



«Прошло *более полувека* с того далекого времени, когда был образован первый и единственный на просторах от Урала до Тихого океана специализированный вуз, перед которым ставилась задача подготовки инженеров для бурно развивавшейся радиоэлектронной промышленности страны.

Томский институт радиоэлектроники и электронной техники за эти годы превратился в один из ведущих технических университетов России.

История университета — это история его кадров. ... Десятки, сотни замечательных, умных и красивых людей проходят перед нами. Это они создали Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, это их способности, энергия и самоотверженный труд воплощены в том, что кадровую основу радиоэлектронной промышленности Сибири, Дальнего Востока, Средней Азии образовали именно выпускники ТУСУРа.

Немного осталось тех, кто в 1962 году принял эстафету радиотехнического факультета Томского политехнического института. Пришли новые люди с новыми ценностями и устремлениями. С трудом вспоминаются многие имена из тех, кто в свое время внес существенный вклад в развитие университета. Иногда мы забываем, что наши сегодняшние успехи основаны на достижениях предыдущих поколений.»

*«Кто есть кто в истории ТУСУРа» 2009 г.  
(иллюстрированный очерк о роли личностей в истории первого и единственного вуза радиоэлектронного профиля на территории Азиатской части России и СССР  
(составители Подлипенский В.В., Шарьгин Г.С.  
под общей редакцией Г.С. Шарьгина  
(заменяв в ней буквально одно слово)*



30 сентября — 1 октября | РТС | ТУСУР

# ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ 2020

ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ-2020. ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

**ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ  
НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ВЕДУЩИХ  
НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ РАДИОЛОКАЦИИ,  
РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ  
СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ,**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники

## **ШАРЫГИНСКИЕ ЧТЕНИЯ**

---

### **ВТОРАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ НАУЧНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ВЕДУЩИХ НАУЧНЫХ ШКОЛ В ОБЛАСТИ РАДИОЛОКАЦИИ, РАДИОНАВИГАЦИИ И РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ**

**Томск, 30 сентября – 1 октября 2020 г.**

**Материалы конференции**

Томск  
Издательство ТУСУРа  
2020

ББК 32.84  
Ш269

### Организационный комитет конференции

Рулевский В.М. – председатель Программного комитета, ректор ТУСУРа, канд. техн. наук, доцент;  
Лоцилов А.Г. – заместитель председателя Программного комитета, проректор по научной работе и инновациям ТУСУРа, зав. каф. КУДР, канд. техн. наук, доцент;  
Медовник А.В. – начальник научного управления ТУСУРа, доцент каф. физики, канд. техн. наук;  
Захаров Ф.Н. – ст. науч. сотр., доцент каф. РТС ТУСУРа, канд. техн. наук;  
Коротина Т.Ю. – заведующая аспирантурой и докторантурой ТУСУРа, канд. техн. наук;  
Ноздреватых Д.О. – ст. преподаватель каф. РТС ТУСУРа;  
Юрченкова Е.А., вед. инженер ОАиД ТУСУРа, канд. хим. наук.

### Программный комитет

Рулевский В.М., канд. техн. наук; Лоцилов А.Г., канд. техн. наук;  
Сенченко П.В., канд. техн. наук; Абдрахманова М.В.;  
Акулиничев Ю.П., д-р техн. наук; Аникин А.С., канд. техн. наук;  
Geringer V., PhD, Ravensburg, Germany; Голиков А.М., канд. техн. наук;  
Громов В.А., канд. техн. наук; Денисов В.П., д-р техн. наук;  
Захаров Ф.Н., канд. техн. наук; Ильчук А.Р., зам. директора по научной работе АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина», г. Фрязино;  
Киселев О.Н., д-р техн. наук; Красненко Н.П., д-р физ.-мат. наук;  
Kruglov R., PhD, Germany; Куприц В.Ю., канд. техн. наук;  
Лебедев В.Ю., канд. техн. наук; Майстренко В.А., д-р техн. наук, проф., г. Омск;  
Медовник А.В., канд. техн. наук; Мещеряков А.А., канд. техн. наук;  
Мелихов С.В., д-р техн. наук, проф.; Тисленко В.И., д-р техн. наук.

**Ш269 Шарьгинские чтения.** Вторая международная научная конференция ведущих научных школ в области радиолокации, радионавигации и радиоэлектронных систем передачи информации, 30 сентября – 1 октября 2020 г., г. Томск : материалы конференции. – Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 269 с.

ISBN 978-5-86889-913-3

Конференция приурочена ко дню рождения Германа Сергеевича. В ней приняли участие ученые и специалисты предприятий и организаций, преподаватели, научные сотрудники, аспиранты и студенты высших учебных заведений России. Обсуждались вопросы по трём направлениям: радиофизика и распространение радиоволн; радиотехнические системы; взаимодействие вузов с предприятиями ОПК. В 2020 году кафедра радиотехнических систем отметила свое 60-летие.

ББК 32.84

ISBN 978-5-86889-913-3

© Томск. гос. ун-т систем упр.  
и радиоэлектроники, 2020

*Посвящается памяти  
профессора Томского государственного  
университета систем управления  
и радиоэлектроники академика  
Германа Сергеевича Шарыгина*



# ПЛЕНАРНОЕ ЗАСЕДАНИЕ

---

УДК 930.24

Ю.П. Акулиничев, В.П. Денисов

## 60 ЛЕТ КАФЕДРЕ РТС

*Дан обзор истории становления и развития кафедры радиотехнических систем радиотехнического факультета Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Отмечены особенности организации учебного процесса и основные достижения в научных исследованиях, которые всегда проводились в теснейшем взаимодействии с НИИ радиотехнических систем ТУСУРа. Особо отмечен вклад сотрудников кафедры – творцов этой истории – и признанного лидера профессора Г.С. Шарыгина.*

В 2020 году кафедре радиотехнических систем (РТС) радиотехнического факультета (РТФ) ТУСУРа исполнилось 60 лет.

Первый за Уралом радиотехнический факультет в составе двух кафедр («Радиотехника» и «Электровакuumная техника») был открыт в Томском политехническом институте (ТПИ) 1 октября 1950 г. К моменту создания на базе РТФ нового вуза — Томского института радиоэлектроники и электронной техники (ТИРиЭТ, 1962) — в состав факультета входили кафедры «Теоретические основы радиотехники», «Радиопередающие устройства», «Радиоприемные устройства», «Электронные приборы», «Диэлектрики и полупроводники». Ежегодный набор на факультет составлял 250 студентов, которых готовили по специальностям «Диэлектрики и полупроводники», «Конструирование и технология производства радиоаппаратуры», «Радиотехника», «Электронные приборы» и «Промышленная электроника».

Истоками и продолжением истории кафедры РТС являются истории трех кафедр: самой кафедры РТС, кафедры радиоприемных устройств (РУ) и самой молодой на РТФ ТУСУРа кафедры средств радиосвязи (СРС).

Кафедра РТС, первоначально названная кафедрой радиооборудования, была открыта в составе факультета автоматики и телемеханики Томского политехнического института 1 сентября 1960 года (приказ Министра высшего и среднего специального образования РСФСР № 43 от 20 мая 1960 г., приказ по Томскому совнархозу и Томскому политехническому институту № 428/1370 от 27 сентября 1960 г.). В 1962 году при создании ТИРиЭТа в нем открылся факультет радиоуправления, куда была переведена кафедра радиооборудования вместе

со студентами и где получила название кафедры радиоуправления. Переименования на этом не закончились, и в 1966 году она была переименована в кафедру радиоэлектронных устройств (РЭУ), вошла в состав РТФ и проводила ежегодный набор трех групп студентов по специальности «Радиоэлектронные устройства».

Фактическим основателем кафедры радиооборудования был Александр Сергеевич Чумаков, в 1954 году он окончил физико-технический факультет ТПИ по специальности «Электрофизические установки». Именно он — старший инженер Института ядерной физики при ТПИ — в возрасте 28 лет был назначен ответственным за организацию новой кафедры.

Состав кафедры в самом начале деятельности института (примерно с 1962 по 1965 годы) был небольшим:

1. Бакшт Х.С., канд. техн. наук, доц. каф. СВЧ (номинальный заведующий кафедрой РТС).

2. Чумаков А.С., ст. преподаватель, фактический руководитель кафедры, преподавал теорию вероятностей и статистическую радиотехнику.

3. Молодёжников А.М., ст. преподаватель.

4. Передня А.В., ассистент.

5. Киселёв О.Н., ассистент.

6. Авраимова Г.В., ст. преподаватель, курс РТС.

7. Дроздова В.И., ст. преподаватель, курс «Системы связи», помощник зав. каф. по учебной работе.

8. Копытова Е.А., ассистент.

9. Васильков В.Т., ст. преподаватель, курс «Радиоуправление».

10. Лахтиков В.А., мл. науч. сотр.

В это же время обучались в аспирантуре в МАИ Н.Н. Кирпотин и Р.Н. Семёнов.

Кафедра радиоприемных устройств ведет свою летопись от кафедры радиотехнической аппаратуры (РТА), которая образовалась в 1952 г. на базе кафедры радиотехники ТПИ. С 1953 года на кафедре РТА под руководством канд. техн. наук Е.И. Фиалко разворачиваются масштабные научные исследования — сначала в области метеорной радиолокации, а затем (с 1958 года) в области экспериментального изучения особенностей распространения радиоволн сантиметрового диапазона на наземных трассах. Прикладная задача исследований заключалась в создании образца радиолокационной техники, учитывающего ограничения на технические параметры, накладываемые условиями распространения радиоволн. Работа получила условное название «Пункт». Ответственным исполнителем, а затем и научным руководителем темы стал Ф.И. Перегудов. Денисов В.П., Дудко Б.П. и Шарыгин Г.С. (аспиранты Е.И. Фиалко) стали поначалу основной рабочей силой. В 1956 году кафедра РТА разделилась на две: «Конст-

руирование и технология производства радиоаппаратуры» (КТПРА) и «Радиоприемные устройства». Тема «Пункт» выполнялась на кафедре КТПРА. К 1961 году она была успешно завершена. Встал вопрос о проведении опытно-конструкторской работы по созданию образца новой техники. В рамках вузовской кафедры ТПИ в то время это было невозможно, и Ф.И. Перегудов уводит свой коллектив (практически весь за единичными исключениями) во вновь созданную в Томске проектную организацию, получившую позднее название КБ «Проект». Практически одновременно в 1962 году на базе РТФ ТПИ организуется новый вуз — ТИРиЭТ. Шарыгин Г.С. занимает в нем должность заведующего кафедрой РУ, заменив Г.С. Зубарева, который, как известно, стал ректором. На новом месте Г.С. Шарыгин продолжил исследования в области влияния условий распространения радиоволн на достижимые характеристики радиотехнических систем. Поначалу его заказчиком было КБ «Проект». Но научный авторитет коллектива, из которого вышел Герман Сергеевич, знания и опыт, полученные при выполнении НИР «Пункт», приобретенные деловые связи позволили ему быстро найти новых заказчиков и организовать масштабные исследования. К 1967 году коллектив исследователей уже насчитывал 80 человек, включая сотрудников созданной Г.С. Шарыгиным проблемной лаборатории радиотехнических систем научно-исследовательского сектора вуза (НИСа) — предтечи будущего НИИ РТС.

Тем временем КБ «Проект» по не зависящим от него обстоятельствам изменило профиль своей деятельности. В связи с этим В.П. Денисов и Б.П. Дудко перешли на работу в ТИРиЭТ, будучи избранными по конкурсу старшими преподавателями кафедры РЭУ по рекомендации Г.С. Зубарева. Перегудов Ф.И. становится директором радиотехнического завода, но одновременно сотрудничает с кафедрой РЭУ. В 1969 году Г.С. Шарыгин оставляет должность заведующего кафедрой РУ и переходит на кафедру РТС в должности старшего научного сотрудника для завершения работы над докторской диссертацией. В 1973 году кафедра РЭУ переименовывается в РТС, так как это название больше соответствует профилю подготовки выпускников. Таким образом, основные исполнители НИР «Пункт» становятся сотрудниками кафедры РТС. В 1974 году Г.С. Шарыгин избирается заведующим кафедрой, поменявшись ролями с В.П. Денисовым, который тоже перешел на должность ст. науч. сотр. с той же целью.

Нет ничего удивительного, что многие сотрудники кафедры РУ (Глазов Г.Н., Акулиничев Ю.П., Тисленко В.И., Красненко Н.П., Короткова В.М. Сеитов В.Н. и другие) прямым или извилистым путем постепенно перемещались на кафедру РТС как более близкую по тематике педагогической и научной работы. После того как Г.С. Шарыгин возглавил кафедру РТС, организационное, научное и идейное объединение кафедры и лаборатории РТС НИСа стало свершившимся фактом.





Коллектив кафедры РТС в 1976 г.

*Слева направо сидят:* А.М. Молодежников, В.И. Дроздова,  
О.Н. Веретельникова, Г.С. Шарыгин, Г.В. Авраамова,  
Р.П. Попова, В.И. Тисленко.

*Второй ряд:* Ю.П. Акулиничев, В.Н. Зятиков, Б.П. Дудко, В.А. Чикуров,  
А.В. Конуров, В.П. Денисов, В.М. Козак, А.С. Чумаков.

*Верхний ряд:* М.Г. Седунов, В.М. Ильющенко, А.В. Ненашев,  
А.С. Бернгард, А.И. Надеев

Кафедра средств радиосвязи (СРС) была создана приказом ректора ТУСУРа 01.06.2001 года, возглавил кафедру д-р техн. наук, проф. С.В. Мелихов. Кафедра вела подготовку по специальности «Средства связи с подвижными объектами».

К 2015 году в связи с меняющимися обстоятельствами кафедры РТС и СРС столкнулись с рядом проблем, и в качестве выхода возникла идея объединения. Обе стороны поддержали идею, и в состав кафедры РТС, как более крупной, влились еще несколько квалифицированных сотрудников: Колесов И.А., Якушевич Г.Н., Кологризов В.А., Пушкирев В.П.

Характер роста и развития кафедры РТС хорошо прослеживается при анализе гистограмм возраста ППС (рисунок 1). В первое десятилетие все были молодыми, в последующие два десятилетия распределение приобрело почти идеальный вид. Именно эти три десятилетия — период наиболее стремительного развития кафедры как в учебной, так и в научной работе. Данные, относящиеся к последнему десятилетию XX века, свидетельствуют о появлении серьезных проблем (во всяком случае, разрыв поколений никогда не был признаком приближения хороших времен). В первом десятилетии XXI века этот разрыв еще больше увеличился, но появилась надежда:

возросло количество молодых сотрудников, к тому же успешно повышающих свою квалификацию — Аникин А.С., Великанова Е.П., Громов В.А., Захаров Ф.Н., Ноздревых Д.О. и другие многообещающие вчерашние выпускники.

