемника сравнима с надежностью одноканального приемника.

Учитывая особенности распространения радиоволн в КВ-диапазоне, для повышения производительности и эффективности используются многоканальные приемники. Трудоемкость проверки таких устройств растет пропорционально увеличению сложности изделий, вследствие чего возникает проблема – большой объем проводимых испытаний и необходимость в автоматизации процессов измерения.

Современные тенденции разработки систем автоматизации

Применение возможностей современной вычислительной техники для автоматизации процесса обработки информации позволяет увеличить продуктивность труда [2]. Автоматизированные рабочие места (АРМ) позволяют эффективно обрабатывать большие объемы информации, что значительно сокращает время выполнения работ и повышает их точность, а также облегчает труд специалистов [3].

Согласно ГОСТ Р 52016-2003 «Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн. Параметры, общие технические требования и методы измерений», приемники 1-го и 2-го класса должны обеспечивать возможность работы в составе системы автоматического управления каналами радиосвязи.

Представим некоторые из дистанционно выполняемых команд в зависимости от условий эксплуатации:

- включение генератора опорной частоты; включение приемника; установка рабочей частоты (РЧ);
- установка режима работы, обеспечивающего прием излучения выбранного класса с соответствующими параметрами;
- включение автоматической регулировки усиления (АРУ) или ручной регулировки усиления (РРУ);
- выбор степени ослабления сигнала входным аттенуатором [4].

Под АРМ понимают программно-технический комплекс, предназначенный для автоматизации деятельности определенного вида. АРМ объединяет программно-аппаратные средства, организующие взаимодействие человека с компьютером, предоставляет возможность ввода информации и ее вывод через периферийные устройства, как условно представлено на рис. 1.

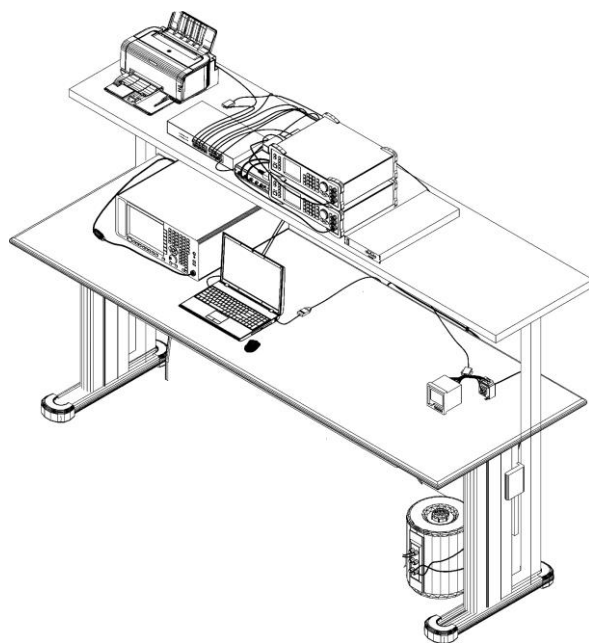


Рис. 1. Условный вид АРМ

АРМ должны создаваться строго в соответствии с их предполагаемым функциональным назначением. Однако общие принципы создания АРМ остаются неизменными: системность; гибкость; устойчивость; эффективность.

Принцип гибкости имеет огромное значение при создании современных АРМ. Этот принцип означает возможность приспособления АРМ к предполагаемой модернизации как программного обеспечения, так и технических средств. В настоящее время, когда скорость устаревания программных и технических средств постоянно растет, соблюдение данного принципа становится одним из важнейших условий при создании АРМ. Для обеспечения принципа гибкости в реально работающих автоматизированных рабочих местах все подсистемы отдельно взятого АРМ выполняются в виде отдельных, легко заменяемых модулей. Чтобы при замене не возникало проблем совместимости, все элементы должны быть стандартизированы.

Выбор языка программирования и среды разработки

Для успешной автоматизации измерения параметров РПУ необходимо определить наиболее подходящий язык программирования и среду разработки (фреймворк).

В настоящее время язык С++ остается одним из наиболее востребованных и популярных языков программирования. Он предоставляет программистам широкие возможности для реализации проектов любой сложности благодаря своим преимуществам, включающим в себя поддержку объектно-ориентированного программирования, высокую производительность, гибкость и масштабируемость, а также многочисленные библиотеки и инструменты разработки. Более того, он позволяет разработчикам создавать кросс-платформенные приложения, которые могут быть запущены на различных операционных системах и аппаратных платформах, что делает его идеальным выбором для создания программного обеспечения в любой индустрии и сфере.

Помимо данного языка программирования, существует множество альтернативных вариантов, например Java и Python. Java – это популярный язык программирования с автоматическим управлением памятью и кросс-платформенностью. Python

– это простой и универсальный язык с акцентом на скорость и читаемость программного кода.

Для наших задач C++ подходит из-за его высокой производительности и возможности оптимизации кода, возможности использования в кросс-платформенности, а также гибкости в решении разнообразных задач.

Фреймворк – это набор инструментов, библиотек и правил для разработки программного обеспечения. Он может содержать готовые компоненты, предоставлять стандарты при разработке, а также ускорять процесс написания кода за счет предварительно определенной архитектуры и структуры. Выбор фреймворка может значительно упростить и ускорить процесс разработки программы, а также помочь в поддержке и расширении проекта в дальнейшем.

Большой популярностью пользуется такая кросс-платформенная среда программирования, как Qt Creator, которая в сравнении с Visual Studio и Delphi обладает удобной интегрированной справкой; более удобным минималистичным интерфейсом; развитым автодополнением и подсветкой синтаксиса; потреблением меньшего объема ресурсов, позволяющего увеличить скорость работы среды в целом [5]. Выбор Qt Creator обусловлен также тем, что имеет открытый исходный код, имеющий большое сообщество разработчиков и подробную документацию. Кроме того, Qt Creator поддерживает множество операционных систем, включая Windows, Linux, Mac OS и Android, что позволяет программисту разрабатывать приложения для широкого круга пользователей.

Управление цифровым генератором

Для работы разработанных алгоритмов необходима реализация программного модуля управления цифровым генератором. Управление осуществляется по стеку TCP/IP. Модуль управления генератором представлен на рис. 2. Он содержит необходимые функции для изменения параметров сигнала цифрового генератора, такие как установка IP-адреса цифрового генератора, фазы, частоты, уровня и включение/выключение входа.

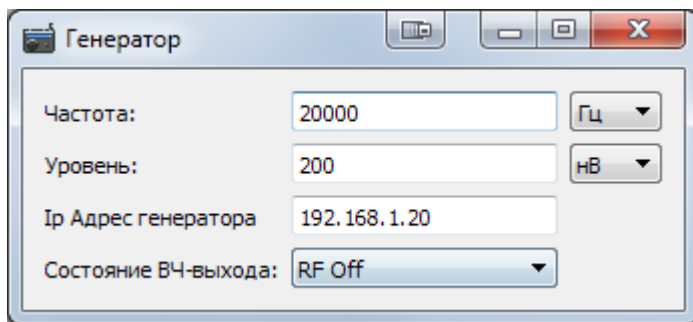


Рис. 2. Окно программного модуля управления цифровым генератором

Создание данного модуля позволяет устанавливать необходимые значения как вручную, так и программно, вызывая представленные функции в процессе измерения с передачей функциям необходимого значения того или иного параметра.

Для случая, при котором осуществляется управление не одним, а двумя цифровыми генераторами, создается новое окно, которое также требует ввода IP-адреса генератора и реализации подключения по сети.

Разработка модуля автоматического измерения блокирования РПУ

Под блокированием понимают изменение отклика на полезный радиосигнал при наличии на входе РПУ хотя бы одной радиопомехи. Блокирование – это изменение уровня сигнала или отношения сигнал/шум (С/Ш) на выходе РПУ при действии на его входе радиопомехи, частота которой не лежит в полосе основного или побочного каналов приема.

В работе предлагается автоматизация процесса измерения блокирования РПУ. АРМ для измерения параметра включает в себя ПК, цифровой генератор №1, цифровой генератор №2 и РПУ. Структура АРМ представлена на рис. 3.

Для автоматизации измерения необходимо осуществить обмен информацией. Обмен информацией между изделием с одной стороны и устройствами дистанционного управления (УДУ) с другой стороны производится посредством локальной сети FAST Ethernet стандарта IEEE.

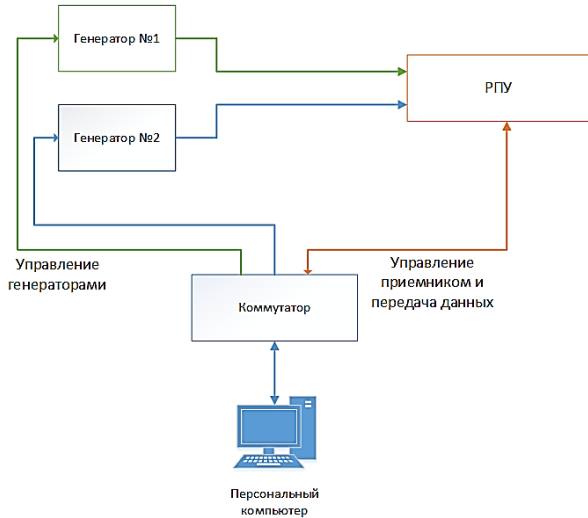


Рис. 3. Схема автоматизированного рабочего места

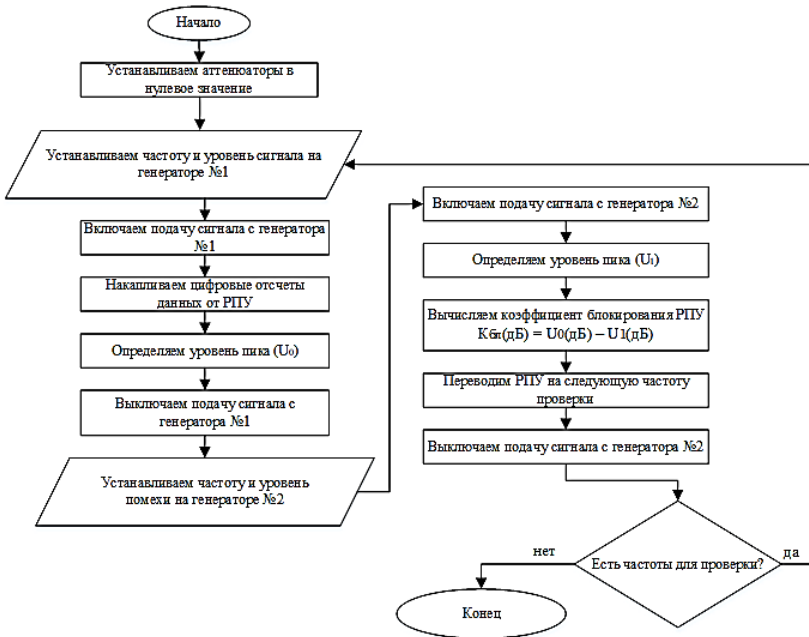


Рис. 4. Структурная схема алгоритма расчета блокирования

Контроль чувствительности необходимо проводить для одного канала приема на частотах настройки изделия. Перед началом контроля необходимо установить минимальное значение ослабления аттенюатора РПУ. Для более наглядного представления алгоритма расчета чувствительности РПУ была разработана структурная схема (см. рис. 4).

Для расчета параметра была разработана и реализована специальная оконная форма (рис. 5).

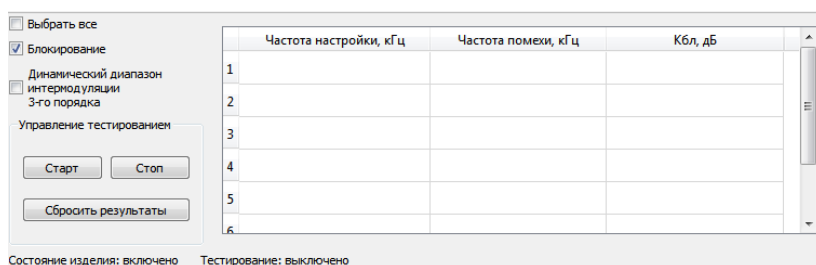


Рис. 5. Окно программного модуля расчета блокирования

Разработка модуля автоматического измерения интермодуляции 3-го порядка РПУ

Под интермодуляцией 3-го порядка понимают нелинейный процесс, возникающий в РПУ, когда два или более сигнала на равных частотах смешиваются в нелинейном элементе (например, в усилителе или смесителе). В результате такого смешивания, помимо исходных частот, в спектре появляются новые составляющие – комбинационные продукты разных порядков. Ввиду того, что данные частоты находятся близко к исходным частотам, они могут вызывать серьезные помехи, особенно если РПУ должно принимать слабые сигналы, находящиеся рядом с частотами мощных передатчиков.