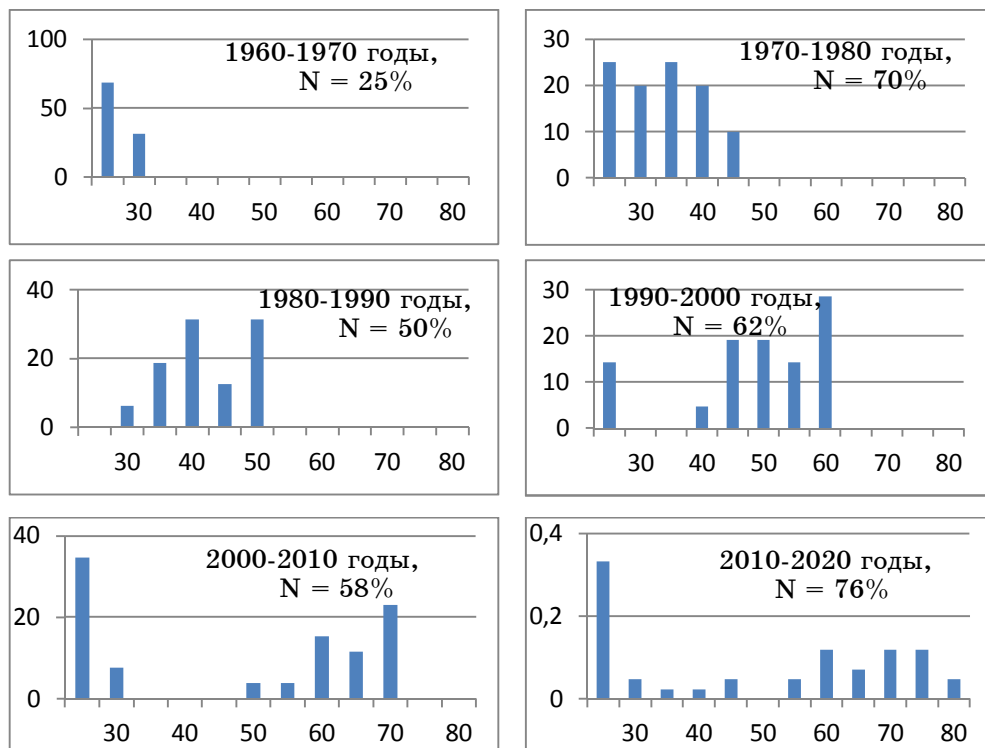


Рисунок 1 — Гистограммы возраста преподавателей кафедры в разные десятилетия в процентах, N – количество преподавателей, имеющих ученые степени

Неоценимый вклад в развитие кафедры внесли и другие сотрудники, обеспечившие ее слаженную работу. Это секретари кафедры Попова Р.П., Петрова И.А., Попова А.И., Кайрова Н.А. и Ермолаева Г.Е., заведующие учебными лабораториями Данченко А.В., Демко А.И., Никитин С.А., Седунов М.Г., Конуров А.В., Голиков А.М., Елисеенко А.В., Назаркин С.Н., Никифоров А.Н. и универсал Блишковский Н.К. За хорошее оснащение и бесперебойную работу оборудования следует благодарить инженеров, лаборантов и техников Сладкова А.В., Чикурова В.А., Галеева С.Т., Слесарева М.И., Власкина И.И., Ильичева И.Н., Назаркину И.А., Козака В.М., Коняеву Г.М., Веретельникову (Джерихову) О.Н. и тех, кого авторы забыли упомянуть.

Итак, за 60 лет было 5 заведующих кафедрой, то есть формально можно считать, что каждый заведовал кафедрой в среднем 12 лет.



Бакшт  
Хаим  
Самуилович,  
канд. техн.  
наук, доц.  
1962–1965



Чумаков  
Александр  
Сергеевич,  
канд. физ.-  
мат. наук,  
доц.  
1965–1969



Денисов  
Вадим  
Прокопьевич,  
д-р техн.  
наук, проф.  
1969–1974



Шарыгин  
Герман  
Сергеевич,  
д-р техн.  
наук, проф.  
1974–2015



Мелихов  
Сергей  
Всеволодович,  
д-р техн. наук,  
проф.  
с 2015

Общеизвестно, что проектирование радиотехнической системы — это «высший пилотаж» радиоэлектроники, потому что для этого требуются глубокие знания практически во всех ее областях плюс хороший практический опыт. Понимая это, сотрудники кафедры, особенно В.М. Ильющенко, С.Т. Галеев, Б.П. Дудко, В.И. Дроздова, А.М. Голиков, В.Л. Гулько, Н.К. Блинковский, делали все возможное для оснащения лабораторий оборудованием.

При этом, используя помощь выпускников кафедры или заказчиков НИР, добывали пусть не новые, но еще современные и вполне работоспособные радиотехнические комплексы, которые инженеры кафедры оснащали различными имитаторами, средствами управления и контроля, без которых проведение занятий на этом оборудовании было бы весьма проблематичным. Параллельно с этим создавались специальные лабораторные макеты для изучения различных преобразований сигналов. В итоге меньше чем за 10 лет были введены в строй крупные учебные лаборатории: радиолокации, радионавигации и систем связи, а позже и лаборатория вычислительной техники. Неоценимую помощь в комплектовании лаборатории радиотехнических систем оказал заместитель генерального директора УПКБ «Деталь» В.К. Галкин. Из ЦКБ «Автоматика» (г. Омск) при содействии заместителя генерального директора предприятия Э.И. Седунова получен действующий комплект аппаратуры боевого самолета, предупреждающий о его облучении наземной радиолокационной станцией. Это позволило создать цикл лабораторных работ по курсу «Радиоэлектронная борьба».

Довольно квалифицированный преподавательский состав кафедры сумел первым в ТИРиЭТ поставить и методически обеспечить такие еще новые для того времени курсы, как теория вероятностей, теория информации, статистическая радиотехника, радиотехнические системы, и в течение нескольких лет оставаться монополистами в

этих областях, то есть проводить все виды таких занятий и для остальных факультетов. Так продолжалось до тех пор, пока в погоне за учебной нагрузкой кафедры не начали массово переходить на систему ведения «натурального хозяйства» (очевидно, что проблему качества в такой ситуации лучше не обсуждать).

Студенты специальности «Радиоэлектронные системы» обучались пять с половиной лет, использовали хорошую лабораторную базу и к тому же имели неограниченные возможности для участия в НИР. Поэтому не удивительно, что эта специальность в течение первых 2–3 десятилетий считалась элитной, на нее шли только лучшие абитуриенты и в процессе учебы уверенно подтверждали справедливость народной молвы. Во всяком случае, на работу их принимали без всяких собеседований.

Но в девяностые годы прошлого столетия развал СССР сопровождался не менее стремительным разрушением радиотехнических предприятий. С широким внедрением вычислительной техники, весьма востребованной среди работодателей и популярной среди молодежи, появилась возможность стать специалистом по эксплуатации импортных компьютеров. Поэтому из конъюнктурных соображений на кафедре была открыта специальность «Защищенные системы связи». А популярность специальности РЭУ среди абитуриентов резко упала. Однажды дошло даже до того, что проходной балл на эту специальность был одним из самых низких в ТУСУРе.

Нужно было срочно искать хоть какой-то выход из этой ситуации. Любой человек, придумывающий что-то новое, если он получил приличное образование, всегда помнит, что «новое — это хорошо забытое старое». Эта истина подтвердилась еще раз, когда Г.С. Шарыгин вместе с заместителем декана РТФ В.М. Ицковичем после длительных обсуждений выдвинули идею введения группового проектного обучения (ГПО) и начали интенсивную подготовку методических материалов для ее внедрения. Часы в учебном плане для введения такой дисциплины появились вследствие того, что военная подготовка наших выпускников канула в историю. Идея руководству вуза понравилась, и вскоре ГПО стало одним из брендов ТУСУРа.

Хороший эффект имели и меры морального стимулирования лучших студентов. Например, кафедра РТС — единственная кафедра, которая встречает приходящих внушительной доской с отлитыми в металле фамилиями всех своих выпускников, получивших диплом с отличием. Или день кафедры, который проводится в День космонавтики, где отмечают лучшие студенты.

Колоссальные усилия были предприняты и для повышения квалификации преподавателей. Условия для полноценного участия в НИР и защиты диссертаций на кафедре были всегда. В дополнение к этому в 2002 году Г.С. Шарыгин организовал новый диссертационный

совет и стал его председателем. Пожалуй, он оказался самым эффективным в ТУСУРе: всего прошли защиты около ста докторских и кандидатских диссертаций и ни по одной из них ни совет, ни ВАК не приняли отрицательного решения. Сейчас в составе преподавателей кафедры 7 докторов и 13 кандидатов наук.



Коллектив кафедры РТС в 2002 г.

*Сидят слева-направо:* Дудко Б.П., Аврамова Г.В., Чумаков А.С., Шарыгин Г.С., Денисов В.П., Зятиков В.Н.

*Второй ряд:* Кураков В.А., Тисленко В.И., Ермолаева Г.Е., Веретельникова О.Н., Красненко Н.П., Елисеенко А.В., Колесова Ю.И., Мартышевский Ю.В.

*Верхний ряд:* Сеитов В.Н., Бернгардт А.С., Илюхин Б.В., Блинковский Н.К., Акулиничев Ю.П., Голиков А.М.

В издательстве «Лань» вышли два учебных пособия, написанных преподавателями кафедры, не говоря уже о множестве учебно-методических работ, изданных в ТУСУРе.

Эти и другие меры, позволили, пусть не полностью, восстановить былой престиж специальностей, которые курирует кафедра. Во всяком случае, от выпускников никогда не было слышно жалоб на то, что они испытывают серьезные трудности с поиском работы. По их словам, системная подготовка позволяет им ориентироваться в сложных жизненных ситуациях.

Перед НИИ РТС вставали схожие проблемы. В 70–80-е годы прошлого столетия количество крупных договоров для нужд ВПК и объем финансирования были такими, что даже приходилось на ка-

федре и в НИИ сворачивать более мелкие работы, хотя они были достаточно успешными. Так были прекращены исследования в области ближней радиолокации, успешно выполнявшиеся под руководством А.С. Чумакова.

Тематика работ кафедры и НИИ РТС всегда включала исследование свойств УКВ при их распространении в случайно-неоднородных средах (тропосфера, неровная поверхность земли и моря) и вытекающие из этого особенности проектирования и функционирования РТС различного назначения. Если по второму направлению в связи с отсутствием солидной производственной базы все ограничивалось в основном теоретическими исследованиями, то техническая база для экспериментального исследования распространения радиоволн (РРВ) была поистине уникальной. Были созданы и оборудованы два радиофизических полигона: Коларовский, недалеко от Томска, для исследования РРВ над сушей и Охотский, на островах Сахалин и Итуруп, для исследований над морем на нескольких трассах протяженностью до 500 км.

В течение 1972–1990 годов на специально изготовленном и смонтированном оборудовании проводились измерения во время 40 рейсов научно-исследовательских судов Госкомгидромета в районах Тихого и Индийского океанов.



Часть оборудования Охотского полигона  
на островах Сахалин и Итуруп

При этом впервые в мировой практике проводился практически полный комплекс исследований, необходимых для создания модели распространения: это одновременные многолетние измерения в двух и даже трех диапазонах длин волн (метровые, дециметровые и сантиметровые) при одновременной реализации нескольких видов разнесенных передачи и приема (пространственный, частотный, временной, угловой, поляризационный). Параллельно всегда проводились радиометеорологические измерения: постоянные наземные стандартные в двух пунктах, ежесуточное аэрологическое зондирование, эпизодически привязное аэрологическое зондирование и измерения высотного

профиля индекса преломления радиорефрактометром, переносимым самолетом.

Результаты статистической обработки этих данных оказались ценным материалом, необходимым для проектирования различных РТС, и, в частности, позволили обосновать контуры статистической модели пространственно-частотно-временной передаточной функции радиоканала в случайно-неоднородной среде. Экспериментальных данных оказалось так много, что значительная их часть не обработана до сих пор.

Монографию «Статистическая структура поля УКВ за радиогоризонтом» (изд-во «Радио и связь», 1983 год) и «Радиоклиматический атлас Тихого океана» (изд-во ТУСУР, 2000 год), судя по всему, Г.С. Шарыгин считал своими главными научными достижениями.

Преобразования, происходившие в стране в течение двух десятилетий (конец прошлого и начало нынешнего века) сказались и на НИР. Объем ее финансирования существенно сократился и, как следствие, произошли утечка кадров и потеря Охотского радиофизического полигона. В последнее десятилетие положение стало немного выправляться, но возможностей возобновления исследований РРВ над морем пока не видно.

Последней НИР, выполнявшейся кафедрой и НИИ РТС по постановлению «директивных органов» еще Советского Союза, была «Моракор-РВО». Она выполнялась по договору между заказывающим управлением Министерства обороны и ТУСУРом с 1991 по 2005 годы. Причиной чрезмерной затяжки НИР было отсутствие финансирования со стороны Заказчика. Вот ведь действительно история!

Цель НИР заключалась в экспериментальном и теоретическом исследовании погрешностей измерения координат работающей радиолокационной станции разностно-дальномерным и пеленгационным методами, отыскании на базе полученных знаний алгоритмов обработки сигналов, минимизирующих трассовую составляющую погрешностей.

Для решения поставленной задачи был создан уникальный для своего времени радиофизический комплекс, состоящий из работающей радиолокационной станции и трех многоканальных приемных пунктов, разнесенных на местности до 20 км и охваченных системой единого времени, позволяющей синхронизировать их работу с точностью до единиц наносекунд. В каждом из пунктов регистрировались на цифровые носители принимаемые сигналы в виде их квадратурных составляющих, по которым затем восстанавливались фазовые, амплитудные, временные и поляризационные соотношения с временным дискретом 10 нс. Руководил разработкой комплекса и проведением полевых экспериментов заведующий лабораторией распространения радиоволн М.В. Крутиков. НИР была успешно сдана Заказчику. По результатам проведенных экспериментов шесть аспирантов кафедры

защитили кандидатские диссертации (В.Ю. Лебедев, А.С. Аникин, Н.А. Колядин, Е.П. Ворошилин, А.А. Гельцер, А.А. Мещеряков).

Результаты этих исследований послужили исходными данными для проектирования современных радиолокационных и радионавигационных систем.

По результатам многолетних исследований распространения радиоволн на наземных трассах в 2014 году была издана коллективная монография под общей редакцией В.П. Денисова «Пространственно-временные искажения сантиметровых радиосигналов на наземных трассах распространения и их влияние на точность пассивных систем местоопределения».

В настоящее время на кафедре и в НИИ намечается тенденция к развитию научных направлений, не связанных непосредственно с проведением экспериментов в области РРВ. В частности, получен ряд результатов по оптимизации вторичной обработки принимаемых радиолокационных сигналов, основанной на использовании фильтров Калмана. При этом как передающее, так и приемные устройства могут быть установлены на подвижных носителях различного характера: наземных, воздушных, космических. Необходимо упомянуть и весьма успешные работы по созданию систем автономной навигации космических аппаратов, необходимые ОАО «Информационные спутниковые системы», с которым у кафедры и НИИ РТС существует давнее, многостороннее и полезное сотрудничество. Работы указанных направлений развиваются по инициативе и под общим руководством профессора В.И. Тисленко.

Другое довольно новое направление — это исследование возможностей прогнозирования ожидаемых характеристик радиоволн при РРВ в неоднородных средах, основанное на численном решении параболического уравнения. Они проводятся под руководством профессора Ю.П. Акулиничева.

Благодаря заботам профессора Н.П. Красненко не угасают научные связи кафедры с СО РАН.

Несколько лет назад на кафедре возникла тенденция передачи молодым сотрудникам преподавания основополагающих дисциплин. Сейчас они уже поняли, что это надолго и будущее кафедры в их руках.

Здравый смысл позволяет надеяться, что системные специальности кафедры РТС и впредь будут занимать прочное место в ряду передовых отраслей техники настоящего и будущего, а выпускники будут пользоваться устойчивым спросом в наукоемких отраслях народного хозяйства, в научно-исследовательских учреждениях, органах управления.





Выпускники 2019 года на вручении дипломов  
с преподавателями кафедры

---

*Акулиничев Юрий Павлович – доктор технических наук, профессор, кафедра радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: aupa1941@mail.ru.*

*Денисов Вадим Прокопьевич – доктор технических наук, профессор, кафедра радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: dvp15@sibmail.com.*

### **60 Years of Chair RTS**

*An overview of the history of formation and development of the Department of Radio Engineering Systems of the Radio Engineering Faculty of Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics (TUSUR) is given. The features of the organization of the educational process and the main achievements in scientific research, which have always been carried out in close cooperation with the Research Institute of Radio Engineering Systems of TUSUR, are noted. The contribution of the staff of the department – the creators of this story – and the recognized leader Professor G.S. Sharygin.*

*Akulichev Yuri Pavlovich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: aupa1941@mail.ru.*

*Denisov Vadim Prokopyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: dup15@sibmail.com.*

**УДК 629.052.3**

**В.И. Тисленко, А.А. Савин**

**Исследования НИИ РТС в области разработки программно-алгоритмического обеспечения задач оценки местоположения и параметров движения источников радиоизлучения в электронных комплексах радиомониторинга**

*В докладе кратко представлено содержание результатов НИОКР, выполненных в НИИ РТС в период с 1980 по 2016 гг. по проблеме разработки алгоритмического обеспечения радиоэлектронных средств мониторинга морского, воздушного и космического базирования для решения функциональных задач оценки местоположения и параметров движения ИРИ.*

*Ключевые слова: фильтрация координат, пассивный режим целеуказания, оценки координат и параметров движения, фильтр Калмана.*

**Введение**

Современные радиоэлектронные системы являются основой наиболее эффективных средств военной техники и вооружений. В этой связи проблема разработки средств радиомониторинга источников радиоизлучения (ИРИ) — пассивных РЛС (ПРЛС), обеспечивающих получение оперативной и достоверной информации о местоположении и параметрах радиосигналов, в общем случае подвижных источников радиоизлучения, относится к разряду наиболее важных проблем при создании различных видов современного вооружения [1].

Проблемы совершенствования тактико-технических характеристик (ТТХ) современных ПРЛС в значительной степени связаны с повышением их точности, оперативности и дальности действия [1, 2]. В частности, корабельные ПРЛС должны решать задачу целеуказания (ЦУ) для противокорабельных ракетных комплексов на дальностях до 350–400 км, причем условия распространения радиоволн (РРВ) в энергетическом плане часто не являются препятствием тому. Концепция разработки современных систем управления и ЦУ ориентирована на создание интегрированных пассивных комплексов, использующих

дистанционно пилотируемые летательные аппараты (ДПЛА) и группировки космических аппаратов (КА) [1, 2]. Решение указанной проблемы находится в центре внимания ряда НИОКР, выполняемых в НИИ РТС с 70-х годов прошлого века.

Доминирующий фактор, ограничивающий повышение точности и оперативности ПРЛС, как правило, связан с влиянием случайных вариаций амплитуд, фаз, частоты и формы наблюдаемых сигналов в месте приема, которые обусловлены пространственно-частотно-временными искажениями структуры электромагнитного поля в месте приема, возникающими в канале РРВ. Существенно, в частности, для загоризонтных трасс, что статистические свойства вариаций амплитуд, разности фаз и момента времени прихода сигналов зависят от взаимной ориентации ДН антенн излучающей РЛС и ПРЛС. В итоге на входе вычислителей координат возникают случайные изменения характеристик сигналов и их информативных параметров (при вторичной обработке), которые в конечном счете эквивалентны вариациям соответствующих линий (поверхностей) положения в задачах пассивного местоопределения ИРИ. Задача оценки текущего местоположения и параметров движения ИРИ решается в однопозиционных (ЦУ-1) и многопозиционных (ЦУ-2, ЦУ-3) ПРЛС.

Теоретической основой решения задач статистического синтеза оптимальных и адаптивных фильтров, формирующих оценки неизвестных параметров, является современная марковская теория нелинейной фильтрации (МТНФ). По существу она во многом сформировалась к началу 80-х годов прошлого века на основе фундаментальных работ отечественных и зарубежных ученых Стратоновича Р.Л., Тихонова В.И., Kalman R.E., Bucy R. S., Kushner H.J.

## **1. Задача целеуказания с одним носителем (режим ЦУ-1)**

Известно, что формирование устойчивой оценки текущих координат и параметров движения ИРИ в режиме ЦУ-1 в ПРЛС возможно при условии выполнения носителем маневрирования на интервале обработки текущих оценок пеленга. В НИИ РТС был разработан и исследован адаптивный многоканальный фильтр.

Структура фильтра показана на рисунке 1.

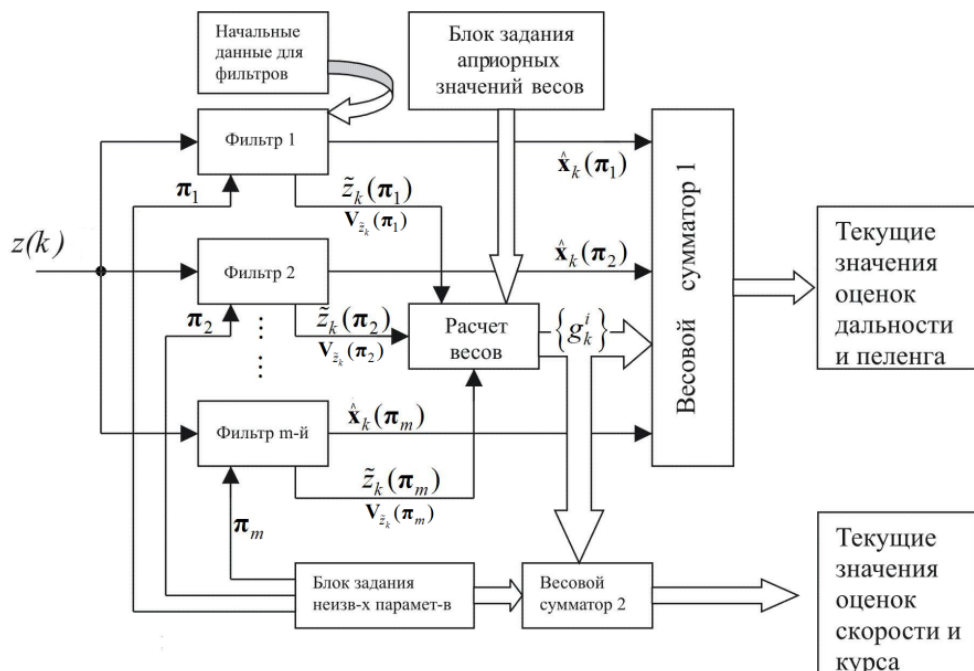


Рисунок 1 — Структура адаптивного фильтра для режима ЦУ-1

### 1.1. Задача ЦУ-1 на плоскости

Фильтр реализует алгоритм расширенного фильтра Калмана для задачи пассивного целеуказания на плоскости. Он состоит из  $m$  парциальных условно оптимальных фильтров, «настроенных» на заданное сочетание неизвестных скорости, курса движения ИРИ, которые полагаются постоянными, и начальной дальности. Носитель выполняет маневр с изменением курса движения на противоположный. С выхода каждого парциального фильтра в блок весового сумматора 1 поступают оценки вектора состояния и весовые коэффициенты, которые рекурсивно рассчитываются на основе невязок пеленга  $\tilde{z}_k(\pi_i)$  и ковариационной матрицы текущих оценок дальности и пеленга.

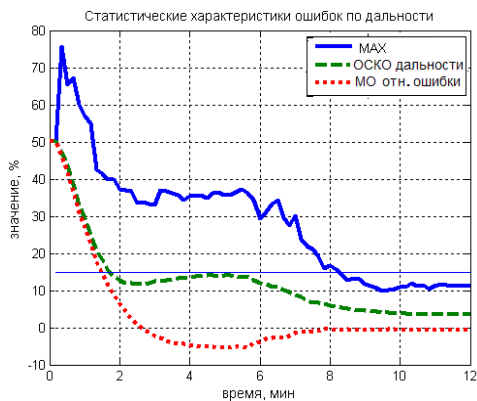
Экспериментально показано, что на загоризонтных трассах РРВ последовательность единичных оценок пеленга при приеме сигналов ИРИ со сканирующей диаграммой направленности антенны является случайно неоднородной по величине СКО. В каждом фильтре реализован адаптивный алгоритм обработки неравноточных текущих оценок пеленга. В частности, показано, что при 30 % засоренности последовательности единичных отсчетов пеленга аномальными ошибками с СКО  $2^\circ$  (при нормальных с СКО  $1^\circ$ ) и вероятности пропуска 0,4 фильтр обеспечивает величину относительной СКО (ОСКО) по дальности не более 13 % на дальности 250 км и времени обработки

12–15 мин. Скорость носителя 80 км/ч, скорость ИРИ 40 км/ч и темп поступления данных 10 с.

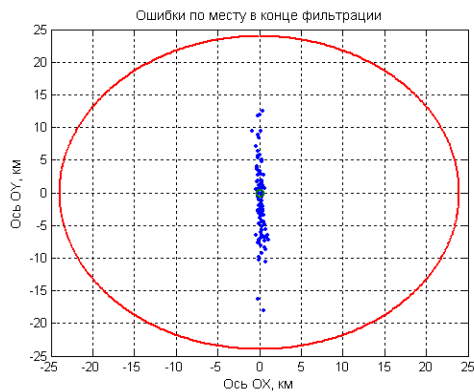
Разработан и исследован фазо-градиентный метод и алгоритм решения задачи ЦУ-1 для ПРЛС с комплексированием грубого угломера и относительно точного, но неоднозначного — выход 2-х фазовых детекторов. Применение комплексированного алгоритма обеспечивает значительное повышение точности оценок дальности. В частности, на дальности 250–300 км обеспечивается ОСКО дальности 6–8 %.

## 1.2. Задача ЦУ-1 в бортовой ПРЛС ДПЛА

В рамках НИОКР в начале 2000-х гг. были разработаны и исследованы алгоритм решения задачи ЦУ-1 для условий приема сигналов подвижного ИРИ на борту ДПЛА, оснащенного реальной системой GPS. Скорость его движения до 200 км/ч. На дальностях до 60 км носитель для решения задачи выполняет маневрирование в вертикальной плоскости с изменением высоты от 1 км до 1,5 км. На дальности 30 км при СКО пеленгования  $0,4^\circ$  (горизонтальный пеленг) и  $0,6^\circ$  (вертикальный пеленг) обеспечивается ОСКО дальности не более 5 % за время 7–9 мин; СКО модуля скорости ИРИ 7,2 км/ч и курса  $25^\circ$  в диапазонах скоростей цели  $V_c \in (8; 80)$  км/ч и курса  $\beta_c \in (-45^\circ; 45^\circ)$ . На дальности 60 км ОСКО дальности изменяется от 8% до 11% в зависимости от углового сектора значений курса цели. На больших дальностях показана необходимость измерений только горизонтального пеленга. На дальностях до 180 км ОСКО оценок дальности не превышает (5–7) % за время измерения 9–10 мин; ОСКО модуля скорости ИРИ 8–10 %, курса до  $25^\circ$ – $30^\circ$ . Расположение угломера в головной части ДПЛА накладывает ограничение на курс движения носителя и учитывается при формировании его траектории. Движение ИРИ с курсами, при которых велика радиальная (по линии визирования) компонента скорости, приводит к появлению систематической погрешности по дальности. На рисунке 2,а показана зависимость ОСКО оценки дальности и относительного математического ожидания ошибки от времени; выполнено статистическое усреднение по курсу цели в секторе  $\beta_c \in (135^\circ; 225^\circ)$  и по скорости  $V_c \in (8; 80)$  км/ч; темп поступления данных  $\Delta t = 10$  с.



*a*



*б*

Рисунок 2 — Статистические характеристики точности ошибок по дальности (а); поле рассеяния линейных ошибок оценок дальности (б)

## 2. Задачи пассивного целеуказания в многопозиционных ПРЛС

Синтез и исследование точности алгоритмов вторичной обработки для ПРЛС в режимах ЦУ-2, ЦУ-3 в условиях приема сигналов на морских трассах дальнего тропосферного распространения (ДТР) УКВ выполнены в НИИ РТС в период 1995–2005 гг. Получены структуры адаптивных (к наличию засоренности первичных данных аномальными ошибками и пропуском) алгоритмов в угломерных, разностно-дальномерных и угломерно-разностно-дальномерных системах как стационарных, так и подвижных ПРЛС и, в частности, при решении задачи ЦУ по скоростной цели (самолеты дальнего радиолокационного обнаружения (ДРЛО)). Показано, что простая режекция грубых единичных отсчетов в условиях дефицита данных приводит к снижению точности оценок координат ИРИ и параметров движения. Квазиоптимальные оценки координат и параметров движения ИРИ реализуются в расширенном фильтре Калмана.

На рисунке 3 показаны зависимости ОСКО дальности  $\sigma_{r(k)}$  от времени в условиях измерения на подвижном носителе ПРЛС текущих пеленгов на подвижный ИРИ. Темп поступления данных  $\Delta t = 10$  с,  $\sigma_\alpha = 1^\circ$ ; параметры движения цели и угломеров:  $V_c = 40$  км/ч;  $\beta_c = 180^\circ$ ;  $V_{н1} = V_{н2} = 80$  км/ч;  $\beta_{н1} = 0^\circ$ ;  $\beta_{н2} = 180^\circ$  (встречное движение носителей и база уменьшаются) и  $\beta_{н1} = \beta_{н2} = 0^\circ$  (движение с постоянной базой). Процесс сходимости оценок дальности, как это видно на рисунке 3,а, не нарушается и при сближении носителей на 4-й минуте база  $d \approx 19$  км). Сходимость оценок

при оптимальной обработке обусловлена наличием информации о дальности в скорости изменения пеленгов.

Разработаны алгоритмы оценки фактической погрешности фильтрации координат ИРИ в реальном времени работы алгоритма вторичной обработки.

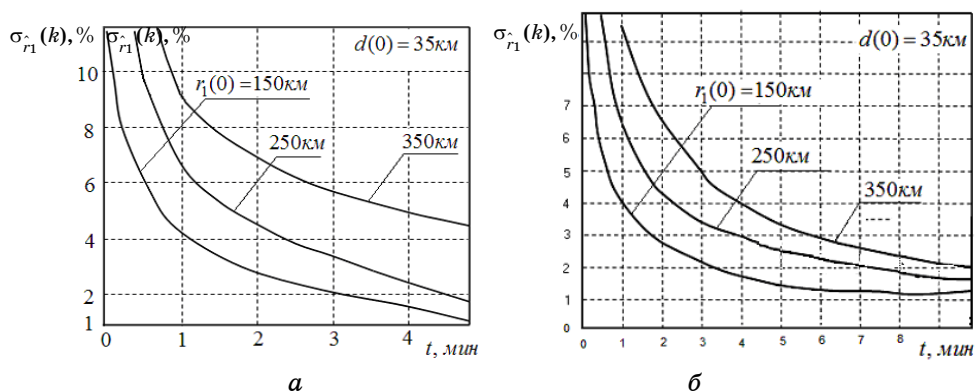


Рисунок 3 — Переходный процесс по ОСКО дальности:

*a* — встречное движение угломеров; *b* — движение в одном направлении;  
база  $d = \text{const}$ ;  $\beta_{н1} = \beta_{н2} = 0^\circ$

Выполнены синтез и исследование адаптивного алгоритма решения задачи в режиме ЦУ-2 для бортовых ПРЛС, размещенных на ДПЛА, в условиях *наличия неизвестных систематических ошибок пеленгования*. Предложены алгоритмы обработки с управлением наблюдениями. Показано, что выполнение носителями ПРЛС маневрирования с изменением курса *обеспечивает наблюдаемость задачи* (оценку неизвестных и разных систематических ошибок пеленгования) и, соответственно, сходимость оценок текущих координат ИРИ.

### 3. Задачи пассивного целеуказания

#### в бортовых космических системах радиомониторинга

Решение задач радиомониторинга наземных ИРИ с борта КА осложняется необходимостью разработки алгоритмов юстировки фактического направления электрических осей диаграмм направленности (ДН) крупно габаритных бортовых антенн, а также калибровки формы их ДН, реальных электрических длин базовых расстояний и ориентации базы при использовании фазовых методов.