Параметр интермодуляции 3-го порядка важен, поскольку он характеризует способность приемного устройства работать в условиях наличия мощных помеховых сигналов, не допуская их влияния на качество приема желаемого сигнала.

В работе предлагается автоматизация процесса измерения блокирования РПУ. Автоматизированное рабочее место для из-

мерения параметра включает в себя: ПК, цифровой генератор №1, цифровой генератор №2 и радиоприемное устройство. Структура АРМ аналогична представленной ранее на рис. 3.

Для автоматизации измерения необходимо осуществить обмен информацией. Обмен информацией между изделием с одной стороны и УДУ – с другой производится посредством локальной сети FAST Ethernet стандарта IEEE.

Контроль динамического диапазона интермодуляции 3-го порядка необходимо проводить для одного канала приема на частотах настройки изделия. Перед началом контроля необходимо установить минимальное значение ослабления аттенюатора РПУ. Структурная схема расчета интермодуляции 3-го порядка РПУ представлена на рис. 6.

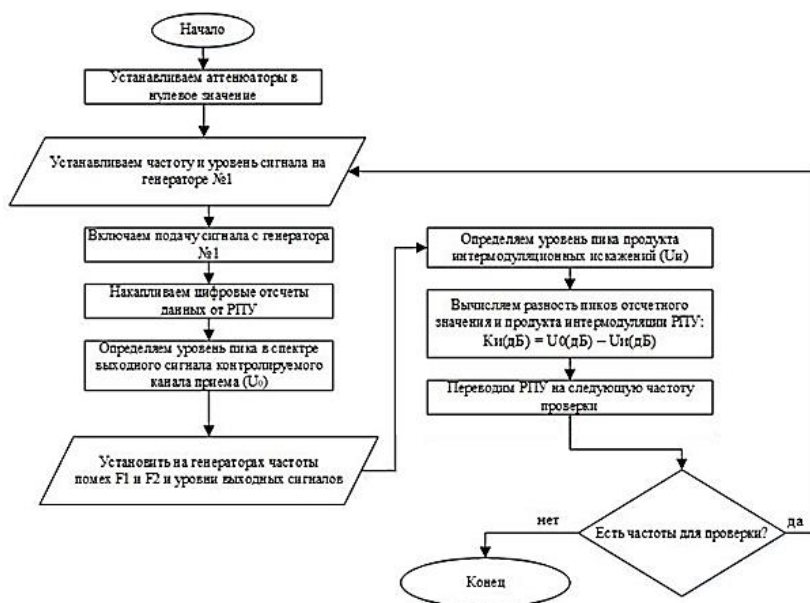


Рис. 6. Структурная схема алгоритма расчета динамического диапазона интермодуляции 3-го порядка

Для расчета параметра была разработана и реализована специальная оконная форма (рис. 7).

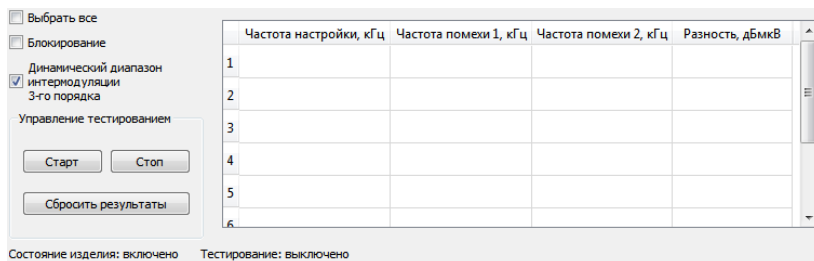


Рис. 7. Окно программного модуля расчета динамического диапазона интермодуляции 3-го порядка

Результаты

Ручная проверка входных параметров РПУ проводится по утвержденной методике. Проведем сравнительный анализ ручной проверки параметров с результатами предложенной методики, которые получены программным методом.

Для проверки работоспособности была разработана следующая методика оценки результатов. Значения, полученные в результате измерения ручным методом, являются опорными и сравниваются со значениями, полученными автоматическим методом, после чего по формуле ниже определяется разница в процентах, что позволяет оценить точность между данными подходами.

$$result = \left| \frac{A-B}{A} \times 100\% \right|,$$

где A – значение ручной проверки, B – значение программной проверки, $result$ – результат, выраженный в процентах.

На рис. 8 представлена диаграмма относительных отклонений программных измерений коэффициента блокирования на частотах в диапазоне от 1,5 до 30 МГц. Диаграмма отображает 10 точек измерения параметра, максимальное отклонение результата программного измерения от ручного составляет 3,5 %, минимальное отклонение 0 %.

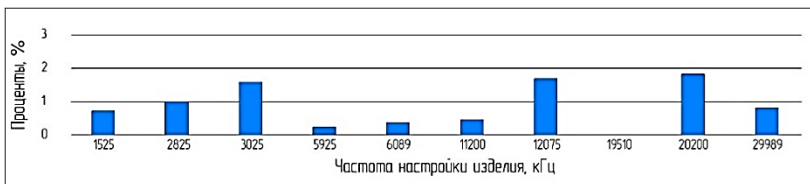


Рис. 8. Диаграмма относительных отклонений программных измерений коэффициента блокирования от опорных на частотах 1,5–30 МГц

На рис. 9 представлена диаграмма относительных отклонений программных измерений коэффициента блокирования на частотах в диапазоне от 2 до 65 МГц. Диаграмма отображает 8 точек измерения параметра, максимальное отклонение результата программного измерения от ручного составляет 0,8 %, минимальное отклонение 0 %.

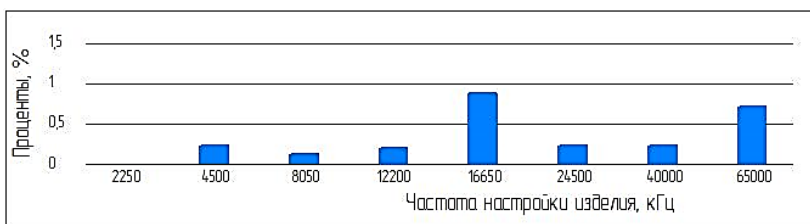


Рис. 9. Диаграмма относительных отклонений программных измерений коэффициента блокирования от опорных на частотах 2–65 МГц

Заклучение

Разработаны алгоритмы измерения входных характеристик РПУ: блокирования, чувствительности и вероятности ошибочного приема информационных данных в телеграфных режимах F1B и F7B.

Создано программное обеспечение, которое позволило существенно ускорить измерения характеристик с нескольких минут до 10–15 секунд и показало перспективность данного метода. Оно может быть масштабируемо на решение задач других устройств, как радиоприемных, так и радиопередающих. По результатам тестирования замечаний к работе программы и полу-

ченными значениями выявлено не было.

Результаты работы свидетельствуют об актуальности данного направления и его потенциале для дальнейшего развития. Внедрение разработанных алгоритмов позволит ускорить производство и повысить качество выпускаемых изделий за счет исключения человеческого фактора. Все это убеждает в необходимости движения в данном направлении, которое будет актуальным и в перспективе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Головин О. В., Простов С. П. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / под ред. профессора О. В. Головина. М. : Горячая линия – Телеком, 2006. 598 с., ил.
2. Борисов В. И., Петров М. А. Основы автоматизации. М., 2011.
3. Кузьмичева Т. Г., Маслакова Т. Г. О разработке автоматизированного рабочего места для главного инженера // Таврический научный обозреватель. 2016. № 3 (8). С. 139–146.
4. ГОСТ Р 52016-2003. Приемники магистральной радиосвязи гектометрового-декаметрового диапазона волн. Параметры, общие технические требования и методы измерений. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200031497>.
5. Карандеева И. Ю. Достоинства среды разработки программных обеспечений Qt Creator для реализации импортозамещающих программных продуктов на примере реализации решения задачи коммивояжера // E-Scio. 2020. № 2 (41). С. 101–106.

Синкевич Владислав Сергеевич, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, sinkevichvs@vk.com.

М. Н. Туймитова^{1,2}, Б. А. Косарев^{1,2}

¹Омский государственный технический университет

²Институт радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН

ОЦЕНКА ИНТЕРВАЛА РАБОЧИХ ТЕМПЕРАТУР ОДНОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Выполнена оценка интервала рабочих температур одноэлектронных приборов методом математического моделирования. При увеличении значений рабочей температуры геометрические размеры одноэлектронных приборов и емкость туннельного перехода будут уменьшаться, следуя гиперболической зависимости.

Ключевые слова: одноэлектроника, туннельный эффект, кулоновская блокада.

Введение

Одним из перспективных направлений развития вычислительных устройств являются устройства, использующие для передачи, хранения и преобразования информации отдельные электроны, а не электрические импульсы. Такие приборы получили название одноэлектронных приборов. В основе принципа действия таких приборов лежит явление туннельного эффекта.

Прохождение частицы через потенциальный барьер, высота которого превышает энергию частицы, получило название туннельного эффекта [1]. Он представляет собой чисто квантовое явление. Классическая частица, подходя к барьеру, высота которого больше ее полной энергии, отражается от него (рис. 1).

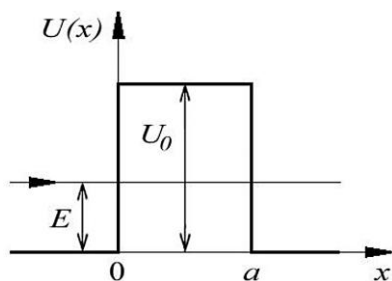


Рис. 1. Одномерный прямоугольный потенциальный барьер: E – энергия частицы, U_0 – потенциальный барьер, x – координата частицы

Квантовая частица (волна) может пройти через этот потенциальный барьер U_0 . Вероятность ее прохождения называют коэффициентом прохождения частицы через барьер D (коэффициент прозрачности потенциального барьера), выражение для которого находят из уравнения Шредингера [2]:

$$D \approx \exp \left\{ -\frac{2a}{h} \sqrt{2m_0(U_0 - E)} \right\}, \quad (1)$$

где a – ширина барьера, m_0 – масса частицы, h – постоянная Планка. Из выражения (1) следует, что коэффициент прохождения экспоненциально зависит от ширины барьера, массы частицы и разности энергий.

Туннельный переход может быть сформирован двумя металлическими контактами, разделенными слоем диэлектрика (формируется конденсатор чрезвычайно малой емкости). Обычное изделие радиоэлектронной промышленности, плоский конденсатор, не обладает туннельным эффектом за счет значительной толщины слоя диэлектрика. Согласно выражению (1), для наблюдения туннельного эффекта геометрические размеры плоского конденсатора имеют порядок 10^{-9} м для частицы с массой 10^{-30} кг.

Оценим интервал рабочих температур одноэлектронных приборов при помощи туннельного эффекта.

Моделирование и обсуждение результатов расчета

Явление отсутствия тока при приложении напряжения к туннельному переходу называется кулоновской блокадой (невозможность туннелирования электрона из-за кулоновских сил отталкивания). В течение некоторого времени заряд одного электрона накапливается, затем электрон туннелирует через переход. При этом происходит изменение энергии на дискретную величину:

$$\Delta E = \frac{e^2}{2C}, \quad (2)$$

где e – заряд электрона, C – емкость туннельного перехода.

Естественно, что для туннелирования необходимым условием является превышение ΔE над колебаниями температуры kT (k – постоянная Больцмана, T – температура). Из этого неравенства можно получить зависимость емкости туннельного перехо-

да от температуры (т.е. какой емкостью должен обладать переход, чтобы одноэлектронный прибор функционировал при данной температуре, рис. 2).

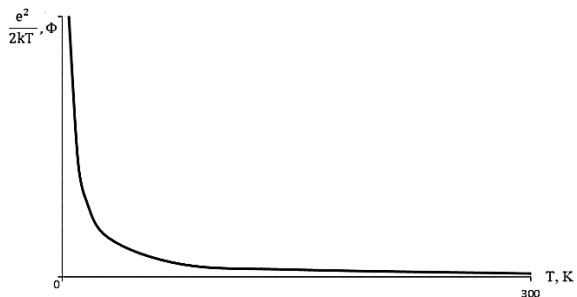


Рис. 2. Зависимость емкости туннельного перехода от температуры (e – заряд электрона, k - постоянная Больцмана, T - температура)

Зависимость емкости туннельного перехода от температуры влияет на конструкцию одноэлектронных приборов. Согласно графику, чем выше температура, тем меньшей емкостью должен обладать туннельный переход и, значит, иметь меньшие геометрические размеры. Например, для работы приборов при 300 К необходима емкость меньше 10^{-18} Ф, т.е. геометрические размеры перехода не больше 3 нм.

В работе [3] приводятся следующие значения емкости туннельных переходов и соответствующие предельно допустимые температуры:

T, K	Емкость туннельного перехода, Ф
4,2	$2 \cdot 10^{-16}$
77	$1 \cdot 10^{-17}$
300	$3 \cdot 10^{-18}$

Согласно данным, приведенным в таблице, с увеличением рабочей температуры емкость туннельного перехода уменьшается.

Таким образом, геометрические размеры туннельного перехода при изготовлении одноэлектронных приборов невозможно обеспечить без нанотехнологий. И при увеличении значений рабочей температуры геометрические размеры таких приборов будут уменьшаться, следуя гиперболической зависимости.

Выводы

В основе принципа действия одноэлектронных приборов лежит туннельный эффект. Согласно результатам расчета, интервал рабочих температур таких приборов зависит от технологии изготовления. При увеличении значений рабочей температуры геометрические размеры одноэлектронных приборов и емкость туннельного перехода будут уменьшаться, следуя гиперболической зависимости. Комнатной температуре будет соответствовать ширина перехода меньше 3 нм, емкость меньше 10^{-18} Ф. В области низких температур емкость туннельного перехода больше 10^{-16} Ф.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

ЛИТЕРАТУРА

1. Алиев А. Р., Ахмедов С. А., Алиев З. А. Туннельный эффект и оценка вероятности предпереходных явлений в области структурных фазовых превращений в кристаллах // Вестник Дагестанского государственного университета. Серия 1: Естественные науки. 2019. № 2. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/tunnelnyy-effekt-i-otsenka-veroyatnosti-predperehodnyh-yavleniy-v-oblasti-strukturnyh-fazovyh-prevrascheniy-v-kristallah> (дата обращения: 25.10.2023).
2. Ландау Л. Д., Лифшиц Е. М. Квантовая механика (Нерелятивистская теория). М. : Наука, 1989.
3. Рынков Д. О., Чеча В. В., Щука А. А. Одноэлектронные приборы // Нано- и микросистемная техника. 2005. № 4. С. 8–23.

Туймитова Мадина Наильевна, инженер Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, магистрант Омского государственного технического университета, radioseminar@радиосеминар.пф.

Косарев Борис Андреевич, канд. техн. наук, старший научный сотрудник Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, доцент Омского государственного технического университета, radioseminar@радиосеминар.пф.

К. Е. Хмельницкий

АО «ОНИИП»

Омский государственный университет им. Ф.М. Достоевского

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ АНТЕНН КВ-ДИАПАЗОНА РАЗНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Цель работы – определить степень влияния подстилающей поверхности на ДН антенн КВ-диапазона. Были рассмотрены такие инструменты для моделирования, как MMANA, Microwave Office, Microwave Studio, HFSS, FEKO, Comsol multy physics. Смоделированы антенны, и проведена оценка характеристики направленности антенн при различных значениях комплексной диэлектрической проницаемости.

Ключевые слова: подстилающая поверхность, комплексная диэлектрическая проницаемость, антенна, диаграмма направленности, моделирование.

Введение

Известно, что свойства подстилающей поверхности заметно влияют на электродинамические параметры КВ-антенны. Антенны КВ-диапазона чаще всего размещаются в непосредственной близости к подстилающей поверхности. В таком случае подстилающая поверхность может становиться частью излучающей системы и оказывать заметное влияние на характеристики антенн.

Исследование изменения диаграммы направленности (ДН) антенн в натуральных условиях требует установки антенн в разных местах, при разных типах подстилающей поверхности. Очевидно, что проведение экспериментальных работ трудозатратно и дорогостояще. Исследование изменения ДН антенн с помощью таких программных пакетов, как MMANA-GAL, помогает существенно ускорить процесс определения направленных свойств для разнообразных условий.

В докладе рассматривается изменение ДН различных конструкций антенн КВ-диапазона при соответствующих значениях диэлектрической проницаемости и проводимости подстилающей поверхности.

Обзор сред моделирования

Существует большое количество для моделирования антенн, однако не все они способны учитывать влияние подстилающей поверхности.

MMANA-GAL – это программа для расчета и анализа любых антенн, которые можно представить как произвольный набор тонких проводов. За основу взят расчет методом моментов [1].

ANSYS HFSS – это программное обеспечение для трехмерного электромагнитного моделирования, предназначенное для проектирования и моделирования высококачественных электронных изделий, таких как антенны, антенные решетки, фильтры и др. HFSS использует высококачественный метод конечных элементов (FEM), метод моментов (МОМ) [2].

COMSOL Multiphysics по сути является инструментом пакета Matlab и работает под его управлением, т.е. все возможности программирования, доступные в Matlab, могут быть использованы и в COMSOL Multiphysics, например при обработке результатов расчета [3].

Fecko – это комплексное программное обеспечение для вычислительной электромагнетики (CEM), широко используемое в телекоммуникационной, автомобильной, аэрокосмической и оборонной промышленности [4].

CST STUDIO SUITE представляет собой набор инструментов для проектирования, моделирования и оптимизации трехмерных электромагнитных систем. Он включает вычислители для решения задач, перекрывающих весь спектр электромагнитных излучений [5].

Microwave Office – это мощный инструмент для анализа высокочастотных устройств, позволяющий автоматизировать процесс их проектирования от технического задания до производства, не выходя из среды разработки [5].

Оценка направленных характеристик антенн

В данной работе моделирование направленных характеристик осуществлялось в свободно распространяемом программном пакете MMANA-GAL, в котором любая антенна представлена в виде совокупности тонких проводов. Использувавшиеся конструкции антенн представлены на рис. 1.

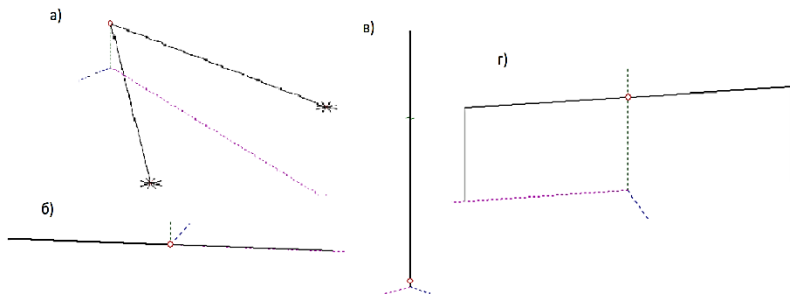


Рис. 1. Используемые конструкции антенн:

а) V-образная антенна; б) горизонтальный симметричный вибратор, расположенный непосредственно на подстилающей поверхности; в) вертикальный несимметричный вибратор; г) горизонтальный симметричный вибратор, расположенный над подстилающей поверхностью

Расчеты ДН проводились на частотах 3, 15 и 30 МГц на подстилающих поверхностях с характеристиками, приведенными в таблице.

<i>Вид земной поверхности</i>	ϵ	σ , мСм/м
Очень влажная	20	30
Средняя	13	5
Очень сухая	5	1

В результате электродинамического моделирования удалось выявить следующие закономерности. При моделировании разных конструкций антенн КВ-диапазона видно, что ДН антенн меняется в зависимости от типа подстилающей поверхности. Так, в частности, для несимметричного вибратора видно, что при увеличении проводимости почвы, то есть при переходе от очень сухой к очень влажной почве, угол максимума ДН увеличивается (рис. 2). Это связано с тем, что, когда проводимость почвы увеличивается, глубина проникновения волны в землю уменьшается, следовательно, уменьшаются потери в ней. Напротив, в плохо проводящую почву волны проникают хорошо, а следовательно, увеличиваются потери в ней. Это особенно заметно на частоте 3 МГц.

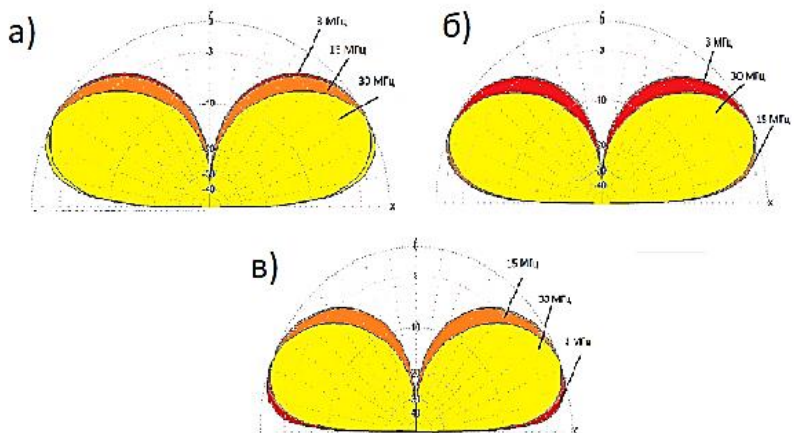


Рис. 2. ДН вертикального несимметричного вибратора на земле:
 а) сухой; б) влажной; в) очень влажной

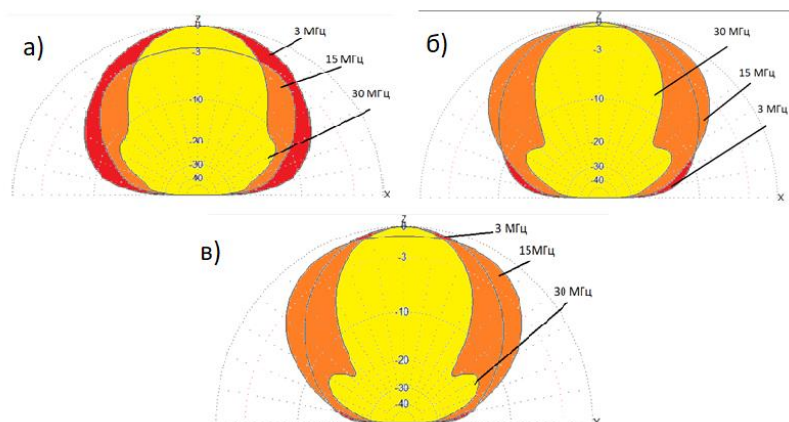


Рис. 3. ДН симметричного вибратора над землей:
 а) очень сухой; б) влажной; в) очень влажной

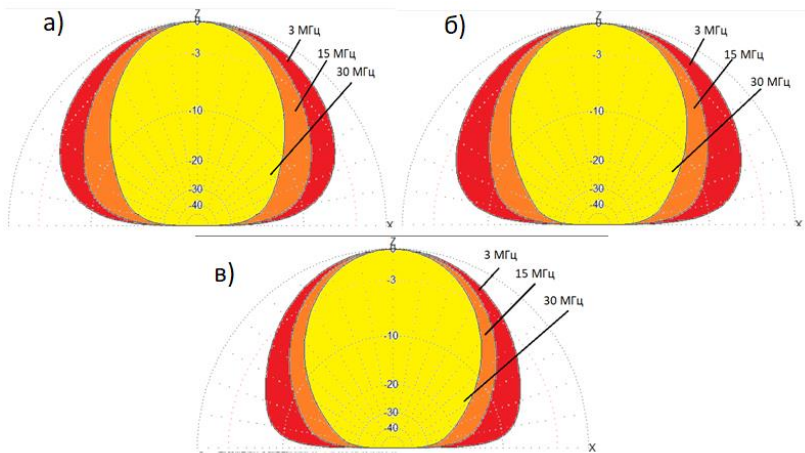


Рис. 4. ДН симметричного вибратора
вблизи земли:
а) очень сухой; б) влажной; в) очень влажной

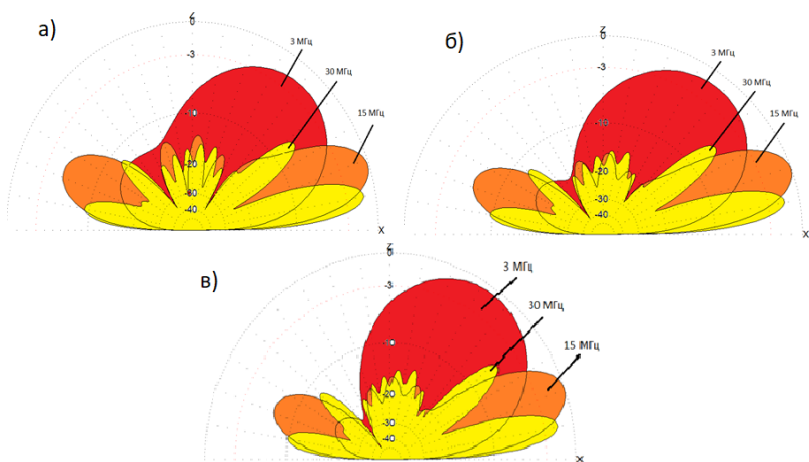


Рис. 5. ДН V-образной антенны на земле:
а) очень сухой; б) влажной; в) очень влажной

Для симметричного вибратора, как расположенного на некотором расстоянии над подстилающей поверхностью (рис. 3), так и вблизи нее (рис. 4), ДН не претерпевает сильного изменения. Это связано с тем, что симметричные антенны в меньшей степени подвержены влиянию земли за счет симметричного включения. Однако в отношении симметричного вибратора, расположенного на некотором расстоянии над подстилающей поверхностью, видно, что, кроме незначительного изменения ДН, образуются дополнительные боковые лепестки.