В рамках НИОКР, выполненных в НИИ РТС, для условий расположения КА на геостационарной и высокой эллиптической орбитах разработаны и исследованы:

– квазиоптимальный алгоритм юстировки углового положения электрической оси ДН антенны при ее известной форме по сигналам

3-х наземных КЮС и выполнены исследования влияния собственного шума, мультипликативной помехи, ошибок калибровки приемных трактов и погрешности системы управления антенной на СКО оценок углового положения максимума ДН при линейном и круговом сканировании антенны;

– квазиоптимальный алгоритм оценки априорно неизвестной формы пространственной ДН антенны при одновременном приеме сигналов 3-х наземных КЮС в интервале углов, содержащем два первых боковых лепестка; при линейном и спиральном видах сканирования антенны исследованы переходные процессы в фильтре по СКО оценки формы ДН с учетом остаточной погрешности калибровки амплитудных характеристик приемного тракта, уровня шума и характеристик мультипликативной помехи, обусловленной вариациями уровня сигнала на трассе РРВ; алгоритм выгодно отличается от традиционной процедуры в части требования постоянства угловой скорости и, как следствие, приводит к меньшим временным затратам;

– алгоритм юстировки величины и направления вектора электрической базы двух пространственно-разнесенных антенн на борту КА по сигналам наземных КЮС; определены условия реализации алгоритма и получено соотношение для дисперсионной матрицы погрешностей оценок составляющих вектора базы;

– квазиоптимальный алгоритм формирования панорамной моноимпульсной оценки координат ИРИ (режим ЦУ-1) на основе совместной обработки уровней сигналов на выходе приемного тракта, подключенного к  $n$  — лучевой антенне ( $n = 3-7$ ). Исследованы переходные процессы по СКО оценок широты и долготы ИРИ, а также максимальные ошибки в рабочем секторе углов, включающем первые боковые лепестки ДН приемных лучей. Результаты получены с учетом инструментальных ошибок, влияния шума и вариаций уровня сигнала (мультипликативная помеха);

– квазиоптимальный адаптивный алгоритм совместной оценки координат ИРИ и параметров его движения на основе обработки разностей моментов прихода сигналов в 3-позиционной разностно-дальномерной системе при наличии систематической погрешности. Исследованы переходные процессы в фильтре по СКО оценок координат при заданной геометрической конфигурации системы и различных величинах погрешностей измерения разности моментов времени прихода;

– квазиоптимальный алгоритм совместной фильтрации координат ИРИ и частоты радиосигнала в многопозиционной космической ПРЛС с измерениями частот принятых сигналов; исследованы переходные процессы в фильтре по СКО оценок координат при различных погрешностях измерения частоты радиосигналов на борту КА;



– оптимальный динамический алгоритм оценки координат ИРИ в системе, использующей угловой датчик фазового типа с размерами базовых расстояний, при которых не реализуются традиционные методы разрешения фазовой неоднозначности. Предложен и исследован новый алгоритм с управлением наблюдениями путем вращения антенной системы, который при совместной обработке сигналов с выходов квадратурных фазовых детекторов обеспечивает формирование однозначных и точных байесовских оценок координат ИРИ. СКО оценок местоположения ИРИ не превышает 5 км при заданной конфигурации баз антенной системы.

### Заключение

Результаты исследований НИИ РТС по проблеме повышения оперативности и точности оценок местоположения и параметров движения ИРИ в условиях приема радиосигналов наземными, воздушными и космическими радиоэлектронными комплексами мониторинга необходимы на этапе сравнительного анализа вариантов построения ПРЛС при их системотехническом проектировании. Исследования по указанной проблеме опубликованы в [3–23].

### Список использованной литературы

1. Интегрированные системы управления ракетным оружием корабля / Г.А. Коржавин, В.А. Никольцев, Ю.Ф. Подоплекин [и др.] // Проблемы интеллектуального и военного транспорта / под ред. Г.В. Анцева ; АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс». СПб. : Логос, 2005. Вып. № 6. С. 294–300.
2. Подход к проблеме формирования полезной нагрузки разведывательных комплексов ВМФ с ДПЛА / Г.В. Анцев, А.Д. Барабанов, В.А. Сарычев [и др.] // Проблемы интеллектуального и военного транспорта / под ред. Г.В. Анцева ; АО «Научно-производственное предприятие «Радар ммс». СПб. : Логос, 2005. С. 129–130.
3. Исследования по анализу и синтезу измерительных РТС в условиях загоризонтного приема УКВ : отчет по г/б НИР по проблеме №0.18.025. Гос. рег. № 76082616. Томск: ТИАСУР, 1976. 562 с.
4. Dynamic coordinates filtration and tracking of moving illuminators using passive observation systems: theory and experiment. Target Tracking and Sensor Data Fusion for Military Observation Systems / V.I. Tislenko, G.S. Sharygin, V.D. Reginsky, V.P. Ivanov // AC/323 (SET-059)TP/46. Budapest, Hungary, 13–15 October, 2003. NATO RTO-MP-SET-059, 2004. CD-ROM. P. 37-1 – 37-12.
5. Tislenko V.I., Kurakov V.A. // Proc. of the 1994 Progress in Electromagnetics Research Symposium. European Space Agency,

Noordwijk, the Netherlands, July 11–15, 1994. Rluwer Academic Publishers, 1994. (CD-ROM).

6. Tislenko V.I., Kurakov V.A. Passive Tracking of the moving object by UHF Beyond-The Horizon Three Position Bearing System // Proceedings of the International Conference «RADAR 97». Edinburg, UK, October 14–16. Institute of Electrical Engineering. 1997. P. 310–313.

7. Tislenko V.I., Kurakov V.A. Accyrasy of the Kalman Filter Target Tracing in Two Position Passive System // PIERS: Progress in Electromagnetics Research Symposium. Abstracts. Innsbruck the Austria. July, 1996.

8. Tislenko V.I., Kurakov V.A. Comparative analysis of two algorithms of the Kalman filter target tracking in two position passive bearing system // Proc. of the Intern. Conf. «RADAR 97». Edinburg, UK, October 14–16. Institute of Electrical Engineering. 1997.

9. Тисленко В.И., Кураков В.А. Сравнительный анализ фильтров сопровождения в двухпозиционной пассивной угломерной системе определения координат // Доклады ТУСУР. Т. 4. Радиотехнические системы и распространение радиоволн : сб. тр. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2000. С. 102–111.

10. Тисленко В.И., Савин А.А. Оптимальная фильтрация координат и параметров движения излучателя бортовым подвижным угломером при наличии ограничений на его траекторию // Проблемы интеллектуального и военного транспорта / под ред. Г.В. Анцева ; АО «НПП «Радар ммс». СПб. : Логос, 2005. № 6. С. 362–366.

11. Тисленко В.И., Савин А.А. Адаптивный алгоритм фильтрации координат в канале углового сопровождения пассивной системы самонаведения при наличии систематической ошибки пеленгования // Проблемы интеллектуального и военного транспорта / под ред. Г.В. Анцева ; АО «НПП «Радар ммс». СПб. : Логос, 2005. № 6. С. 357–361.

12. Савин А.А., Тисленко В.И. Сравнительный анализ алгоритмов определения времени прихода импульсного сигнала при многолучевом распространении радиоволн // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2006. № 6. С. 62–66.

13. Савин А.А., Тисленко В.И. Оптимальная фильтрация координат наземного источника излучения в однопозиционной космической системе при неоднозначных фазовых измерениях // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях : сб. докл. юбилейной НТК, посвящ. 60-летию ОАО «РТИ им. акад. А.Л. Минца» и фак. радиоэлектроники летательных аппаратов. Ч. 2. М. : МАИ, 2006. С. 70–81.

14. Тисленко В.И., Савин А.А. Алгоритм оценки местоположения наземного источника радиоизлучения в космической системе

с измерениями частоты сигналов // Инновации в радиотехнических информационно-телекоммуникационных технологиях : сб. докл. юбилейной НТК, посвящ. 60-летию АО «РТИ им. акад. А.Л. Минца» и фак. радиоэлектроники летательных аппаратов. Ч. 2. М. : МАИ, 2006. С. 81–92.

15. Тисленко В.И., Савин А.А. Задача пассивного определения координат и параметров движения излучателя при наличии ограничений на траекторию движения угломера и систематических ошибок измерений // Электронные средства и системы управления : докл. междунар. НТК. В 2-х ч. Ч. 1. Томск : ИОА СО РАН, 2005. С. 37–39.

16. Савин А.А., Тисленко В.И. Альтернатива многобазовому фазовому пеленгатору в радиотехнических системах с динамической обработкой сигналов // Обмен опытом в области создания сверхширокополосных РЭС : сб. докл. НТК, ЦКБА. Омск : ФГУП «ЦКБА». 2006. С. 45–50.

17. Тисленко В.И., Савин А.А. Оптимальная фильтрация координат и параметров движения излучателя бортовым подвижным угломером при наличии ограничений на его траекторию // Научная сессия ТУСУР-2005 : материалы Всерос. НТК студентов, аспирантов и молодых ученых. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2005. С. 43–46.

18. Тисленко В.И., Савин А.А. Оценка местоположения наземного источника радиоизлучения в космической системе с измерениями частоты сигналов // Радиотехника. 2006. № 11. С. 24–30.

19. Тисленко В.И., Савин А.А. Амплитудная юстировка антенны космического аппарата // Сб. материалов XI Междунар. науч. конф. «Решетневские чтения». Красноярск : СибГУ, 2007. С. 66.

20. Тисленко В.И., Савин А.А. Фазовая юстировка антенн космического аппарата // Сб. материалов XI Междунар. науч. конф. «Решетневские чтения». Красноярск : СибГУ, 2007. С. 64–65.

21. Тисленко В.И., Савин А.А. Радиально-скоростной метод определения координат наземных источников излучения в радиотехнических системах космического базирования // Тр. ФГУП РНИИ КП. Тез. докл. НТК ФГУП «РНИИ КП», посвящ. 60-летию предприятия. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. С. 373–374.

22. Тисленко В.И., Савин А.А. Квазиоптимальная фильтрация координат и параметров движения наземного источника радиоизлучения в космической системе с измерениями времени прихода сигналов // Тр. ФГУП РНИИ КП. Тез. докл. НТК ФГУП «РНИИ КП» посвящ. 60-летию предприятия. М. : ФИЗМАТЛИТ, 2007. С. 375–376.

23. Тисленко В.И., Савин А.А. Динамический алгоритм разрешения неоднозначности в фазовом угломере космической системы определения местоположения наземного источника радиоизлучения //

Доклады ТУСУР. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. № 6. С. 96–102.

---

*Тисленко Владимир Ильич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: wolar1491@yandex.ru.*

*Савин Александр Александрович – доктор технических наук, инженер ООО «НПК ТАИР», 634041, г. Томск, пр. Кирова, 51 А, стр. 5, оф. 600, e-mail: saasavin@mail.ru.*

**Research Institute RTS in the Development of Ssoftware  
and Algorithmic Support for the Tasks of Assessing the Location  
and Parameters of the Movement of Radiation Sources  
in Electronic Radio Monitoring Systems**

*The report briefly presents the content of the R&D results carried out at the RTS Research Institute in the period from 1980 to 2016. on the problem of developing algorithmic support for radio-electronic monitoring equipment for sea, air and space-based monitoring for solving functional problems of assessing the location and movement parameters of IRI.*

**Keywords:** *coordinate filtering, passive target designation mode, estimates of coordinates and motion parameters, Kalman filter.*

*Tislenko Vladimir Ilyich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: wolar1491@yandex.ru.*

*Savin Aleksandr Aleksandrovich – Doctor of Technical Sciences, engineer of ООО NPK TAIR, 634041, Tomsk, Kirova Ave., 51 A, bldg. 5, office. 600, e-mail: saasavin@mail.ru.*

В.И. Слущкий

## 20 ЛЕТ ВМЕСТЕ! (ВОСПОМИНАНИЯ)

*Исторический очерк взаимодействия НИИ РТС ТУСУР и группы «Радио» кафедры метеорологии и климатологии Национального исследовательского Томского государственного университета (ТГУ) при выполнении комплексных работ по радиометеорологии.*

*Ключевые слова:* радиометеорология, сопряженные измерения, радиоклиматические карты, Черное море, Охотское море, Тихий океан.

В одном из писем 5-летней давности Герман Сергеевич Шарыгин сообщал мне о том, что предполагается устроить праздник, посвященный юбилею коллектива, планируется также издать книгу воспоминаний. *«Соберем всех ветеранов, кого сможем и кто сможет. Чем черт не шутит — вдруг и Вы захотите посетить Сибирь — все-таки много у Вас с ней было связано. Томск сильно изменился — многого и не узнаете. С большим удовольствием прочитал Ваш очерк. Конечно, мы его опубликуем в планируемой книге».*

Прошло сравнительно немного времени, Г.С. Шарыгин умер, его ученики и соратники преобразовали формат встречи в ежегодные **«Шарыгинские чтения»**, такова жизнь...

На первых **«Шарыгинских чтениях»** в двух фундаментальных докладах выполнен детальный анализ научной, педагогической и организационной деятельности Г.С. Шарыгина.

Но на мой взгляд, содержание этих материалов напрямую не отвечает на один **«географический»** вопрос: Почему для решения островажных практических задач Военно-морского флота и теоретического исследования распространения радиоволн над обширными пространствами водных поверхностей морей и океанов высокопоставленными Заказчиками в лице ВМФ (умеющих считать расходы) избран научный коллектив, база расположения которого находится в центре евроазиатского материка вдали от указанных объектов. Ответ, по моему, однозначен — **молодой коллектив, возглавляемый талантливым ученым и организатором, внушает реальные надежды на успех.**

Второй вопрос возникает с проблемой метеорологического обеспечения эксперимента, а по мере приближения к решению задачи — с проблемой климатической оценки среды распространения радиоволн. Эта проблема была решена на уровне Руководителя работы и его сотрудников, причем только на основании природного «чутья» и стратегического мышления.

Создавать метеорологическую ячейку внутри лаборатории (а затем НИИ) дело хлопотное, требующее набора большого профессионального штата, выделения производственных площадей (и так тесно), да и вообще это не «царское» дело.... Следовательно, надо искать субподрядчика, а где? Есть серьезные научные коллективы, причем расположены они вблизи объектов исследования (Одеса, Ленинград, Владивосток), но выбор пал на коллектив кафедры метеорологии и климатологии геолого-географического факультета Томского государственного университета. В чем парадокс? Научное направление кафедры — горная метеорология и климат Западной Сибири! Слово Радио звучало только в одном (моем) курсе «Аэрология и радиометеорология», причем в разделе радиометеорология акцент был на применении радиолокации для измерения метеорологических величин, а влияние атмосферы на распространение радиоволн рассматривалось «вскользь».

В 1970 г. зав. лабораторией радиотехнических систем ТИАСУРА А.В. Ерохин пришел к нам на кафедру и предложил сотрудничество на хоздоговорной основе по тематике, связанной с распространением ультракоротких волн (УКВ). С этого разговора все и началось....

Вначале небольшой и неопытный коллектив (В.И. Слуцкий, Л.Л. Тихонова, Н.М. Алехина, А.Г. Сморкалова) попробовал свои силы на теме «Радиоклимат Каспийского моря» (стоимость договора 10 тысяч рублей!). Работу выполнили, отчет по работе одобрили, некоторые результаты ее были доложены на Всесоюзном совещании по радиометеорологии во Фрунзе. Нас заметили. В дальнейшем и объемы работ, и их масштабы быстро росли, в отдельные годы штат группы достигал 20–25 человек. Руководство факультета и университета поддерживало эту тематику. Например, для работы радиометеорологов было выделено помещение площадью более 60 кв. м. Естественно, кроме престижа университет получал 20 % стоимости договора (а это уже сотни тысяч рублей!).