Для V-образной антенны максимум ДН также с ростом проводимости, то есть при переходе от очень сухой к очень влажной почве, увеличивается и прижимается к подстилающей поверхности на верхних частотах (см. рис. 5).

Заключение

Проведена оценка влияния подстилающей поверхности на направленные характеристики антенн разных конструкций, и выявлено, что для антенн несимметричного типа ее большее влияние сказывается на частоте 3 МГц. Антенны симметричного типа подвержены меньшему влиянию подстилающей поверхности, однако в результате появляются боковые лепестки. Максимум диаграммы направленности V-образных антенн с ростом проводимости прижимается к подстилающей поверхности на высоких частотах.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Гончаренко И. В.* Компьютерное моделирование антенн : Все о программе MMANA. М.: ИП РадиоСофт, Журнал «Радио», 2008. 80 с.
- [2] ANSYS : офиц. сайт. URL: <https://www.ansys.com>.
- [3] COMSOL Multiphysics : офиц. сайт. URL: <http://www.comsol.ru>.
- [4] Altair Feko : офиц. сайт. URL: <http://www.feko.info>.
- [5] Eurointehc : решение для производства электроники : офиц. сайт ООО «Евроинтех». URL: <https://eurointech.ru>.

Хмельницкий Кирилл Евгеньевич, магистрант ОмГУ им. Ф.М. Достоевского, сотрудник Омского научно-исследовательского института приборостроения, radioseminar@радиосеминар.рф.

Л. В. Шагарова

МЕТОДЫ И ТЕХНОЛОГИИ ОПЕРАТИВНОГО ПРИЕМА, АРХИВАЦИИ И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ С НИЗКООРБИТАЛЬНЫХ СПУТНИКОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Освещены технологии приема данных дистанционного зондирования Земли на наземную станцию УниСкан в режиме прямого сброса по радиоканалам X-диапазона, приведены зона радиовидимости антенной системы и характеристики аппаратно-программного комплекса. Даны основные технические характеристики съемочной аппаратуры Terra/MODIS, Aqua/MODIS, IRS, Radarsat. Отмечено, что регулярное покрытие территории снимками с космических аппаратов, а также наличие долговременных архивных рядов данных ДЗЗ позволяет осуществлять многоуровневую обработку цифровой информации для успешного решения задач космического мониторинга.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования, радиоканалы, антенная система, космический мониторинг, архив.

Наземные комплексы приёма и обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) являются одними из наиболее эффективных способов получения космической информации для оперативного контроля над использованием природных ресурсов, быстрого реагирования при возникновении чрезвычайных ситуаций и прогнозирования развития наблюдаемой территории на основе геоинформационных систем.

Приемная станция УниСкан – это российский аппаратно-программный комплекс (АПК), предназначенный для приема и обработки информации с низкоорбитальных спутников ДЗЗ в диапазоне частот 8 ГГц [1]. Станции УниСкан обеспечивают прием данных в пределах зоны радиовидимости в режиме прямого сброса (DB – Direct Broadcast) и на основе лицензионных соглашений с операторами космических систем. АПК состоит из аппаратной части и программного обеспечения (ПО).

Аппаратная часть включает антенную систему, приемный тракт и линии связи.

В состав антенной системы входит: параболическое зеркало с облучателем, малощумящий усилитель-преобразователь частоты, опорно-поворотное устройство (ОПУ), устройство измерения ориентации антенны, устройство управления приводами антенны.

В состав приемного тракта входят: демодулятор; интерфейсное устройство, устанавливаемое на шине PCI; персональный компьютер с характеристиками, обеспечивающими ввод, запись и временное хранение соответствующих потоков и объемов данных.

ПО включает программные средства контроля и управления антенной системой в процессе приема данных; генерации стандартных выходных продуктов; визуализации, анализа и предварительной обработки изображений.

Приложение управления станцией выполняет:

- проверку функционирования аппаратной части станции;
- расчет расписания сеансов связи, т.е. прохождения низкоорбитальных спутников через зону видимости станции;
- автоматическую активизацию станции и прием данных в соответствии с расписанием;
- расчет траектории спутника и управление антенной системой для сопровождения космического аппарата (КА);
- формирование принимаемого информационного потока и запись его на жесткий диск;
- индикацию и регистрацию состояния системы и информационного потока.

Для качественного приема данных ДЗЗ перед установкой наземной станции предварительно выполняются измерения электромагнитной обстановки с целью подтверждения отсутствия стабильных источников радиопомех в диапазонах 7,7–7,9 и 8,0–8,4 ГГц (волновые помехи возможны от передающих устройств радиорелейных, тропосферных и других линий связи), ОПУ устанавливается на отгоризонтированное основание, длина кабелей управления от ОПУ до настольного блока управления – до 50 м. Также необходимо рассчитать маску горизонта, которая описывает высоту горизонта в зависимости от азимута. Файл маски содержит угол места, до которого закрыт горизонт (в гра-

дусах) и азимут (в градусах) с некоторым шагом. В интервалах между значениями азимута при расчете расписания и траектории для открытой части полусферы будет выполнена линейная интерполяция значений угла места.

Расписание включает следующую информацию для каждого витка: наименование спутника, формат и несущую частоту канала связи, номер витка и его направление (восходящий/нисходящий), дату съемки, время входа в зону радиовидимости и выхода из нее, угол места спутника и азимут на спутник в начале приема, в кульминации и ко времени окончания приема.

Время начала и окончания приема можно скорректировать в «Редакторе трасс», где на фоне карты и маски видимости станции отображаются трассы съемки для выделенных в расписании витков. Это особенно актуально для случаев с пересекающимися по времени сеансами сброса данных с разных КА. На рис. 1 приведены примеры траекторий пересекающихся по времени сеансов сбросов данных ДЗЗ.

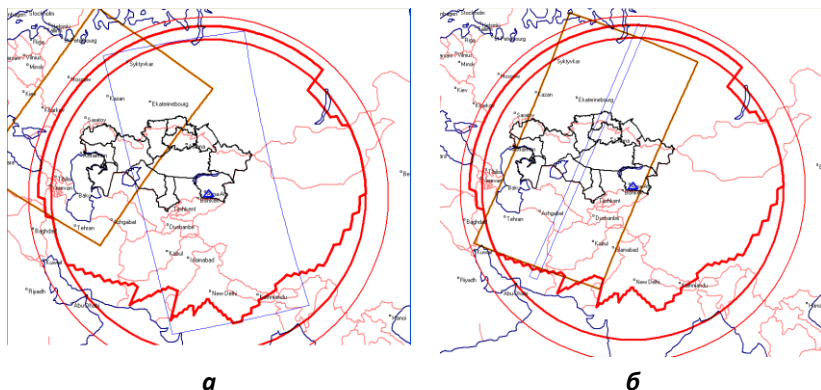


Рис. 1. Траектории пересекающихся по времени сеансов сбросов: а – Terra, Aqua; б – IRS, Terra

Для штатного функционирования АПК необходимо выполнять следующие операции:

- загрузить и разместить орбитальные элементы формата NORAD TLE для активных спутников: орбитальные данные должны заменяться по мере их обновления;

- получить и активизировать файл авторизации доступа;
- установить с максимально возможной точностью таймер ПК: к началу очередного витка она должна быть не хуже 1 с;
- контролировать количество свободного дискового пространства: при переполнении диска прием прекращается;
- рассчитать расписание прохождения КА на основании орбитальных элементов и расписаний передачи спутниковых данных с учетом зоны видимости станции и отредактировать треки;
- принять данные и сохранить их на жестком диске;
- заполнить журнал сессий и событий;
- провести предварительную обработку космоснимков;
- провести первичную обработку космоснимков;
- переместить данные в многоуровневый архив (оперативный, сезонный, долговременный).

Своевременное выполнение указанных операций и корректная настройка станции обеспечивают устойчивый прием (т.е. устойчивую синхронизацию тактовой частоты) при углах возвышения спутника над горизонтом от 7 градусов и более, вероятность ошибки восстановления бита не более 5×10^{-6} . Тем не менее в начале сеанса приема до момента, пока прием не станет устойчивым по всем показателям, оператор наблюдает за уровнем сигнала и разверткой потока данных. Уровень сигнала измеряется демодулятором в условных единицах. Реальная мощность входного сигнала зависит от коэффициента усиления антенны, характеристик входных каскадов приемного тракта, угла места спутника, а также параметров передающей аппаратуры КА.

Если при сопровождении по расчетной траектории станция обнаруживает сигнал (признаком этого считается синхронизация ФАПЧ демодулятора на ожидаемой частоте), то система управления антенной переводится в режим автосопровождения. В режиме автоматического поиска антенная система сканирует окрестности расчетной траектории в диапазоне ± 3 градуса. По окончании сканирования устанавливаются поправки, соответствующие максимальному уровню сигнала. Физически захват сигнала означает устойчивость измерений фазы сигнала, что яв-

ляется признаком поступления на вход системы полезного сигнала, а не помех. Важным параметром, характеризующим качество приема, является отношение сигнала к шуму.

Сеанс приема завершается или по времени окончания приема или в результате потери сигнала. Сигнал потерян, если он не удовлетворяет критерию качества в течение определенного времени. Если потеря сигнала происходит до расчетного времени окончания приема, то выполняется очередной поиск сигнала, дальнейшее сопровождение спутника и прием данных ДЗЗ. Рис. 2 иллюстрирует прием спутниковых данных на станцию Унискан на примере Terra/MODIS, которые передаются в широкоформатном режиме.

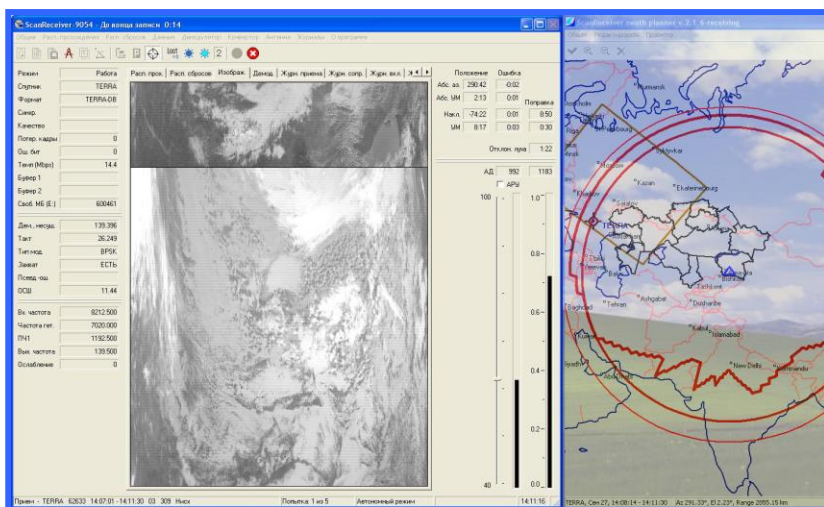


Рис. 2. Станция в режиме приема

Работа с данными спектрорадиометра MODIS определяется стандартной технологической схемой приема данных на наземную станцию Унискан и использования алгоритмов их обработки.