В течение 20 лет Томский университет (в лице нашей кафедры) был основным субподрядчиком Томского института (а затем университета) автоматизированных систем управления и радиоэлектроники при выполнении важнейшей тематики, утверждаемой специальными Постановлениями Правительства и контролируемой Министерством обороны СССР. Основная цель исследований — разработка физико-статистической модели радиотропосферы, т.е. среды распространения УКВ — фактора, оказывающего существенное влияние на технические характеристики радиолокационных систем и систем радиосвязи, особенно над большими водными пространствами. Работы велись по двум направлениям:

– метеорологическое обеспечение радиотехнического эксперимента;

– обобщение многолетних аэрологических и метеорологических наблюдений для создания радиоклиматических Атласов.

Экспедиционные работы, кроме стандартных метеорологических наблюдений на передающем и приемном пунктах радиотрассы, включали целый комплекс специальных измерений, причем с акцентом на вертикальные профили: градиентные на высотных мачтах и с помощью привязных аэростатов, вертолетное и самолетное зондирование с применением рефрактометров.

Стандартной аппаратуры для специальных измерений не было, часто приборы приходилось разрабатывать самостоятельно. Измерительная аппаратура постоянно совершенствовалась. Например, в мастерских Центральной аэрологической обсерватории изготовлено специальное оборудование для дистанционных градиентных измерений. В 1991 г. по нашему заказу в мастерских ДОСААФ был спроектирован, изготовлен и испытан малогабаритный беспилотник, оборудованный метеорологической аппаратурой. С его помощью планировалось производить вертикальное зондирование атмосферы над открытой поверхностью моря, но, увы, в стране началась перестройка...

Решение поставленных задач, связанных с большими массивами метеорологических и аэрологических измерений немислимо без вычислительной техники. Основным вычислительным инструментом на кафедре в начале 60-х годов были конторские счеты, логарифмические линейки и довольно смешные механические машинки — арифмометры «Феликс». В 1964–65 гг. появились простые и инженерные, а затем и программируемые микрокалькуляторы (ПМК). Только в начале 70-х годов кафедра начала использовать ЭВМ вычислительного центра университета (БЭСМ-4, М-220, ЕС-1020, ЕС-1022, БЭСМ-6). Это была сложная процедура, так как исходная информация хранилась на бумажных носителях в виде таблиц, изредка на перфокартах. Обстановка несколько упростилась, когда исходный материал из Обнинска (ВНИИГМИ Мировой Центр Данных) мы получали на магнитных лентах.

Научные сотрудники и инженеры принимали участие в учебном процессе, руководили практикой, курсовыми и дипломными проектами. Студенты охотно сотрудничали с группой радио, им нравилась практическая значимость работ. Немаловажна и другая причина — занимаясь учебой, они одновременно подрабатывали (0,5 ставки техника), а в экспедицию допускались только студенты с развитым чувством ответственности. Здесь выросли Ленинские стипендиаты Маргарита Перфильева (М. Решетько, доцент ТПУ) и Любовь Серебрянник (Кижнер, доцент ТГУ), будущие кандидаты наук Наташа Серебрянник (сотрудник ЦАО) и Борис Плюхин (лауреат Ленинского комсомола Забайкалья). Подчеркну и еще один социальный нюанс: в результате совместных экспедиций создавались устойчивые семейные пары.

С благодарностью утверждаю, что в трудных условиях экспедиций наши «метеорологини» всегда могли рассчитывать на физическую и, что немаловажно, техническую помощь благородных «тусуровцев».

В целом сложились дружественные творческие отношения между радиотехниками (может, точнее, радиофизиками) и метеорологами. В этом заслуга прежде всего мудрого научного руководителя работ Германа Сергеевича Шарыгина.

Работы по условиям распространения УКВ над водной поверхностью проводились несколькими организациями. В 1980 г. по настоянию Заказчика произошло разделение районов исследования:

– Атлантический океан (полигон Черное море) — институт радиоэлектроники АН УССР с Ленинградским гидрометеорологическим институтом;

– Тихий океан (полигон Охотское море) — ТИАСУР с ТГУ. Для страховки заказчик часто дублировал некоторые пункты технических заданий, поэтому наряду с творческими контактами имели место и элементы здоровой конкуренции.

Защиты заключительных отчетов для исполнителей всегда были серьезным экзаменом, т.к. все происходило на заседании Межведомственной комиссии, которая включала профессионалов высшей категории (не менее 13 человек). После докладов, вопросов, дискуссии составлялся акт приема.

И одно эмоционально приятное воспоминание — защита обычно проходила в Александровском дворце в Пушкине (вблизи знаменитого Пушкинского лицея!), сейчас это музей.

Результаты черноморского периода — 17 экспедиций в районы Туапсе и Солнечной долины (вблизи Феодосии). В тот же период проводили исследования метеорологических условий распространения УКВ на коротких трассах над сушей в Томской области (4 экспедиции в районах Кандинки и Тимирязево). Подготовлено 42 научно-технических отчета, получено 9 актов о внедрении, выполнено 53 дипломных и 350 курсовых работ.

Второй период — тихоокеанский, был значительно сложнее: одно дело организовать экспедицию на субтропическое Черноморское побережье (теплое море, рядом виноградные плантации), другое — в суровых условиях Охотского моря и Тихого океана. Здесь, правда, жизнь скрашивалась лососевой рыбой и красной икрой (сибирские студенты, да и более взрослое поколение узнали, что красную икру можно есть столовой ложкой!).

На восточном берегу Сахалина недалеко от поселка Взморье на Охотском радиофизическом полигоне (база ТИАСУРа) был создан основной аэрометеорологический измерительный комплекс (использовали старый японский пирс).



Сугубо сухопутным сибирским людям пришлось осваиваться и в сложных условиях работы на корабле, но они успешно проводили аэрологические и рефрактометрические измерения. Особенно тяжело производить запуск радиозонда при сильном ветре!

Экспедиционные рейсы по Тихому океану проводились на гидрографических судах ВМФ «Башкирия», «Абхазия» и научно-исследовательском судне гидрометеослужбы «Прибой».

Работа в экспедициях всегда содержит элемент опасности и требует от участников соблюдения правил техники безопасности. Газодобывание, работа на судах, ночные градиентные наблюдения под проливным дождем с ураганным ветром при тайфунах, самолетное зондирование, да и просто купание в море вдали от цивилизации — занятия повышенной опасности. К чести всех сотрудников и студентов все они остались живы и здоровы, не было зафиксировано ни одного происшествия (правда, только через многие годы в минуты откровения при встречах я узнавал, что «случаи» все-таки были).

Сотрудники группы радио регулярно участвовали во всесоюзных и региональных конференциях, а в последние годы вышли с докладами на международные форумы. К безусловным достижениям следует отнести подготовку материалов, составление и редактирование карт метеорологической части Радиоклиматического тропосферного атласа Тихого океана.

Авторы обзоров, характеризующих деятельность Г.С. Шарыгина, утверждают, что это его **главная работа**. Шарыгин Г.С. — главный редактор, в аннотации издания указано: *«Для составления карт использованы доступные материалы Центров данных и опубликованные радиометеорологические и радиофизические данные летних экспериментальных исследований, выполненных при активном участии сотрудников Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники и Томского государственного университета на полигонах и специально оборудованных научно-исследовательских судах в акватории Тихого океана»*. Следует заметить, что Герман Сергеевич, по моим наблюдениям, всегда щепетильно и справедливо относился к указанию соавторов различного рода работ.

Шарыгин Г.С. высоко оценивал наше сотрудничество, в частности, это проявилось в том, что по его инициативе нашему коллективу в юбилейные дни была вручена Почетная Грамота Руководства ТУСУРа с таким текстом **«Ветерану научных исследований в области радиолокации и распространения радиоволн в знак признания личных заслуг»**.

В 1992 г. деятельность группы «Радио» прекратилась... Перестройка всей России.

P.S. Ради истины следует признать, что был между нами один конфликт. Общеизвестно, что Г.С. Шарыгин талантливый преподаватель и воспитатель. Он стремился привить студентам любовь к профессии. Здесь особо проявился его оптимистический лозунг «Свеча до неба!».

Из материалов Википедии:

*«Ежегодно, начиная с 1989 года, 7 мая студенты устраивают праздничное шествие по улицам Томска. Первое праздничное шествие было организовано группой студентов при поддержке декана РТФ ТУСУР Г.С. Шарыгина и ректора ТИАСУР И.Н. Пустынского».*

Мы в группе «Радио» 7 мая отмечаем **День Радиометеорологии!**



Основание — 7 мая 1895 г. А.С. Попов демонстрировал **грозоотметчик** — первый в мире **радиометеорологический прибор!**

Прошло еще 20 лет, а бывшие сотрудники группы «Радио» регулярно встречаются и вспоминают романтику Тех Дней. 7 мая мы мысленно провозглашаем тост, внутренне улыбаясь, за день Радиометеорологии, ведь на первой презентации Александр Степанович Попов демонстрировал **наш прибор**, измеряющий наличие явно метеорологического явления.

---

*Слуцкий Владимир Израильевич – кандидат географических наук, доцент, Почетный работник гидрометеослужбы России, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации.*

*Израиль. Иерусалим. vladislu@mail.ru.*

### **20 Years Together! (Memories)**

*Historical sketch of the interaction between the Research Institute RTS TUSUR and the "Radio" group of the Department of Meteorology and Climatology of the National Research Tomsk State University (TSU) in the implementation of complex work on radio meteorology.*

**Key words:** *radio meteorology, coupled measurements, radioclimatic maps, Black Sea, Sea of Okhotsk, Pacific ocean.*

*Slutskiy Vladimir Izraevich – Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor, Honorary Worker of the Hydrometeorological Service of Russia, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation.*

*Israel. Jerusalem. vladislu@mail.ru.*

# Секция 1. РАДИОФИЗИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

---

УДК 537.877

В.Ю. Лебедев, Ф.Н. Захаров, К.Е. Мухомор, В.А. Филимонов

## ОЦЕНКА ОСЛАБЛЕНИЯ СИГНАЛА ПРИ ОТРАЖЕНИИ ОТ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

*В статье проводится оценка ослабления мощности сигнала при зеркальном отражении от разных типов подстилающей поверхности. Показано, что снежный покров при скользящем падении может достаточно сильно ослаблять сигнал.*

*Ключевые слова:* подстилающая поверхность, радиоволны, горизонтальная поляризация, вертикальная поляризация.

На уровень отражённых от подстилающей поверхности радиоволн влияют следующие параметры: угол падения, степень шероховатости поверхности (зеркальное или диффузное рассеяние), изменение поляризации сигнала при отражении, поглощение энергии радиоволн поверхностью земли. Степень поглощения зависит от электрических параметров подстилающей поверхности.

Электрические параметры подстилающей поверхности влияют на комплексный коэффициент отражения радиоволны от этой поверхности, который определяется выражением для вертикально поляризованной (ВП) радиоволны [1]

$$R_v = \frac{\varepsilon_k \sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_k - \cos^2 \gamma}}{\varepsilon_k \sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_k - \cos^2 \gamma}}, \quad (1)$$

и для горизонтально поляризованной (ГП) радиоволны

$$R_g = \frac{\sin \gamma - \sqrt{\varepsilon_k - \cos^2 \gamma}}{\sin \gamma + \sqrt{\varepsilon_k - \cos^2 \gamma}}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_k = \varepsilon - j60\lambda\sigma$  — относительная комплексная диэлектрическая проницаемость среды;  $\gamma$  — угол места НКА;  $\varepsilon$  — диэлектрическая проницаемость почвы;  $\sigma$  — проводимость почвы, См/м.

Результаты расчёта модуля и фазы коэффициента отражения от различных типов подстилающей поверхности при ВП- и ГП-сигнала приведены в таблицах 1 и 2 соответственно.

Таблица 1 — Зависимость коэффициента зеркального отражения от типа подстилающей поверхности при угле места 10 градусов. Вертикальная поляризация

Тип поверхности	Влажная почва	Сухая почва	Мерзлая почва	Лед	Снег
Частота, МГц	1200				
Модуль коэффициента отражения	0,28	0,45	0,46	0,50	0,43
Фаза коэффициента отражения, град	-100,2	-170,8	-179,7	-180	180
Частота, МГц	1600				
Модуль коэффициента отражения	0,26	0,45	0,46	0,50	0,43
Фаза коэффициента отражения, град	-113,4	-173,2	-179,8	-180	180

Таблица 2 — Зависимость коэффициента зеркального отражения от типа подстилающей поверхности при угле места 10 градусов. Горизонтальная поляризация

Тип поверхности	Влажная почва	Сухая почва	Мерзлая почва	Лед	Снег
Частота, МГц	1200				
Модуль коэффициента отражения	0,96	0,86	0,85	0,80	0,50
Фаза коэффициента отражения, град	178,3	177,5	179,9	180,0	180,0
Частота, МГц	1600				
Модуль коэффициента отражения	0,95	0,86	0,85	0,80	0,50
Фаза коэффициента отражения, град	178,3	178,0	179,9	180	180

Из данных таблиц видно, что модуль коэффициента отражения сильно зависит от типа поляризации. В этом случае, если на поверхность земли падал сигнал с круговой поляризацией, то после отражения сигнал будет иметь эллиптическую поляризацию. Тогда ослабления за счёт деполяризации сигнала можно рассчитать по формуле [2]

$$L_p = -10 \lg \left( \frac{1}{2} + \frac{4R_S R_A + (1 - R_S^2)(1 - R_A^2) \cos(2\Delta\varphi)}{2(1 + R_S^2)(1 + R_A^2)} \right), \quad (3)$$

где  $R_S$  — коэффициент эллиптичности падающего сигнала;  $R_A$  — коэффициент эллиптичности отражённого сигнала;  $\Delta\varphi = \varphi_S - \varphi_A$  — угол между главными осями поляризационного эллипса спутниковой и приёмной антенн.

Коэффициент эллиптичности определяется выражением

$$R = \frac{E_{\min}}{E_{\max}}, \quad (4)$$

где  $E_{\min}$  и  $E_{\max}$  — длины малой и большой полуосей поляризационного эллипса.

Так как излученный сигнал имеет круговую поляризацию, то коэффициент эллиптичности  $R_S$  равен 1. Следовательно, формула (3) принимает вид

$$L_p = -10 \lg \left( \frac{1}{2} + \frac{R_A}{1 + R_A^2} \right). \quad (5)$$

Коэффициент эллиптичности отражённого сигнала можно вычислить по соотношению модулей коэффициента отражения на ВП и ГП:

$$R_A = \frac{|R_v|}{|R_g|}. \quad (6)$$

Таким образом, потери мощности сигнала при отражении от подстилающей поверхности за счёт деполяризации сигнала определяются выражением

$$L_p = -10 \lg \left( \frac{1}{2} + \frac{|R_g| |R_v|}{|R_g|^2 + |R_v|^2} \right), \quad (7)$$

а общие потери при отражении определяются выражением

$$L_{\text{отр}} = -20 \lg (|R_g|) + L_p = -20 \lg (|R_g|) - 10 \lg \left( \frac{1}{2} + \frac{|R_g| |R_v|}{|R_g|^2 + |R_v|^2} \right). \quad (8)$$

Результаты расчёта потерь сигнала с круговой поляризацией при зеркальном отражении от подстилающей поверхности различных типов при угле места НКА 10 градусов приведены в таблице 3.

Из данных таблицы видно, что из пяти рассмотренных типов подстилающей поверхности снежный покров наиболее сильно поглощает энергию радиоволн. Для остальных типов подстилающей поверхности можно считать, что дополнительное ослабление радиоволны за счёт поглощения поверхностью при отражении и деполяризации не превышает 2 дБ.

Таблица 3 — Потери сигнала при зеркальном отражении от подстилающей поверхности при угле места НКА 10 градусов, дБ

Тип поверхности	Влажная почва	Сухая почва	Мерзлая почва	Лед	Снег
Частота сигнала 1200 МГц	1,5	1,7	1,8	2,1	6,0
Частота сигнала 1600 МГц	1,7	1,7	1,8	2,1	6,0

### Список использованной литературы

1. Долуханов М.П. Распространение радиоволн. М. : Связь, 1972. 492 с.
2. GPS/GNSS Antennas / В. Rama Rao, W. Kunysz, R. Fante, K. McDonald. Boston, London : Artech house, 2012. 420 p.

---

*Лебедев Виталий Юрьевич – кандидат технических наук, директор, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: niirts@main.tusur.ru.*

*Захаров Фёдор Николаевич – заведующий лабораторией, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: zakharovfn@main.tusur.ru.*

*Мухомор Кирилл Евгеньевич – научный сотрудник, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: mukhomorke@main.tusur.ru.*

*Филимонов Владимир Андреевич – научный сотрудник, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.filimonov@main.tusur.ru.*

### Estimation of Signal Attenuation Due to Reflection from the Surface

*The article evaluates the attenuation of the signal power during specular reflection from different types of underlying surface. It is shown that the snow cover with a grazing fall can significantly weaken the signal.*

**Keywords:** *underlying surface, radio waves, horizontal polarization, vertical polarization.*

*Lebedev Vitaly Yurievich – Candidate of Technical Sciences, Director, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: niirts@main.tusur.ru.*

*Zakharov Fedor Nikolaevich – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: zakharovfn@main.tusur.ru.*

*Mukhomor Kirill Evgenievich – Senior Researcher, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: mukhomorke@main.tusur.ru*

*Filimonov Vladimir Andreevich – Researcher, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladimir.filimonov@main.tusur.ru*

**УДК 537.877**

**В.Ю. Лебедев, Ф.Н. Захаров, К.Е. Мухомор, В.А. Филимонов**

**ОЦЕНКА ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ/ШУМ ДЛЯ СИГНАЛОВ ГНСС,  
ПРИНИМАЕМЫХ НА УЗКОНАПРАВЛЕННУЮ АНТЕННУ**

*Проводится оценка зависимости отношения сигнал/шум сигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) от коэффициента направленного действия антенны земной станции контроля качества сигналов ГНСС. Показано, что для узконаправленных антенн солнечная засветка может приводить к уменьшению отношения сигнал/шум на 15 дБ и более.*

***Ключевые слова:** сигнал/шум, ГНСС, наземная станция контроля, коэффициент направленного действия.*

Для наземных станций контроля качества сигналов глобальных спутниковых систем навигации (ГНСС) важным параметром является отношение сигнал/шум. Это отношение влияет на погрешность определения параметров навигационных сигналов, таких как кодовая и фазовая задержки. Навигационные сигналы излучаются с постоянной мощностью, поэтому на отношение сигнал/шум влияют ослабление сигнала на трассе распространения радиоволн (РРВ), параметры антенны и уровень шумов.

Ослабление на трассе РРВ складывается из ослабления в свободном пространстве и дополнительного ослабления, которое зависит от состояния атмосферы [1]. Результаты расчёта ослабления для сигналов ГЛОНАСС и GPS приведены в таблице 1.

Ослабление на трассе в диапазоне частот 1200–1600 МГц является достаточно стабильной величиной, поэтому можно считать, что этот параметр мало влияет на флуктуации отношения сигнал/шум.

Антенны для наземных станций ГНСС используются узконаправленные, с коэффициентом направленного действия (КНД) не менее 20 дБ. При этом современный уровень технологии производства антенн позволяет считать флуктуации их параметров незначительными.

Таблица 1 — Общее ослабление сигналов ГЛОНАСС и GPS, дБ

Фактор	Угол места навигационного космического аппарата					
	3°		10°		90°	
	1600 МГц	1200 МГц	1600 МГц	1200 МГц	1600 МГц	1200 МГц
Свободное пространство	184,7	182,2	184,5	181,9	182,1	179,6
Ослабление в газах	6,7	5,7	2,2	1,9	0,4	0,3
Расхождение луча	1,2	1,2	0	0	0	0
Поглощение в ионосфере	2,0	1,2	1,9	1,1	0,1	0,1
Итого	194,6	190,3	188,6	184,9	182,6	180,0

Основным фактором, влияющим на отношение сигнал/шум для наземных станций контроля за качеством сигналов ГНСС является присутствие шума. По своему происхождению шумы можно разделить на внутренние и внешние. Первые обусловлены тепловыми шумами, возникающими в приемном антенно-фидерном тракте и в самом приемном устройстве. Возможными внешними источниками шума являются [2]:

- 1) шумы космического происхождения;
- 2) шумы, обусловленные тепловым излучением земной поверхности;
- 3) шумы, вызванные излучением газов и гидрометеоров;
- 4) атмосферные помехи, возникающие при грозовых разрядах;
- 5) промышленные помехи, обусловленные высокочастотным излучением различных промышленных и бытовых электрических установок и приборов;
- 6) взаимные помехи между радиотехническими системами, работающими на одинаковых или близких частотах.

Спектральная плотность атмосферных помех максимальна на частотах 300–10 000 Гц и быстро убывает по мере увеличения частоты, поэтому эти помехи практически незаметны на частотах выше 100 МГц. Уровень промышленных помех также существенно уменьшается при увеличении частоты и на частотах сигналов ГНСС может не учитываться.



Спектральная мощность шума вычисляется по формуле

$$N_0 = kT_{\text{ш}}, \quad (1)$$

где  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  — постоянная Больцмана;  $T_{\text{ш}}$  — суммарная шумовая температура (в градусах абсолютной шкалы), характеризующая собственные тепловые шумы приемника, тепловые шумы антенно-фидерного тракта, а также шумы, обусловленные воздействием на приемную антенну всех внешних источников шума.

Под величиной  $T_{\text{ш}}$  понимается термодинамическая температура сопротивления, согласованного с входным сопротивлением приемника, на котором развивается такая же мощность теплового шума, которую дают все источники шумов — как внутренние, так и внешние:

$$T_{\text{ш}} = T_{\text{ш пр}} + T_{\text{ш ф}} + T_{\text{а}} \eta, \quad (2)$$

где  $T_{\text{ш пр}}$  — температура собственного теплового шума приемника, приведенная к его входу;  $T_{\text{ш ф}}$  — температура собственного теплового шума фидера;  $T_{\text{а}}$  — антенная температура, характеризующая уровень шумов на выходе приемной антенны, обусловленных воздействием на нее излучения от всех внешних источников;  $\eta$  — КПД антенно-фидерного тракта.

Температура теплового шума фидера  $T_{\text{ш ф}}$  обусловлена потерями в нем и при согласовании его волнового сопротивления с входным сопротивлением приемника определяется формулой

$$T_{\text{ш ф}} = T_{\text{ф}} (1 - \eta), \quad (3)$$

где  $T_{\text{ф}}$  — термодинамическая температура фидера по абсолютной шкале.

Температура собственного теплового шума приемника, приведенная к его входу  $T_{\text{ш пр}}$  определяется по формуле

$$T_{\text{ш пр}} = T_{\text{пр}} k_{\text{ш}}, \quad (4)$$

где  $T_{\text{пр}}$  — термодинамическая температура входа приёмника;  $k_{\text{ш}}$  — коэффициент шума приёмника.

Антенная температура  $T_{\text{а}}$  определяется интегралом по полному телесному углу  $\Omega = 4\pi$  из точки расположения приемной антенны

$$T_{\text{а}} = \frac{G}{4\pi} \int_{4\pi} T_{\text{я}}(\alpha, \varphi) F^2(\alpha, \varphi) d\Omega, \quad (5)$$

где  $G$  — КНД антенны;  $F(\alpha, \varphi)$  — нормированная характеристика приемной антенны по напряженности поля.

В формуле (5) через  $T_{\text{я}}(\alpha, \varphi)$  обозначено угловое распределение суммарной яркостной температуры внешних источников шумов: космических, теплового излучения Земли, излучения газов и гидрометеоров (яркостная температура ясного неба).

*Шумы космического происхождения* для диапазона сигналов ГНСС определяются в основном тепловым излучением Солнца и Луны. Яркостная температура Солнца равна  $2 \cdot 10^5$  К, а Луны — 200 К. Поперечный размер Солнца и Луны составляет  $0,5^\circ$ . Яркостная температура космического фона и галактического шума в диапазоне частот 1–2 ГГц не превышает 13 К [2].

*Яркостная температура ясного неба* зависит от частоты сигнала и угла места: при угле места  $3^\circ$  равна 40 К,  $10^\circ$  — 10 К,  $90^\circ$  — 2 К для диапазона частот 1–2 ГГц [2].

*Тепловое излучение Земли* зависит от влажности почвы, угла места и частоты радиосигнала. В наихудшем случае (сухая почва) и угле места  $90^\circ$  тепловое излучение составляет 275 К. Зависимость от угла места  $\alpha$  определяется формулой

$$T_{\text{яз}} = T_{\text{з}} \left( 1 - |K(\alpha)|^2 \right), \quad (6)$$

где  $T_{\text{з}}$  — термодинамическая температура Земли;  $K$  — коэффициент отражения от поверхности Земли для данной частоты, угла скольжения  $\alpha$ , вида поляризации и электрических параметров земной поверхности. Из формулы видно, что наихудший случай будет, когда антенна смотрит вертикально вверх, а излучение Земли принимает задним лепестком диаграммы направленности.

Интеграл в формуле (5) разбивается на два интеграла. В первом — интегрирование осуществляется по верхней полусфере, при этом ДНА имеет гауссову форму с заданными шириной и коэффициентом направленного действия, а также не учитывается тепловое излучение Земли. Во втором интеграле интегрирование осуществляется по нижней полусфере, при этом учитывается только тепловое излучение Земли, а ДНА считается постоянной с уровнем минус 20 дБ.

Уровень сигналов ГЛОНАСС определялся исходя из минимальной мощности сигнала на частоте 1605 МГц, заданной в ИКД ГЛОНАСС [3], и равной минус 161 дБВт. Данное значение получено при следующих допущениях:

а) мощность радиосигнала определяется на выходе приемной антенны, имеющей линейную поляризацию и коэффициент усиления  $G_{\text{и}} = 3$  дБ;

б) навигационный космический аппарат (НКА) наблюдается под углом возвышения не менее  $5^\circ$ ;

в) потери при распространении радиосигнала в атмосфере составляют 2 дБ.

С учётом вышеописанных допущений минимальный уровень сигнала на выходе антенны земной станции с учётом угла места НКА будет определяться следующим образом:

$$P_{\min}(\alpha) = -161 + G - G_{\text{и}} + \eta + p - L_{\text{доп}}(\alpha), \quad (7)$$

где  $p = 3$  дБ — выигрыш по мощности вследствие использования антенны с круговой поляризацией;  $L_{\text{доп}}$  — дополнительные потери в атмосфере, превышающие заложенное в ИКД значение 2 дБ (см. таблицу 1).

При расчёте отношения сигнал/шум рассматривались два случая: главный максимум ДНА направлен на Солнце, главный максимум ДНА направлен в сторону от Солнца. Расчёты проводились при следующих параметрах:

- КПД антенно-фидерного тракта 0,5;
- коэффициент шума приёмника 5 дБ;
- максимальная температура приёмника  $50^\circ\text{C}$ ;
- ширина ДНА определялась через известный КНД антенны:

$$\theta = \sqrt{4\pi / G}.$$

Вычисленные по формуле (1) значения спектральной мощности шума в полосе 1 Гц при разных углах места НКА представлены в таблице 2.

Таблица 2 — Значения спектральной мощности шума, дБВт/Гц

Положение антенны	Угол места навигационного космического аппарата		
	$3^\circ$	$10^\circ$	$90^\circ$
Антенна направлена на Солнце	-183...-191*	-182...-194*	-181...-198*
Антенна направлена в сторону от Солнца	-191	-194	-198
* <i>Примечание:</i> спектральная плотность мощности шума зависит от ширины ДНА и КНД антенны и минимальна при широконаправленных антеннах с малым КНД			

Среди показателей, характеризующих отношение мощностей, широко используется отношение несущая/шум ( $C / N_0$ ), которое показывает, во сколько раз мощность  $C$  принимаемой модулированной высокочастотной (ВЧ) несущей на выходе приемного фильтра больше

мощности шума  $N_0$ , порождаемого совместным действием всех источников шума данного тракта. Отношение  $C / N_0$  является удобным параметром при расчетах энергетики на входе приемника. Приведем полезную зависимость:

$$\text{сигнал/шум} = \text{сигнал/несущая} + 10\log(\Delta f), \quad (8)$$

где  $\Delta f$  — ширина полосы пропускания входного фильтра приёмника.

Результаты расчёта энергетического параметра  $C / N_0$  для трёх значений угла места НКА представлены на рисунке 1.

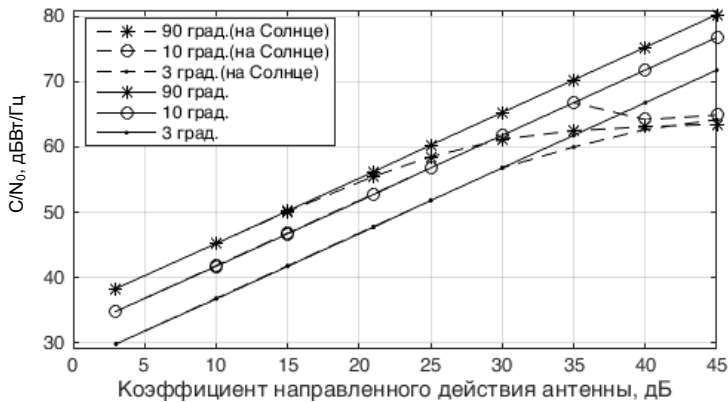


Рисунок 1 — Зависимость энергетического параметра  $C / N_0$  от КНД антенны и угла места НКА

Из полученных результатов видно, что при узконаправленных антеннах ширина главного лепестка которых сопоставима с угловым размером Солнца ( $0,5^\circ$ ), наблюдается насыщение отношения сигнал/шум при увеличении КНД антенны. Разница между уровнем сигнала при прохождении НКА через Солнечный диск и при прохождении по «чистому» небу достигает 15 дБ. Этот факт необходимо учитывать при анализе замираний спутниковых сигналов и оценке качества канала распространения радиоволн.

### Список использованной литературы

1. Рекомендация МСЭ-R Р.618-10. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи Земля – космос (Вопрос МСЭ-R 206/3). Электронная публикация. Женева, 2010. 28 с.
2. Рекомендация МСЭ-R Р.372-10. Радишум (Вопрос МСЭ-R 214/3). Электронная публикация. Женева, 2010. 77 с.

3. ГЛОНАСС. Интерфейсный контрольный документ. Навигационный радиосигнал в диапазонах L1, L2. Редакция 5.1. М., 2008. 72 с.

---

*Лебедев Виталий Юрьевич – кандидат технических наук, директор, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: niirts@main.tusur.ru.*

*Захаров Фёдор Николаевич – заведующий лабораторией, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: zakharovfn@main.tusur.ru.*

*Мухомор Кирилл Евгеньевич – научный сотрудник, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: mukhomorke@main.tusur.ru.*

*Филимонов Владимир Андреевич – научный сотрудник, научно-исследовательский институт радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: vladimir.filimonov@main.tusur.ru.*

#### **Evaluation of the Signal-to-Noise Ratio for GLONASS Signals Received by a Narrow Beam Antenna**

*The article evaluates the dependence of the signal-to-noise ratio of signals from global navigation satellite systems (GNSS) on the directional action of the antenna of the earth station for monitoring the quality of GNSS signals. It is shown that for narrow directional antennas, solar illumination can lead to a decrease in the signal-to-noise ratio by 15 dB or more.*

**Key words:** *Signal-to-noise ratio, GNSS, ground control station, directivity factor.*

*Lebedev Vitaly Yurievich – Candidate of Technical Sciences, Director, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: niirts@main.tusur.ru.*

*Zakharov Fedor Nikolaeovich – Candidate of Technical Sciences, Head of Laboratory, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: zakharovfn@main.tusur.ru.*

*Mukhomor Kirill Evgenievich – Senior Researcher, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems*

and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: mukhomorke@main.tusur.ru.