Прием данных

Радиометр MODIS выполняет съемку поверхности одновременно в 36 спектральных зонах, две из которых по радиометрическому уровню разбиты на два диапазона, т.е. по яркости

приходящего излучения формируется 38 изображений (каналов). Исходные данные MODIS подразделяются на блоки, именуемые пакетами. Каждый пакет содержит псевдослучайную последовательность (ПСП) как признак начала пакета, служебную информацию и определенный объем данных. Пакеты объединяются в группы, которые в зависимости от содержания могут быть «дневными», «ночными» и «инженерными». Дневная группа состоит из двух пакетов длиной по 4980 бит, ночная группа – из одного пакета длиной 2052 бита. В одной «научной» группе содержится изображение определенного участка подстилающей поверхности во всех 36 спектральных диапазонах (дневного режима) или с 20-го по 36-й каналы (ночного режима). В каналах низкого разрешения изображение формируется линейкой из 10 детекторов, т.е. при каждом механическом повороте зеркала формируется одновременно 10 линий изображения. Изображения с разрешением 500 м. формируются линейкой из 20 детекторов, с разрешением 250 м. – из 40. Разрядность данных равна 12 битам на отсчет во всех каналах.

На борту спутника эти пакеты данных перепакуются в кадры (transfer frame) для последующей передачи по радиоканалу на Землю. Для повышения помехозащищенности передаваемый поток данных со спутника последовательно кодируется сначала по алгоритму Рида-Соломона, затем по алгоритму Витерби. Декодирование выполняется в аппаратной части приемной станции. Распаковка кадров и восстановление пакетов MODIS осуществляется программно в темпе приема и записывается в формате Level0.

Спутники системы EOS, на которых установлен спектро-радиометр MODIS, многократно превысили срок жизненного цикла КА, продолжают вести съемку территории и передавать информацию, но некоторые каналы сбоят и содержат пропуски данных. В 2023 г. оператор КА уведомил о прекращении работ по заполнению пропусков в научных данных [2].

На рис. 3 приведен пример квартальной схемы покрытия территории данными Terra/MODIS.

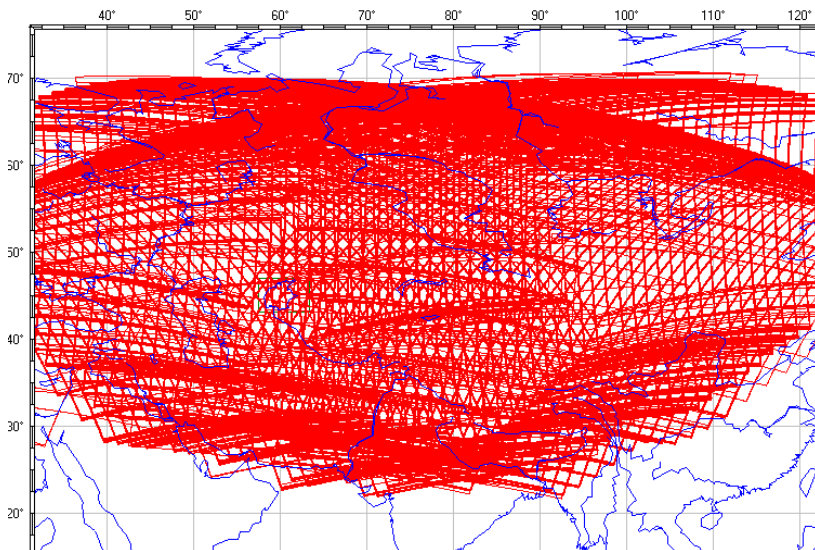


Рис. 3. Пример схемы покрытия территории космоснимками низкого разрешения

В процессе приема дополняются служебные файлы: журнал приема с ежесекундной автоматической регистрацией основных параметров состояний станции и потока; журнал сопровождения, фиксирующий параметры состояния антенной системы; журнал включений, сохраняющий основные параметры сеанса приема; журнал событий. Принятые файлы данных записываются на жесткий диск для дальнейшей визуализации и многоуровневой обработки цифровой информации.

Обработка данных

В файлах формата Level0 (PDS) поток данных записан так, как он сформирован спектрорадиометром на борту спутника, т.е. содержит научные данные, служебные и контрольные параметры, вспомогательную информацию, в том числе необходимую для калибровки и географической привязки космоснимка в процессе преобразования в форматы более высоких уровней. Для генерации стандартных выходных продуктов MODIS уровней

Level1A/1B используется пакет IMAPP (International MODIS/AIRS Processing Package) [3].

Данные формата Level1A (продукт MOD01 по номенклатуре продуктов EOS) представляют собой результат распаковки данных формата Level0. Данные формата Level1B откалиброваны и сопровождаются географической привязкой. В процессе преобразования из уровня 1A в уровень 1B данные разного пространственного разрешения разделяют на четыре продукта MOD02 с учетом пространственного разрешения:

- MOD02QKM (данные 1-го и 2-го каналов с разрешением 250 м),
- MOD02HKM (1–7-й каналы с разрешением 500 м., при этом 1-й и 2-й каналы приведены к этому разрешению),
- MOD021KM (38 каналов, данные каналов с 1 по 7 приведены к разрешению 1 км.),
- MOD02OBC (бортовые калибровочные данные).

Форматы продуктов MODIS, начиная с уровня 1A, являются производными формата HDF.

Для выполнения тематической обработки опико-электронных космоснимков необходимо учитывать, что в исходном наборе спутниковых данных каждый пиксель представлен числом DN (Digital Number), полученным после преобразований «сырых» значений, зарегистрированных сенсором спутника. Значения DN не несут никакого физического смысла, так как каждый датчик характеризуется собственными значениями усиления и смещения, которые применяются к сигналу в момент формирования матрицы пикселей. Поэтому одному и тому же DN могут соответствовать разные абсолютные значения физической величины. С целью приведения данных к сопоставимым значениям выполняется их радиометрическая калибровка и дальнейшая тематическая обработка для решения мониторинговых задач.

Особенности приема данных на основе лицензионных соглашений

Космоснимки MODIS передаются со спутников Terra и Aqua ежедневно в широкоэмитальном режиме и не требуют

оплаты за прием данных, достаточно иметь наземную станцию с соответствующим приемным трактом и следовать описанным выше методам и технологиям приема. Что касается снимков, принимаемых платно на основе лицензионных соглашений, то здесь необходимо планировать съемку и формировать заявки на прицельную съемку для разумного использования оплаченного времени работы спутника.

Планирование прицельной съемки включает: определение интересующего региона, временного интервала съемки, необходимого пространственного разрешения; расчет расписания пролетов спутников; формирование и отправку заказа оператору; уточнение параметров съемки.

Для повышения результативности выполнения прицельной съемки оптико-электронных данных требуется учитывать прогноз по облачности. За три дня до сеанса анализируется прогноз по облачности на заказную территорию и принимается решение об использовании ресурса. Окончательное решение о программе работы спутника остается за оператором космической системы.

Для радиолокационных данных облачность не является помехой, но это не снимает задачу планирования. Напротив, учитывая широкий выбор режимов съемки, в процессе планирования требуется выполнить географическое описание объекта съемки, определить параметры заказа, такие как период съемки, тип луча, направление съемки, указать уровень усиления сигнала.

В табл. 1, 2 приведены основные характеристики данных ДЗЗ систем EOS, IRS* и RADARSAT*, сертифицированный прием которых осуществлялся на станциях Унискан в Казахстане (*завершили миссию) [4].

В ходе приема радиолокационных снимков формируются файлы данных большого объема, каждая часть которых имеет размер до 4 Гб, при этом к названию файлов добавляются суффиксы n00, n01, n02. Для выделения информативных сегментов из потока полученных данных предназначены дополнительные приложения RSAT level0 Processor и RSAT level1 Processor.

Таблица 1

Характеристики оптико-электронной съемочной аппаратуры

КА (страна)	Радиометр	Характеристики съемочного прибора		
		Пространственное разрешение, м	Кол-во каналов/диапазон (мкм)	Полоса захвата, км
Terra, Aqua (США)	MODIS	250	2 / (0,6–0,8)	2300
		500	5 / (0,4–2,0)	
		1000	29 / (0,4–14)	
IRS 1C/1D (Индия)	PAN	5,8	1 / (0,5–0,75)	70
	LISS-3	23	3 / (0,52–0,86)	142
	WIFS	188	2 / (0,62–0,86)	810
IRS P6 (Индия)	LISS-4	5,8	1	70
	LISS-3	23	4	140
	AWIFS	56–70	4	740

Таблица 2

Характеристики радиолокационной съемочной аппаратуры

Режимы съемки Radarsat-1	Ширина полосы обзора, км	Номинальное пространственное разрешение, м	Пределы смещения полосы обзора, км
Детальный (Fine)	50	8	500
Стандартный (Standard)	100	25	500
Широкополосный (Wide)	150	30	500
Расширенный дальний (Extended High)	75	25	425
Расширенный ближний (Extended Low)	170	25	250
Обзорный широкий (ScanSAR Wide)	500	100	500
Обзорный узкий (ScanSAR Narrow)	300	50	500

Данные обрабатываются до уровней продуктов формата Radarsat CEOS Level0 для создания радиолокационной голограммы RAW (Signal data) и продуктов Radarsat CEOS Level1 для получения синтезированного изображения [5]. Синтезированное изображение может быть реализовано в пяти типах выходных продуктов в системе координат «Время (азимут) – наклонная дальность» с заданным межпиксельным расстоянием как результат обработки голограммы:

формат SLC – в маршрутном режиме съемки (StripMap);

формат SGF – в маршрутном режиме съемки (StripMap);

формат SGX – аналогичен формату SGF, но с уменьшенным межпиксельным расстоянием;

формат SCN – в обзорном (сканирующем) режиме съемки (ScanSar) с использованием 2-х или 3-х лучей.

Принятые на наземной станции космические снимки необходимо записывать в оперативный, сезонный и долговременный архивы [6]. Уровни доступа к электронным каталогам архива определены в зависимости от частоты решаемых задач космического мониторинга (оперативных, сезонных, многолетних) для оптимизации поиска данных. Обработанные ряды данных накапливаются в архиве тематических продуктов.

Архив цифровых изображений обеспечивает физическую сохранность цифровой информации, позволяет накапливать многолетние ряды данных ДЗЗ, что дает возможность изучать характеристики объектов за длительный период. Многоуровневая обработка цифровой информации способствует успешному решению задач космического мониторинга [7].

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

ЛИТЕРАТУРА

[1] ООО ИТЦ «СканЭкс». URL: www.scanex.ru/station/uniskan/.

[2] Офиц. сайт NASA. URL: <https://terra.nasa.gov/>.

[3] Сайт SSEC. URL: <https://cimss.ssec.wisc.edu/imapp/>.

[4] Офиц. сайт компании ANTRIX. URL: www.antrix.co.in/satellite-data.

[5] RADARSAT Intelligent Parser & Reporting Interface (RIPRI) User Manual // Radarsat International Inc. : геоинформационный портал. URL: gisa.ru.

[6] *Шагарова Л. В.* Структура и базовое программное обеспечение управления архивом цифровых космических изображений // Вестник ЕНУ им. Л.Н. Гумилева. 2010. № 4. С. 451–456.

[7] *Жантаев Ж. Ш., Абсаметов М. К. и др.* Современное состояние и перспективы развития дистанционного зондирования земли в Национальном центре космических исследований и технологий Республики Казахстан // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9, № 5. С. 77–88.

Шагарова Людмила Валентиновна, инженер Института радиофизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, radioseminar@радиосеминар.рф.

Л. В. Шагарова

CHATGPT & GOOGLE EARTH ENGINE: СОВРЕМЕННЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ДЛЯ ОБРАБОТКИ СПУТНИКОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Внедрение и использование искусственного интеллекта в различных областях науки и техники становится все более распространенным и актуальным. Одна из перспективных областей применения искусственного интеллекта – обработка цифровой космической информации и анализ геопространственных данных. Облачная платформа Google Earth Engine является мощным инструментом для работы с такими данными, предоставляющим доступ к коллекциям космоснимков и вычислительной инфраструктуре для тематической обработки информации, визуализации и анализу. В редакторе кода Google Earth Engine используется язык программирования JavaScript. Генерация кода для работы с API Google Earth Engine требует опыта в программировании. Однако с появлением и развитием ChatGPT – мощной языковой модели генерации текста на основе нейронных сетей – появились новые возможности для автоматизации этого процесса.