*Filimonov Vladimir Andreevich – Researcher, Research Institute of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Moscow, st. Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: vladimir.filimonov@main.tusur.ru.*

**УДК 621.391.8**

**Д.О. Ноздреватых, А.С. Аникин**

**МЕТОДЫ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МОЩНОСТИ УСИЛИТЕЛЕЙ  
ПЕРЕДАЮЩИХ ТРАКТОВ В РЕТРАНСЛЯТОРАХ СПУТНИКОВОЙ  
МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ**

*Рассмотрено использование спутниковой связи в современных технологиях мобильной радиосвязи и беспроводного доступа, вопросы распределения мощности усилителей между ретранслируемыми сигналами.*

*Ключевые слова: приемопередающий тракт, ретранслятор спутниковой мобильной связи, метод Greedy.*

В настоящее время на объем трафика спутниковых линий связи приходится около четверти общего мирового трафика.

В ближайшие годы предполагается постоянный прирост числа задействованных ретрансляторов спутниковой связи примерно на 3–6 % в год, причем быстрее будет возрастать доля ретрансляторов, используемых для передачи Интернет-трафика.

Также с появлением спутниковых систем связи встал вопрос оптимального распределения мощности между сигналами, передаваемыми абонентам на фиксированные и подвижные терминалы.

В системах спутниковой связи важно повысить эффективность использования энергоресурсов, которая в свою очередь обуславливается дефицитом спутниковых энергоресурсов. Возможности и методы управления выходной мощностью радиопередатчиков линии радиосвязи космического аппарата определяются построением ретранслятора [1].

Система спутниковой связи включает в себя комплекс оборудования, состоящего из спутникового ретранслятора, находящегося на орбите Земли, и некоторого количества наземных станций, фиксированных и передвижных.

Принцип работы спутниковой системы связи такой: сигнал поступает на спутниковый ретранслятор от одной из наземных станций

и далее ретранслируется на нужную наземную станцию или абонентский терминал, находящиеся в зоне покрытия спутника.

Спутниковый ретранслятор и связанные с ним антенны образуют важную часть связной подсистемы спутника связи — полезную нагрузку. Этот ретранслятор отличается от обычных ретрансляторов радиорелейных линий связи прямой видимости тем, что многие независимые земные станции имеют непосредственный доступ к спутнику связи почти в один и тот же момент времени из разных точек Земли. Таким образом, на спутник связи поступает большое количество сигналов, которые должны быть им ретранслированы.

Анализ канала связи для нерегенеративного ретранслятора — это анализ полного «оборота» сигнала (т.е. передача на спутник и ретрансляция на наземное оконечное устройство). Нерегенеративный ретранслятор имеет несколько уникальных особенностей: зависимость общего отношения сигнал/шум от отношения сигнал/шум канала «земля-спутник» и совместное использование мощности канала «спутник-земля» каждым сигналом и шумом канала «земля-спутник».

Преобразование мощности сигналов в нерегенеративном ретрансляторе начинается с передачи наземной станции (ширина полосы меньше  $W$ ) от терминала  $i$ ,  $EIRP$  терминала  $EIRP_{ii} = P_{ii}G_{ii}$ , одновременно на спутник передаются сигналы с других терминалов). Мощность  $EIRP$  с  $k$ -го терминала будет далее обозначена просто  $P_k$ . На спутнике мощность общего принятого сигнала  $P_T = \sum A_k P$ , где  $A_k$  описывает потери распространения в канале «земля-спутник» и усиление спутниковой антенны для  $k$  канала.  $N_s W$  — мощность шума в канале «земля-спутник», а  $N_s$  — общая спектральная плотность мощности шума, возникающего в спутниковом приемнике и излучающей спутниковой антенне. Общую мощность  $EIRP$  канала «спутник-земля» ( $EIRP_s = P_s G_{ts}$ , где  $P_s$  — мощность на выходе спутникового ретранслятора, а  $G_{ts}$  — коэффициент усиления передающей антенны спутник) можно выразить следующим образом:

$$EIRP_s = EIRP_s \beta \left[ A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W \right]. \quad (1)$$

Обе части формулы (1) выражают общую мощность  $EIRP$ -спутника. Выражение  $\beta \left[ A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W \right]$  в правой части является дробным пропорциональным распределением  $EIRP_s$  между различными пользователями и шумом канала, суммарное значение этого выражения равно 1. Общее усиление мощности в транспондере

можно выразить как  $\beta P_s$ . Тогда общую мощность, принятую  $j$ -м наземным терминалом с шириной полосы  $W$ , можно записать следующим образом:

$$P_{rj} = EIRP_s \gamma_j \beta [A_i P_i + (P_T - A_i P_i) + N_s W] + N_g W. \quad (2)$$

Уравнение (2) описывает суть пропорционального разделения в ретрансляторе мощности канала «спутник-земля» между различными пользователями и шумами. Заменяя  $\beta$  на  $1 / (P_T + N_s W)$  в уравнении (2), получим:

$$P_{rj} = EIRP_s \gamma_j \left[ \frac{A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{P_T - A_i P_i}{P_T + N_s W} + \frac{N_s W}{P_T + N_s W} \right] + N_g W. \quad (3)$$

Для облегчения дальнейших рассуждений можно записать уравнение (3) словами.

$$P_{rj} = EIRP_s \gamma_j \left[ \frac{\text{мощность } S_i(UL)}{\text{общая мощность } (S + N)(UL)} + \frac{\text{равновесная мощность } (UL)}{\text{общая мощность } (S + N)(UL)} + \frac{\text{мощность шума } (UL)}{\text{общая мощность } (S + N)(UL)} \right] + N_g W, \quad (4)$$

где  $S$  — мощность сигнала;  $N$  — мощность шума;  $(UL)$  — канал «земля-спутник» (uplink).

Из уравнения (3) можно определить важную связь, которая должна существовать между пользователями, совместно эксплуатирующими нерегенеративный ретранслятор. Пользователи должны взаимодействовать, не превышая договорные уровни мощности передачи. Из уравнения (3) видно, что часть мощности  $EIRP$  канала «спутник-земля», выделенной пользователю (или относящейся к шумам канала), определяется отношением мощности этого пользователя к общей мощности суммарного сигнала плюс мощность шума. Следовательно, если один из пользователей, совместно использующих канал, решит увеличить каким-то образом мощность своего сигнала, результатом будет улучшение уровня сигнала этого пользователя за счет сигналов других пользователей [2].

Мощность сигнала, излучаемого (ретранслируемого) от спутникового ретранслятора к абонентскому терминалу (MES) и обратно, регулируется в зависимости от резерва, т.е. незадействованной мощности, которая будет излучена в нужный момент времени для передачи сигнала. Стоит важная задача — максимально эффективно распределить эту самую мощность между излучаемыми сигналами, т.е. обслужить наибольшее количество пользователей исходя из общей



мощности ретранслятора. Для решения этой задачи и существуют методы распределения мощности [1].

Методов существует несколько, основными являются: статический и динамический.

В источнике [3] было показано, что использование стохастической модели при ослаблении луча в дождь, прогнозирование и метод динамического распределения мощности позволили обслуживать большее количество пользователей, чем другие существующие методы.

Далее в статье представлены результаты имитационного моделирования распределения мощности усилителя между ретранслируемыми сигналами для метода Greedy.

При помощи модели распределения мощности, спроектированной в среде Matlab, были получены графики, отражающие распределение мощности передатчиков между различным количеством лучей. Также графики показывают какое количество пользователей было обслужено каждым лучом и какое количество пользователей осталось необслуженными. Ниже представлены графики, полученные в процессе моделирования распределения мощности по методу Greedy, для разных значений количества пользователей, количества лучей, мощности передатчика и требований по мощности для каждого пользователя.

В первом случае были заданы следующие параметры: количество лучей, шт. — 20; общая доступная мощность ретранслятора, Вт — 120; максимальное количество пользователей в одном луче, шт. — 30; максимально запрашиваемая пользователем мощность, Вт — 60. Результаты моделирования расположены на рисунках 1–3.

Во втором случае были заданы следующие параметры: количество лучей, шт. — 40; общая доступная мощность ретранслятора, Вт — 100; максимальное количество пользователей в одном луче, шт. — 25; максимально запрашиваемая пользователем мощность, Вт — 75. Результаты моделирования расположены на рисунках 4, 5, 6.

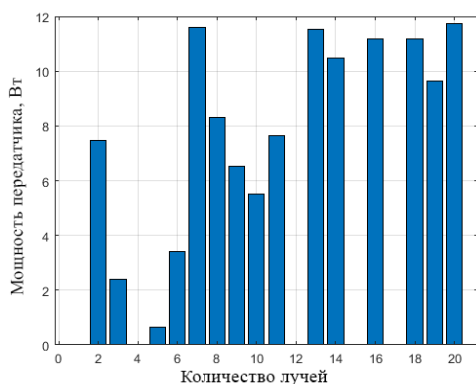


Рисунок 1 — График распределения мощности по лучам

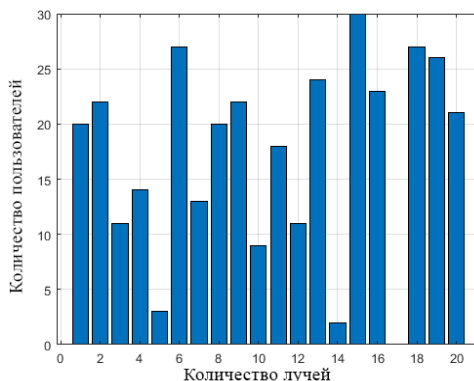


Рисунок 2 — График распределения обслуженных пользователей по лучам

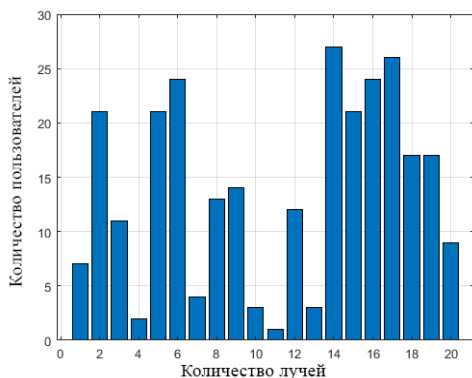


Рисунок 3 — Распределение необслуженных пользователей по лучам

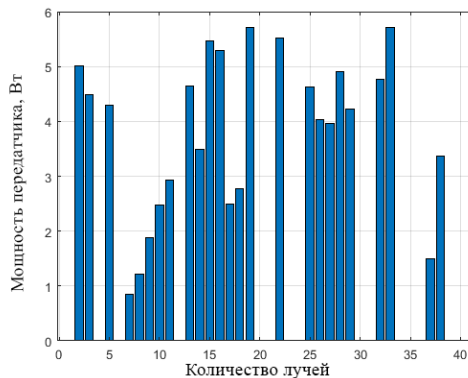


Рисунок 4 — График распределения мощности по лучам

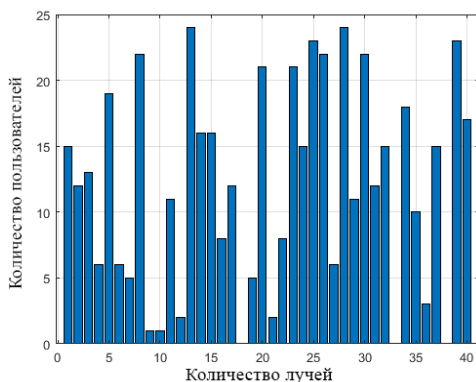


Рисунок 5 — График распределения обслуженных пользователей по лучам

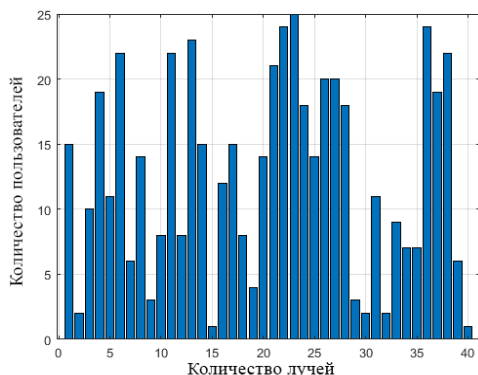


Рисунок 6 — Распределение необслуженных пользователей по лучам

В третьем случае были заданы следующие параметры: количество лучей, шт. — 10; общая доступная мощность ретранслятора, Вт — 150; максимальное количество пользователей в одном луче, шт. — 40; максимально запрашиваемая пользователем мощность, Вт — 20. Результаты моделирования расположены на рисунках 7–9.

Из графиков видно, какое количество пользователей, распределенных по лучам ретранслятора, обслужено и не обслужено. Обслуженных пользователей значительно больше, чем необслуженных, но в любом случае стоит задача обслуживания максимального количества пользователей, а при использовании данного метода количество пользователей, которым мощность не распределена, достаточно большое.

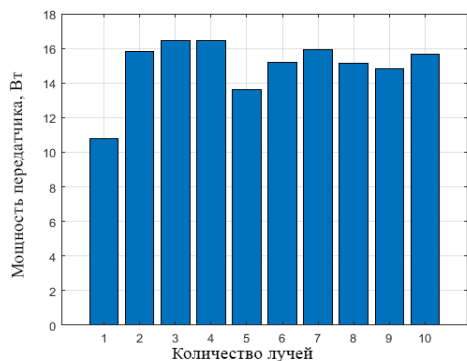


Рисунок 7 — График распределения мощности по лучам

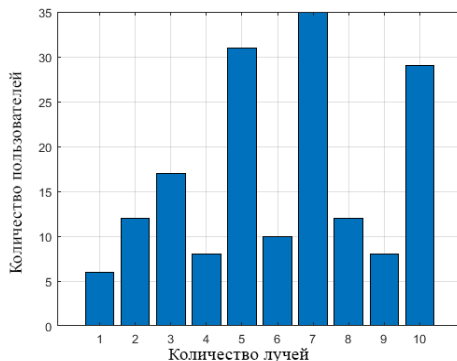


Рисунок 8 — График распределения обслуженных пользователей по лучам

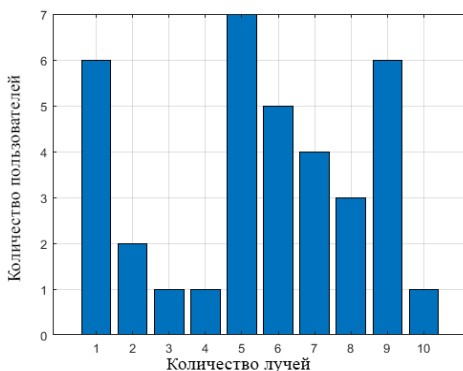


Рисунок 9 — Распределение необслуженных пользователей по лучам

Исходя из чего можно сказать, что метод Greedy не является эффективным, так как ретранслятор не задействует всю доступную мощность, распределяемую по лучам. При анализе распределения мощности по лучам передатчика видно, особенно при большом количестве лучей, что некоторые из лучей получают гораздо больше мощности сигнала, а некоторые из них вовсе не получают сигнала.

### Список использованной литературы

1. Ноздревых Д.О., Аникин А.С. Методы управления мощностью радиопередатчика ретранслятора системы спутниковой радиосвязи // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2020». Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. Т. 1. С. 14–17.