Ключевые слова: *ChatGPT, Google Earth Engine, JavaScript, данные ДЗЗ, SENTINEL.*

Введение

Современные спутниковые системы сбора данных предоставляют большое количество информации, которая может быть использована в прикладных исследованиях и решении мониторинговых задач, включая анализ состояния растительности, почвенного покрова, водных ресурсов и других объектов на земной поверхности. Для целевого использования спутниковых данных необходимо проводить их многоуровневую обработку.

С постоянным увеличением объема оперативных и архивных спутниковых данных возникает необходимость разработки эффективных методов обработки и анализа долговременных рядов цифровой космической информации. Одним из инструментов, позволяющих работать с коллекциями данных дистанци-

онного зондирования Земли (ДЗЗ), является платформа Google Earth Engine (GEE), которая предоставляет доступ к огромному объему спутниковых изображений и инструментам для их обработки.

В настоящее время GEE становится все более популярным инструментом для обработки, анализа и визуализации географических данных. А одной из самых перспективных и активно развивающихся языковых моделей является ChatGPT компании OpenAI.

В данной работе исследуется возможность использования искусственного интеллекта в виде языковой модели ChatGPT для генерации программного кода на JavaScript для API Google Earth Engine. Демонстрация взаимодействия выполнена по данным космических аппаратов (КА) Sentinel на примере Омской области.

Появление языковых моделей, таких как ChatGPT и Generative Pre-trained Transformer 4 (GPT-4), вызвало значительный интерес к использованию моделей искусственного интеллекта в различных областях [1]. Их потенциал широко признан, но в области дистанционного зондирования возможности ChatGPT до конца не раскрыты, им еще предстоит развивать варианты взаимодействия [2, 3].

Платформа GEE предоставляет доступ к спутниковым данным для выполнения научного анализа [4], в том числе мониторинга изменений земной поверхности, анализа атмосферных явлений и других прикладных исследований.

Одним из наиболее востребованных источников данных ДЗЗ является спутниковая информация, полученная космическими аппаратами Sentinel. Sentinel – это группировка спутников Европейского космического агентства, оснащенных радиолокационной и оптико-электронной съемочной аппаратурой [5]. Краткая информация о КА Sentinel и установленной на них съемочной аппаратуре с учетом уровня обработки наборов данных в GEE приведена в табл. 1 и на рис. 1.

Таблица 1

Основные характеристики КА Sentinel

Параметр	Sentinel					
	1A	1B	2A	2B	3	5P
Год запуска КА	2014	2016–2021*	2015	2017	2016	2017
Съемочная аппаратура	SAR	SAR	MSI	MSI	OLSI EFR	TROPOMI
Орбита	Околополярная солнечно-синхронная					
Высота орбиты	693 км	786 км	814 км	814 км	814 км	824 км
Периодичность	12 дней*	5 дней	2 дня	2 дня	2 дня	1 день
Уровень обработки	GRD	Level-2A, Level-1C	Level-1	Level-1	Level-1	Level-2
Диапазоны	С-диапазон (5,405 ГГц)	видимый и инфракрасный диапазоны	от видимого до ближнего инфракрасного 0,4–1,02 мкм	от видимого до ближнего инфракрасного 0,4–1,02 мкм	от видимого до ближнего инфракрасного 0,4–1,02 мкм	видимый, инфракрасный и ультрафиолетовый

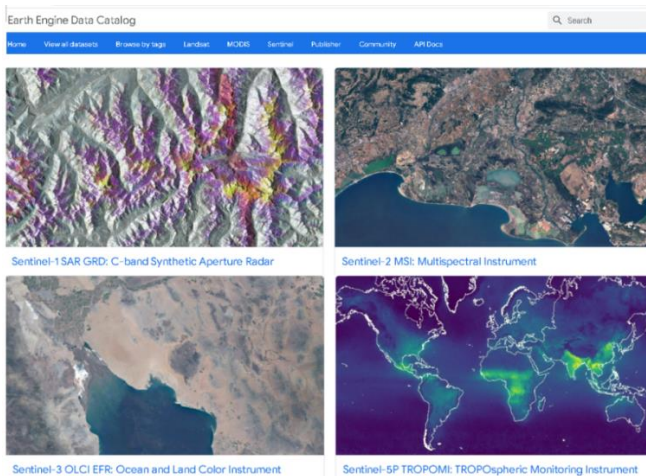


Рис. 1. Коллекции Sentinel каталога данных GEE

Радиолокационный спутник Sentinel-1A оснащен радаром С-диапазона с синтезированной апертурой. Этот прибор выполняет информативную съемку с радиометрической точностью 1 дБ с центральной частотой 5,405 ГГц вне зависимости от облачности и времени суток, что позволяет получать данные для наблюдения земной поверхности в различных условиях. КА Sentinel-1B выведен из эксплуатации [6]. Отказ оборудования на Sentinel-1B в декабре 2021 г. ускорил работу над Sentinel-1C, запуск которого ожидается в 2024 г.

Оптико-электронные КА Sentinel-2 осуществляют мультиспектральную съемку земной поверхности с разрешением от 10 до 60 метров. Данные Sentinel-2 используются для мониторинговых задач, включая сельское, лесное и водное хозяйства, городскую среду и др.

Sentinel-3 представляет собой спутник для наблюдения атмосферы, океана и суши. КА оснащен рядом научных приборов, включая инструменты для измерения цвета океана, температуры поверхности моря, высоты волн и других параметров. Sentinel-3 используется для мониторинга изменений в океане и атмосфере, включая климатические явления.

Sentinel-5P предназначен для мониторинга загрязнения окружающей среды и изменений климата на Земле. Датчики КА Sentinel-5P регистрируют загрязнители атмосферы: CO (окись углерода), NO₂ (диоксид азота), O₃ (озон), SO₂ (диоксид серы), CH₄ (метан), HCHO (формальдегид) и индекс аэрозоля. Данные, получаемые через регулярные промежутки, позволяют оценивать параметры качества воздуха. С помощью спутниковой информации Sentinel-5P/TROPOMI также можно отслеживать и изучать изменения в составе атмосферы, осуществлять космический мониторинг изменения климата.

Для работы с данными ДЗЗ в GEE необходимо создать программный код, который определит область интереса, подгрузит необходимые данные и выполнит соответствующий анализ. ChatGPT может значительно упростить этот процесс, предлагая автоматическую генерацию необходимого кода на основе заданных параметров и требований.

Исходную входную информацию, включая расположение необходимых векторных данных, коллекций ДЗЗ, необходимо сообщить ChatGPT для корректного генерирования кода. Для загрузки наборов данных требуется использовать соответствующие ссылки на коллекции изображений, например:

Sentinel-1:

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S1_GRD");
```

Sentinel-2:

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED");
```

Sentinel-3:

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S3/OLCI");
```

Sentinel 5-P:

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_AER_AI");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CLOUD");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CO");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_HCHO");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_NO2");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_O3");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_SO2");
```

```
ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/OFFL/L3_CH4").
```

В редакторе кода GEE основным языком программирования является JavaScript.

ChatGPT способен генерировать программный код JavaScript API Google Earth Engine, включая загрузку изображений, их обработку, анализ и визуализацию, подключая библиотеки для работы со спутниковыми изображениями Sentinel, используя при этом различные техники обработки данных.

Для получения корректного кода от ChatGPT необходимо придерживаться правил написания запросов, основное из которых – конкретность. То есть при подготовке запроса ChatGPT нужно определить цель, задачи и четко сформулировать инструкции. Указать язык программирования. Определить исходную (входную) и выходную информацию: прописать расположение коллекций изображений, векторных данных и другой необходимой информации. Если фрагмент кода требует определенных форматов ввода или вывода, рекомендуется включить эту информацию в диалог с ChatGPT. При необходимости поз-

вольте ChatGPT также выполнить любой другой анализ, который он считает подходящим для решения поставленных задач.

Sentinel-1

Режимы съёмки Sentinel-1: Interferometric Wide swath mode (IW) – широкозахватный интерферометрический режим; Wave mode (WV) – волновой режим; Strip Map mode (SM) – маршрутный режим; Extra Wide swath mode (EW) – сверхширокозахватный режим, – различаются технологией съёмки, шириной полосы захвата, пространственным разрешением радиолокационных изображений [7]. Информация о режимах приведена в табл. 1 и на рис. 1.

Основным режимом для съёмки поверхности суши является широкозахватный интерферометрический режим. IW реализуется при использовании технологии съёмки TOPSAR (Terrain Observation with Progressive Scans SAR). В ее основе лежит переключение зондирующего луча не только в направлении дальности, но и его перемещение вперед и назад в азимутальной плоскости. За счёт съёмки в трёх рядах по дальности обеспечивается полоса захвата шириной 250 км.

Радарным изображениям присуща «зернистость», которая затрудняет интерпретацию данных и анализ результатов. Этот вид шума обусловлен интерференцией радиоволн, отраженных от различных поверхностей на земле, и приводит к неравномерности яркости пикселей на снимке. Удаление спекл-шума является одной из первоочередных задач при работе с радиолокационными данными [8]. Поэтому в качестве примера взаимодействия с ChatGPT рассмотрена задача устранения зернистости на радарных снимках Sentinel-1 фильтрами Lee, RefinedLee и Median.

В качестве уточняющих инструкций предложено ChatGPT использовать широкозахватный интерферометрический режим (IW), перекрёстную вертикально-горизонтальную поляризацию (VH), область интереса ограничить границами Омской области.

Языковая модель ChatGPT обучена разным языкам, поэтому при инструктировании использовались запросы на русском.

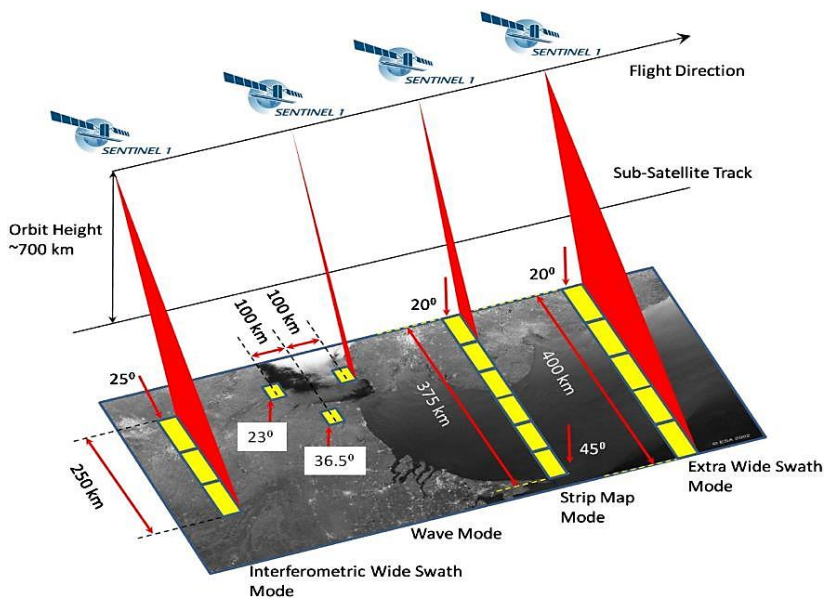


Рис. 2. Режимы съемки Sentinel

Таблица 2

Основные характеристики режимов съемки радиолокатора КА Sentinel-1

<i>Параметр</i>	<i>IW</i>	<i>WV</i>	<i>SM</i>	<i>EW</i>
Поляризация	Двойная: HH+HV, VV+VH	Одинарная: HH, VV	Двойная: HH+HV, VV+VH	Двойная: HH+HV, VV+VH
Ширина полосы захвата, км	250	20x20	80	410
Пространственное разрешение, м (для уровня Level 0)	5x20	5x5	5x5	20x40

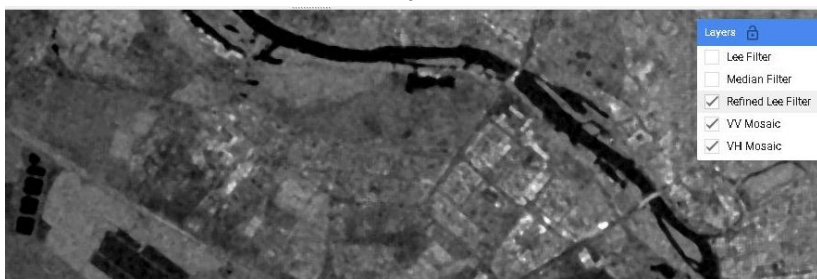
Ниже (и далее) приведен код, сгенерированный ChatGPT 3.5 turbo:

ChatGPT 3.5 turbo	<pre> // Загрузка снимков Sentinel-1 var collection = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S1_GRD") .filter(ee.Filter.listContains('transmitterReceiverPolarisation', 'VH')) .filter(ee.Filter.eq('instrumentMode', 'IW')) .filterBounds(ee.FeatureCollection('projects/earthengine- legacy/assets/users/ludmilasagarova20/Omsk_1')) .filterDate('2017-07-01', '2017-07-30'); // Создание мозаики Sentinel-1 территории Омской области var mosaicVH = collection.select('VH').mosaic(); // Применение фильтров спекл-шума var RefinedLee = mosaicVH.focal_median(2, 'square', 'pixels', 1); var Median = mosaicVH.reduceNeighborhood(ee.Reducer.median(), ee.Kernel.square(3, 'pixels')); var Lee = mosaicVH.focal_mean(3, 'circle', 'meters'); // Визуализация результатов Map.addLayer(RefinedLee, {min: -25, max: 0}, 'Refined Lee Filter'); Map.addLayer(Median, {min: -25, max: 0}, 'Median Filter'); Map.addLayer(Lee, {min: -25, max: 0}, 'Lee Filter'); </pre>
-------------------	--

Выполнение кода, сгенерированного ChatGPT, позволяет исследовать эффективность использования фильтров Lee, RefinedLee и Median для удаления зернистости на радарных снимках Sentinel-1 с применением API Google Earth Engine. Сравнение результатов фильтрации разными методами, представленными на рис. 3, показывает, что фильтр Lee и его модификация RefinedLee дали лучшие результаты по удалению зернистости на радарных снимках Sentinel-1 по сравнению с фильтром Median. Фильтр Lee позволяет сохранить детали изображения, при этом устраняя зернистость, в то время как фильтр Median существенно размывает изображение.



a



б



в

Рис. 3. Результаты фильтрации Sentinel-1:
Ли (а), улучшенный фильтр Ли (б), медианный (в)

Sentinel-2

В данном разделе представлены результаты взаимодействия ChatGPT и GEE по загрузке и обработке оптоэлектронных снимков Sentinel-2. В качестве примера использован метод построения индексных изображений на основе мультиспектральных данных ДЗЗ с использованием программного

кода Java Script API Google Earth Engine, так как индексные изображения являются важным инструментом анализа и интерпретации мультиспектральных данных, позволяют выделять объекты и явления на земной поверхности.

Спектральные индексы – это показатели, рассчитываемые в результате математических операций с разными спектральными диапазонами (каналами), имеющими отношение к определенным параметрам.

Так спектральная спутниковая информация позволяет рассчитать вегетационные индексы, характеризующие свойства растительного покрова на основе знаний о том, что самая выраженная особенность спектра растений – это минимум в красной области спектра и максимум в инфракрасной. Одним из наиболее распространенных индексов для анализа зеленой растительности является NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), который вычисляется как соотношение разности значений красного и инфракрасного спектральных каналов к их сумме. Водный индекс NDWI (Normalized Difference Water Index) рассчитывается на основе знаний, что самая выраженная особенность спектра воды – это минимум в инфракрасной области спектра и максимум в зеленой. MNDWI (Modified Normalized Difference Water Index) – улучшенный водный индекс. Для его расчета используются зеленый и SWIR-каналы. Преимущества MNDWI перед NDWI включают в себя более чувствительную детекцию водных объектов, уменьшение влияния атмосферы на результаты и более низкую чувствительность к поверхностным отражающим материалам, снижающую ложноположительные срабатывания. MNDWI обеспечивает более точную оценку водного покрытия на местности.

Каналы Sentinel-2, соответствующие наиболее значимым спектральным диапазонам для расчета вегетационных и водных индексов, включают каналы 3 (зеленый), 4 (красный), 8 (ближний инфракрасный), 11 (коротковолновый инфракрасный). Комбинируя данные из этих и других каналов, можно создать индексные изображения для их дальнейшего анализа. Спектральные характеристики Sentinel-2 приведены в табл. 3.

Таблица 3

Характеристики Sentinel-2

<i>Канал</i>	<i>Пространственное разрешение, м.</i>	<i>Длина волны, мкм</i>	<i>Общепринятое обозначение</i>
B1	60	0,430–0,450	Ultra Blue
B2	10	0,458–0,523	Blue
B3	10	0,543–0,578	Green
B4	10	0,650–0,680	Red
B5	20	0,698–0,713	Visible and Near Infrared (VNIR)
B6	20	0,733–0,748	VNIR
B7	20	0,773–0,793	VNIR
B8	10	0,784–0,900	VNIR
B8a	20	0,855–0,875	VNIR
B9	60	0,935–0,955	Short Wave Infrared (SWIR)
B10*	60	1,360–1,390	SWIR
B11	20	1,565–1,655	SWIR
B12	20	2,100–2,280	SWIR

*Канал 10 используется для атмосферной коррекции, не содержится в пакетах уровня обработки Level2a

Для построения в Google Earth Engine обзорной мозаики и индексных изображений по спектральным каналам Sentinel-2 ChatGPT3 turbo сгенерировал программный код на основе следующих инструкций:

Введите ваш текст...	<p>Напиши код JavaScript, используя API Google Earth Engine, для отображения мозаики безоблачных спутниковых изображений Sentinel-2 за период июнь-август 2023 года территории Омской области.</p> <p>Выведи на карту NDVI в оттенках зеленого цвета, MNDWI в синих оттенках.</p>
ChatGPT 3.5 turbo печатает...	<pre>// Загрузка безоблачных изображений Sentinel-2 за период июнь-август 2023 года var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2') .filterDate('2023-06-01', '2023-08-31') .filterBounds(ee.Geometry.Rectangle(71.1, 53.0, 75.0, 57.1)) .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10)); var image = collection.mosaic(); // Вычисление NDVI var ndvi = image.normalizedDifference(['B8', 'B4']).visualize({ min: -1, max: 1, palette: ['blue', 'white', 'green'] }); // Вычисление MNDWI var mndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B11']).visualize({ min: -1, max: 1, palette: ['white', 'blue'] }); // Добавление слоев на карту Map.addLayer(ndvi, {}, 'NDVI'); Map.addLayer(mndwi, {}, 'MNDWI');</pre>

На рис. 4 приведен код, скопированный в редактор кода GEE, где вручную внесены правки-уточнения. После просмотра результата его выполнения параметры визуализации индексных изображений скорректированы для большей наглядности картографической информации.

```

gpt2
Get Link Save Run Reset Apps

1 // Определяем исходные данные
2 var omskRegion = ee.FeatureCollection
i 3   ('projects/earthengine-legacy/assets/users/ludmilasagarova20/Omsk_1')
4 var dataset = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")
5   .filterBounds(omskRegion)
6   .filterDate('2021-06-01', '2021-08-30')
7   .filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE',3));
8
9 print(dataset);
10
11 // Создаем мозаику изображений
12 //var image = dataset.median();
13 var image = dataset.mean().clip(omskRegion);
14
15 // Добавляем изображение на карту
16 Map.addLayer(image, {bands: ['B4', 'B3', 'B2'], max: 2000}, 'Sentinel-2 mosaic');
17 print (image);
18 // Центрируем карту на выбранной территории
19 Map.centerObject(omskRegion, 7);
20 //Map.addLayer(satelliteImage, visParams, 'Satellite Image of Omsk Region');
21
22 var index = dataset.mosaic();
23
24 // Вычисление NDVI
25 var ndvi = index.normalizedDifference(['B8', 'B4']).visualize({
26   min: -1,
27   max: 1,
28   palette: ['blue', 'white', 'green']
29 });
30
31 // Вычисление MNDWI
32 var mndwi = index.normalizedDifference(['B3', 'B11']).visualize({
33   min: -1,
34   max: 0,
35   palette: ['white', 'blue']
36 });
37
38 // Добавление слоев на карту
39 Map.addLayer(ndvi.clip(omskRegion), {}, 'NDVI');
40 Map.addLayer(mndwi.clip(omskRegion), {}, 'MNDWI');
41

```

Рис. 4. Фрагмент кода для обработки MSI Sentinel-2

В данном случае запрос к ChatGPT не содержал полные инструкции (намеренно, для демонстрации). Следует особо отметить, что в инструкциях не были указаны ни формулы для вычисления индексных изображений, ни спектральные каналы, которые необходимо использовать в этих формулах. Тем не менее ChatGPT извлек из библиотеки Google Earth Engine функцию `image.normalizedDifference` [9], так как нормализованная разность относится к стандартным индексам, широко применяемым в геоинформационном анализе для выделения определенных объектов или явлений на изображениях.

Использование функции `image.normalizedDifference` обеспечивает удобство и эффективность кода, поскольку она автоматически выполняет необходимые операции для вычисления нормализованной разности. В качестве параметров функции ChatGPT были выбраны именно те каналы Sentinel-2, которые соответствуют требуемым спектральным диапазонам для расчета конкретных индексов.

Таким образом, вместо использования математических операций на спектральных каналах непосредственно, функции предоставляют более простой и структурированный способ работы с данными, что сокращает вероятность ошибок и упрощает структуру программного кода.

К «отсутствующим» входным данным также относятся ссылки на коллекцию изображений Sentinel-2 и сведения о географической области интереса. Поэтому эту информацию требуется актуализировать в редакторе кода вручную. Следует отметить, что первоначально координаты Омской области были определены приблизительно. На повторный запрос по уточнению географического положения Омской области, ответ ChatGPT был более корректным:

ChatGPT 3.5 turbo	Географические координаты ограничивающего прямоугольника Омской области примерно следующие: Северная широта: 53°30' N - 58°30'N Восточная долгота: 69°30' E - 77°30'E
----------------------	---

На рис. 5 приведены границы прямоугольной формы, построенные по координатам от ChatGPT до и после их уточнения.

Задание области интереса – территории Омской области – вместо прямоугольника с координатами северной широты и восточной долготы, которые ChatGPT определил из своих источников, заменено на ссылку предварительно загруженного в облачную платформу shp-файла административных границ исследуемой территории. Уменьшено пороговое значение облачности для выборки снимков, входящих в область интереса (см. табл. 4).

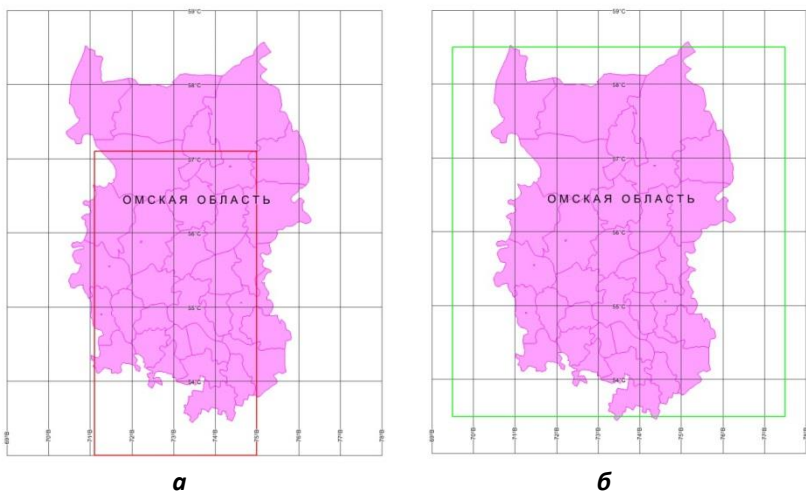


Рис. 5. Варианты ограничения коллекции изображений по территориальному признаку:
а – первоначальное от ChatGPT; *б* – уточненное ChatGPT

Таблица 4

Примеры редактирования программного кода для создания индексных изображений

<i>Основные этапы</i>	<i>Фрагмент исходного кода ChatGPT</i>	<i>Фрагмент кода в редакторе кода GEE</i>
Определение коллекции ДЗЗ в GEE	<code>var collection = ee.ImageCollection('COPERNICUS/S2')</code>	<code>var dataset = ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR_HARMONIZED")</code>
Выбор интересующей территории и временного периода	<code>...filterBounds(ee.Geometry.Rectangle(71.1, 53.0, 75.0, 57.1))</code> <code>...filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 10))</code>	<code>var omskRegion = ee.FeatureCollection('projects/earthengine-legacy/assets/users/ludmilasagaro20/Omsk_1')</code> <code>...filter(ee.Filter.lt('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 3))</code>

Основные этапы	Фрагмент исходного кода ChatGPT	Фрагмент кода в редакторе кода GEE
Визуализация индексного изображения	<pre>var mndwi = image.normalizedDifference(['B3', 'B11']).visualize({ min: -1, max: 1, palette: ['white', 'blue'] });</pre>	<pre>var mndwi = index.normalizedDifference(['B3', 'B11']).visualize({ min: -1, max: 0, palette: ['white', 'blue'] });</pre>

Результаты расчета индексных изображений территории Омской области приведены на рис. 6.

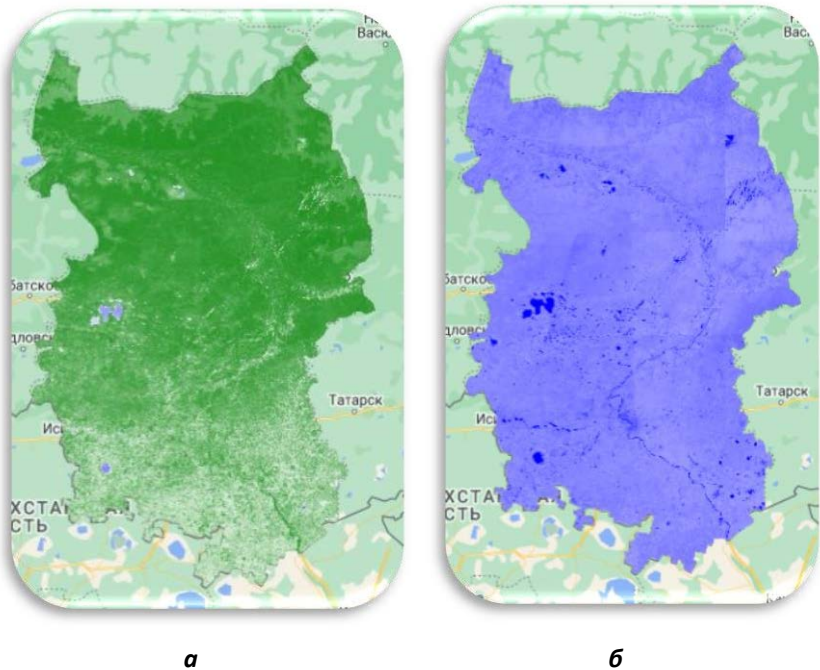


Рис. 6. Результаты построения индексных изображений:
 а – NDVI; б – MNDWI

Таким образом, при работе с данными ДЗЗ космических аппаратов Sentinel-2 использованы возможности ChatGPT для создания предварительного кода расчета спектральных индексов по мультиспектральным данным, который подгружает необходимые снимки, выполняет их обработку с привлечением функций библиотеки GEE и выводит результаты в удобном для анализа виде.

Sentinel 5-P

Sentinel-5P оснащен прибором TROPOMI (Tropospheric Monitoring Instrument), который предназначен для мониторинга атмосферных составляющих [10].

В GEE доступны данные Sentinel-5P уровня обработки Level 2, они предварительно обработаны и скорректированы для использования в научных и прикладных исследованиях.

Иллюстрация использования ChatGPT для Sentinel 5-P приведена на примере решения задачи оценки качества воздуха в Омской области. В качестве исследуемого загрязняющего вещества выбран диоксид азота, так как NO_2 является ключевым индикатором загрязнения воздуха, особенно применительно к выбросам транспортных средств.

Ниже приведены инструкции для ChatGPT для решения поставленной задачи:

Введите ваш текст...	<p>Использовать JavaScript API Google Earth Engine для оценки качества воздуха в Омской области.</p> <p>Получить изображение Sentinel 5-P:</p> <p>Загрузи изображения Sentinel 5-P для NO_2, используя идентификатор коллекции:</p> <pre>NO₂: ee.ImageCollection("COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_NO₂")</pre> <p>Фильтрация и извлечение подходящих полос:</p> <p>Отфильтруй коллекцию с помощью соответствующих данных, чтобы получить точные результаты определения NO_2 над поверхностью.</p> <p>Ограничения по временному диапазону:</p> <p>Извлеки данные из коллекции за период с 1 октября 2023 г. по 31 октября 2023 г.</p>
----------------------	--

<p>Параметры визуализации: Примени параметры визуализации. Для отображения NO₂ используй цветовую палитру «белый, синий, зеленый, оранжевый, красный».</p> <p>Пространственное представление: Загрузи административную границу Омской области ee.FeatureCollection('projects/earthengine-legacy/assets/users/ludmilasagarova20/Omsk_1') и обрежь полученное изображение по Омской области.</p> <p>Статистика: Вычисли среднее, максимальное и минимальное значение NO₂ для составного изображения за период с 1 октября 2023 г. по 31 октября 2023 г.</p> <p>Вывод результатов: Выведи составное изображение на карту, обрезав его по границе Омской области, чтобы получить представление о распределении и концентрации NO₂. Распечатай максимальное, средние, минимальное значения NO₂ в консоли.</p>
--

Результат выполнения программного кода приведен на рис. 7.

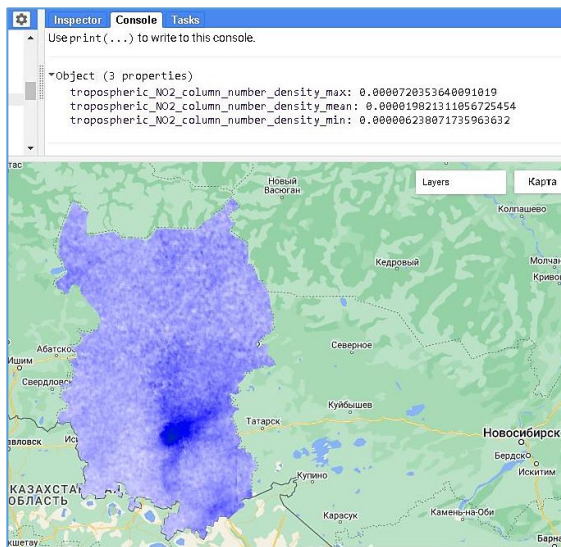


Рис. 7. Результат обработки данных Sentinel-5P

Данные Sentinel-5P TROPOMI L2_NO₂ в целом хорошо согласуются с наземными измерениями и спутниковыми данными OMI NO₂. Оценки смещения соответствуют требованиям миссии: <50% для тропосферного NO₂ и <10% для стратосферного NO₂ [11].

Таким образом, Sentinel-5P – ценный инструмент для мониторинга и анализа качества атмосферы и ее воздействия на окружающую среду.

Следует отметить, что ChatGPT умеет не только генерировать программный код, но и оценивать поступающие ему инструкции. Пример такой оценки ChatGPT входных инструкций по исследованию качества воздуха в Омской области:

ChatGPT 3.5 turbo Печатает...	<p>Это отличный исследовательский подход для анализа качества воздуха в Омской области с использованием API JavaScript Google Earth Engine и изображений Sentinel 5-P NO₂. Ваш план действий хорошо структурирован и обеспечивает полный спектр анализа данных.</p> <p>Чтобы успешно выполнить ваше исследование, вам необходимо строго следовать указанным шагам, включая фильтрацию изображений, обрезку по границам области, вычисление статистики и классификацию изображений. Кроме того, обратите внимание на различные параметры визуализации, чтобы убедиться, что результаты наглядно представлены на карте.</p> <p>При выполнении анализа не забывайте учитывать особенности данных Sentinel 5-P NO₂ и правильно интерпретировать полученные результаты. Надеюсь, ваше исследование будет успешным и принесет ценные выводы о качестве воздуха в регионе. Удачи!</p>
-------------------------------	--

Обсуждение и выводы

Очень часто задают вопрос, а зачем/для чего использовать ChatGPT и GEE, почему бы не обработать космоснимки «стандартным» способом? Чтобы ответить на этот вопрос, вернусь к моему знакомству с ChatGPT.

Итак, мой первый диалог с ChatGPT начался с вопроса «Как преобразовать текст с картинки в редактируемый текст?» На что ChatGPT ответил, что, если текста немного, набери сама или попроси набрать его кого-нибудь. Ответ был не тот, что я

ожидала, но... очень логичный. Перефразировав его применительно к использованию при обработке данных ДЗЗ ChatGPT и GEE, можно рекомендовать следующее. Если требуется обработать один или несколько снимков, то можно скачать отдельные сцены и обработать их вручную, используя встроенные функции и алгоритмы или растровый калькулятор соответствующего программного обеспечения, контролируя при этом каждый этап процесса обработки. Но когда необходимо применить длительный временной ряд данных или снимки нужны на большую территорию, то помощь, предоставляемая ChatGPT и GEE в автоматизации процесса доступа к данным и их обработки, неоспорима. Автоматизация написания программного кода значительно экономит время и усилия исследователей, а также приводит к упрощению процесса работы с цифровой космической информацией в GEE.

Преимущества ChatGPT:

- ChatGPT Turbo обеспечивает эффективный процесс написания программного кода API GEE благодаря передовым технологиям и оптимизированным алгоритмам и предлагает широкий спектр функций и возможностей для генерирования программного кода API GEE.
- ChatGPT активно поддерживается и обновляется разработчиками.

Использование ChatGPT для генерации кода на Java Script для работы с API Google Earth Engine, как показано на примере данных ДЗЗ группировки КА Sentinel, представляется потенциально мощным инструментом для автоматизации обработки и анализа геопространственных данных.

Дальнейшее исследование и развитие этого подхода раскрывает огромный потенциал перед научным сообществом, а также способствует вовлечению молодых ученых к изучению Земли из космоса. Таким образом, ChatGPT и GEE – два «кита» современного мира, а, объединяя их возможности, можно отправляться в плавание в увлекательный и многообещающий мир дистанционного зондирования Земли.

Работа выполнена по государственному заданию Омского научного центра СО РАН (номер госрегистрации проекта 122011200349-3).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Yiheng Liu, Tianle Han, and etc.* Summary of ChatGPT-Related research and perspective towards the future of large language models // *Meta-Radiology*. 2023. Vol. 1, iss. 2, 100017, <https://doi.org/10.1016/j.metrad.2023.100017>.
- [2] *Alcantara Enner*. Remote sensing: Techniques, applications and technologies. 2013.
- [3] *Li X., Wen C., Hu Y., Yuan Z. and Zhu X. X.* Vision-Language Models in Remote Sensing: Current progress and future trends // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, doi: 10.1109/MGRS.2024.3383473.
- [4] Google Earth Engine. URL: <https://earthengine.google.com/>.
- [5] Европейское космическое агентство (ЕКА) : офиц. сайт. URL: https://esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Earth_observing_missions.
- [6] Европейское космическое агентство (ЕКА) : офиц. сайт. URL: https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission_ends_for_Copernicus_Sentinel-1B_satellite.
- [7] Sentinel-online : офиц. сайт. URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/copernicus/sentinel-1>.
- [8] *Яценко А. С., Крошка В. В., Кривальцевич С. В.* Использование данных спутникового радиолокатора Sentinel-1 для нужд дистанционного тематического картирования поверхности // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2018. № 3. С. 53–58.
- [9] Google for developers URL: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-image-normalizeddifference>.
- [10] Copernicus Sentinel-5P (processed by ESA), 2021, TROPOMI Level 2 Nitrogen Dioxide total column products. Version 02. European Space Agency. <https://doi.org/10.5270/S5P-9bnp8q8>.
- [11] *Константинова А. М., Бриль А. А.* Мониторинг качества воздуха с помощью данных TROPOMI в информационной системе ВЕГА-Science // *Матер. 19-й Междунар. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»*. М. : ИКИ РАН, 2021. С. 98. DOI 10.21046/19DZZconf-2021a.

Шагарова Людмила Валентиновна, инженер Института радиопизики и физической электроники ОНЦ СО РАН, radioseminar@радиосеминар.рф.

Научное издание

Современные проблемы радиофизики и радиотехники

*Сборник докладов
Омского научного семинара*

Выпуск 11

Ответственный редактор *С. В. Кривальцевич*

Макет подготовлен в АО «ОНИИП»
Корректор, технический редактор *О.А. Сафонова*
Дизайн обложки *А.Л. Ворожцов, С. Г. Машинская*

Подписано в печать 23.08.2024
Формат 60x84 1/16. Бумага типографская.
Усл. печ. л. 6,0. Уч.-изд. л. 6,5. Тираж 60 экз.

Отпечатано на полиграфической базе АО «ОНИИП»
644071, Омск, ул. Масленникова, 231