2. Сомов А.М., Корнев С.Ф. Спутниковые системы связи : учеб. пособие для вузов / под ред. А.М. Сомова. М. : Горячая линия – Телеком, 2015. 244 с.

3. Destounis A., Panagopoulos A. Dynamic power allocation for broadband multi-beam satellite communication networks /// IEEE Commun. Lett. 2011. Vol. 15, N 4. P. 380–382.

### **Methods of Power Distribution of Transmitting Tract Amplifiers in Satellite Mobile Communications Repeaters**

*The use of satellite communication in modern technologies of mobile radio communication and wireless access, issues of distribution of the power of amplifiers between relayed signals are considered.*

**Key words:** *transceiver path, satellite mobile communications repeater, Greedy method.*

*Nozdrevatykh Daria Olegovna – Senior Lecturer, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: daria.o.nozdrevatykh@tusur.ru.*

*Anikin Alexey Sergeevich – Scientific Leader, Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of RTS Research Institute, Associate Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, etc. Lenin, 40, e-mail: anikinAS@main.tusur.ru.*

**УДК 550.34.062: 550.34.063**

**В.Ф. Гордеев, С.Ю. Малышков, В.И. Поливач, С.Г. Шталин**

### **ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОВОЛНОВОГО МЕТОДА РАННЕГО ОПОВЕЩЕНИЯ АКТИВИЗАЦИИ ОПАСНЫХ ГЕОДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

*Статья посвящена результатам изучения явления электромагнитной эмиссии и оценке перспективности его применения для фундаментальных исследований в разделе Наук о Земле. Сущность явления заключается в генерировании импульсных электромагнитных полей твердыми телами в ответ на механическое, тепловое или иное воздействие. В работе рассматривается только электромагнитная эмиссия, вызванная механоэлектрическими преобразованиями энергии в твердых телах и массивах горных пород в условиях их естественного залегания. Дано научное обоснование наиболее перспективных направлений практического*

*использования явления для контроля за геодинамическими процессами, изучения естественных импульсных электромагнитных полей в окружающей среде и их применение для раннего оповещения активизации опасных природных явлений (землетрясений, оползней, горных ударов и пр.).*

**Ключевые слова:** *электромагнитная эмиссия, геодинамика, электромагнитные поля, импульсный поток.*

Стихийные природные явления и технические катастрофы все так же потрясают человечество своей неожиданностью и трагическими последствиями. Человечество не может предотвратить, ослабить или хотя бы предсказать такие стихийные природные явления, как землетрясения, горные удары, оползни. Для принятия действенных мер по снижению нежелательных последствий этих событий необходимы эффективные методы раннего оповещения геодинамических событий. Геодинамические события это есть результат разрушения горных пород в условиях их естественного залегания под действием механических (тектонических) напряжений. Поэтому задача сводится к проблеме контроля за процессами подготовки, зарождения и развития разрушения.

Недостатки существующих методов контроля состояния материалов и природных объектов заставляют искать принципиально новые пути и способы решения этих задач. Широкие возможности оценки качества и технического состояния объектов появляются при использовании явления электромагнитной эмиссии деформируемых твердых тел, которое было обнаружено в начале 60-х годов XX в. [1–3]. Толчком к постановке данных исследований послужила гипотеза профессора Томского политехнического университета А.А. Воробьева о подземной грозе, высказанная им в конце 60-годов прошлого века [4, 5]. Были предприняты попытки обнаружения электромагнитных импульсов, которые должны сопровождать электрические разряды в земле накануне землетрясения. Одновременно с этим под руководством А.А. Воробьева начались систематические исследования процессов генерации электромагнитных сигналов твердыми телами при их деформировании.

Использование уникальных возможностей явления электромагнитной эмиссии для прогноза стихийных природных явлений невозможно без обстоятельного изучения источников и механизмов генерирования электромагнитного сигнала деформируемыми твердыми телами и горными породами в условиях их естественного залегания.

Начнем с самых общих физических представлений о явлении электромагнитной эмиссии.

1. Переменные (импульсные) электрические или электромагнитные поля могут возникать только при ускоренном движении зарядов. Следовательно, импульсный электромагнитный сигнал в материалах или конструкциях, находящихся под нагрузкой, будут генерировать развивающиеся дефекты структуры. После остановки процессов развития дефектов релаксация электрического заряда приведет к его исчезновению, следовательно, можно ожидать выполнения важного требования — избирательности методов электромагнитной эмиссии к наиболее опасным (развивающимся) дефектам.

2. Чрезвычайно высокая чувствительность современной радиоприемной аппаратуры позволяет обеспечить регистрацию слабых сигналов на начальных стадиях зарождения разрушения, что необходимо для надежной, заблаговременной диагностики разрушения материала.

3. Электромагнитные поля обладают высокой проникающей способностью в диэлектриках и природных материалах и среди всех известных явлений уступают по своему «дальнодействию» разве что гравитационному взаимодействию. Следовательно, возможно обнаружение дефектов на больших расстояниях от приемников, во всяком случае, для диэлектрических материалов.

При постановке исследований исходили из следующих возможных механизмов генерации полей:

1) скачкообразное разделение зарядов на вновь образующихся поверхностях в момент прорастания трещин или разрушения материала;

2) колебательное движение заряженных бортов трещин после акта прорастания;

3) колебательное движение электростатического поверхностного заряда, вызванное выходом на поверхность акустической волны в процессе акта микро- или макрорастрескивания;

4) искровой разряд, возникающий между заряженными бортами трещин.

Каждый из этих механизмов должен иметь характерные спектры и форму импульсов.

Импульсы с амплитудой колебательного характера (рисунок 1) наблюдаются в процессе механического нагружения бетонов при одноосном сжатии.

Возникновение электромагнитной эмиссии такой формы можно объяснить колебаниями заряженных дефектов структуры в материалах или зарядов на его поверхности под действием упругих волн. Заряды и их колебания могут возникать как непосредственно в месте разрыва в момент прорастания трещины, так и под действием упругих волн, пришедших к данной заряженной области из других участков материала, от других актов разрушения.

В процессе нагружения бетонов наблюдаются также импульсы электромагнитной эмиссии, форма которых не имеет аналогий с предыдущими сигналами.

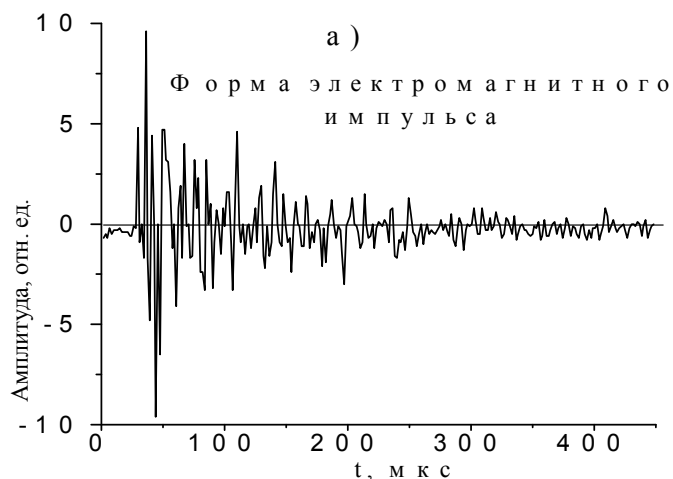


Рисунок 1 — Форма электромагнитных импульсов в процессе нагружения образцов бетона в режиме одноосного сжатия

Примеры таких импульсов приведены на рисунке 2. В модельных экспериментах было показано, что их происхождение может быть обусловлено либо микроразрядами (рисунок 2,б), возникающими между бортами развивающихся трещин, либо резкими скачками потенциалов на образующихся поверхностях разрыва в момент разделения электрических зарядов на бортах трещины (рисунок 2,а).

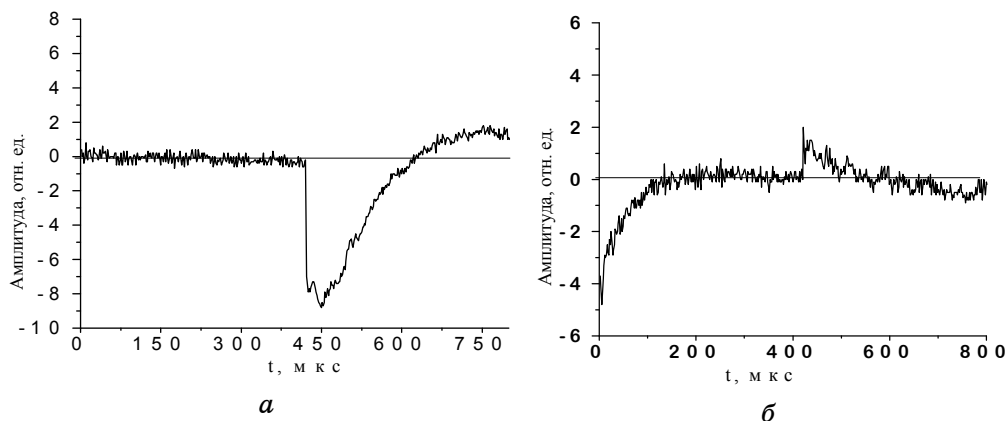


Рисунок 2 — Примеры скачкообразных (а) и разрядных (б) импульсов, регистрируемых из бетона в процессе его одноосного сжатия

Таким образом, основными механизмами генерации сигнала являются:

- колебательное движение образующихся в процессе микро- и макроразрушений заряженных поверхностей, концов волокон, отслоившихся частей материала и т.п.;

- скачкообразное появление или разделение зарядов на вновь образующихся поверхностях разрывов, расслоений или бортов образующихся трещин;

- микроразряд или тлеющий разряд между отдельными частями материалов при их разрыве.

Понятие естественного импульсного электромагнитного поля Земли (ЕИЭМПЗ) было введено профессором Томского политехнического института А.А. Воробьевым в 60-х годах прошедшего столетия. По его же гипотезе источниками ЕИЭМПЗ являются располагающиеся непосредственно в литосфере дефекты твердых тел, обусловленные механоэлектрическими преобразованиями энергии. Далее сигнал выходит на поверхность земли и попадает в точку наблюдения в результате распространения электромагнитного поля прямым лучом или в волноводе Земля – Ионосфера [6]. Под руководством А.А. Воробьева, а затем и другими исследователями были обнаружены аномальные возмущения электромагнитных полей накануне землетрясений, при активизации оползневых процессов, на стадиях подготовки других геодинамических явлений [7]. Высокая чувствительность ЕИЭМПЗ к изменению тектонических напряжений открывает широкие возможности не только для прогноза землетрясений, но и таких опасных явлений, как горные удары, оползни, вулканические извержения и т.п.

По результатам многолетнего мониторинга были получены типичные сезонные и суточные хода интенсивности ЕИЭМПЗ, связанные с длиннопериодными деформационными волнами [8].

Литосферное происхождение полей, их зависимость от строения приповерхностных слоев земной коры, наличия трещин, разломов позволяет начать разработку новых методов исследования структуры земной поверхности, поиска и разведки месторождений полезных ископаемых, изучения физико-механических свойств массивов горных пород в условиях их естественного залегания путем регистрации естественного импульсного электромагнитного поля Земли.

В качестве инструментальных средств для исследования и отработки технологий геофизических методов по параметрам ЕИЭМПЗ была спроектирована и изготовлена серия многоканальных программно-аппаратных регистраторов серии «МГР». На рисунке 3 представлен многоканальный геофизический регистратор МГР-02-16 последнего поколения, который позволяет анализировать как временные, так и пространственные вариации интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ.





Рисунок 3 — Внешний вид регистратора МГР-02-16

Регистратор имеет два взаимно ортогональных измерительных канала магнитной составляющей ЕИЭМПЗ.

Резонансная частота приема сигнала по магнитной составляющей ЕИЭМПЗ устанавливается программно от 5 до 25 кГц с шагом дискретизации  $2,5 \pm 0,5$  кГц.

Коэффициент преобразования датчика канала магнитной составляющей не менее 0,001 В·м/А.

Коэффициент усиления изменяется (через ЦАП и компаратор) от 0 до 84 дБ (от 1 до 16000).

Опорное напряжение компаратора регулируется: 1,2 мВ – 2,5 В с дискретом 1,2 мВ.

Объем памяти для хранения зарегистрированных данных 4 МБ.

Имеется встроенный GSM-модем для передачи зарегистрированных данных на HTTP-сервер по GPRS-каналу.

В качестве параметров ЕИЭМПЗ МГР-02-16 регистрирует:

- количество импульсов магнитной составляющей поля за выбранный интервал времени, амплитуда которых превысила заданный порог;

- амплитуду импульсов магнитной составляющей.

Регистратор предназначен для:

- мониторинга геодинамических движений земной коры методами регистрации ЕИЭМПЗ [9];

- изучения глубинного строения земной коры, обнаружения в земной коре скрытых геологических разломов, разрывных нарушений, поиска месторождений полезных ископаемых, включая месторождения нефти и газа [10];

- оценки сейсмической ситуации на сейсмоактивных территориях [11].

Имеются патенты на способ мониторинга и прогнозирования оползневой опасности [12] и способ мониторинга для прогнозирования сейсмической опасности [13].

При обработке технологий раннего оповещения опасных геодинамических процессов по параметрам ЕИЭМПЗ использовались регистраторы МГР-02-16 на линейных участках магистральных газопроводов Северного Кавказа, Урала, Камчатки.

В качестве алгоритма контроля геодинамических процессов по параметрам ЕИЭМПЗ используются два критерия. Первый критерий показывает отличие по интенсивности показаний регистраторов, расположенных в точках контроля напряженно-деформированного состояния горных пород, от показаний реперного (вариационного) регистратора. Реперный регистратор устанавливается на расстоянии не более 25 км (длина волны ОНЧ-диапазона) от контролируемых в месте, не подверженном геодинамическим процессам. Второй критерий оценивает степень подобия показаний различных регистраторов. Превышение интенсивности импульсного потока ЕИЭМПЗ в каждой измеряемой точке по отношению к интенсивности на реперной станции рассчитывается по формулам:

$$K_{(с-ю)} = \frac{N1_{T(i)} - N1_{T(r)}}{N1_{T(r)}};$$

$$K_{(з-в)} = \frac{N2_{T(i)} - N2_{T(r)}}{N2_{T(r)}},$$

где  $N1_{T(i)}$  — интенсивность импульсного потока ЕИЭМПЗ по направлению север-юг на  $i$ -й измерительной станции;  $N2_{T(i)}$  — интенсивность импульсного потока ЕИЭМПЗ по направлению запад-восток на  $i$ -й измерительной станции;  $N1_{T(r)}$ ,  $N2_{T(r)}$  — интенсивность импульсного потока ЕИЭМПЗ по направлению север-юг и запад-восток на реперной станции.

Если коэффициенты  $K < 0$ , считаем, что возникают механические напряжения сжатия в соответствующем направлении, либо север-юг, либо запад-восток. При  $K > 0$  возникают напряжения растяжения. Чем больше величина  $K$ , тем выше напряжения. Этот параметр является одним из основных критериев геодинамической оценки состояния грунтов.

В качестве второго параметра напряженно-деформированного состояния грунтов используется оценка корреляции формы суточных вариаций интенсивности ЕИЭМПЗ реперной и  $i$ -й измерительной станции. Для расчета коэффициента корреляции двух выборок используется формула Спирмана:

$$r = 1 - \frac{6}{n^3 - n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2,$$

где  $n$  — размер выборки (количество наблюдений, которые используются для расчета);  $x_i$  — ранг  $i$ -го элемента первой выборки в самой выборке (например, выборка {5, 8, 4, 6}, тогда  $x_1 = 2$ ,  $x_2 = 4$ ,  $x_3 = 1$ ,  $x_4 = 3$ ;  $y_i$  — ранг  $i$ -го элемента второй выборки в самой выборке.

Далее рассчитывается интегральный коэффициент оценки безопасности геодинамического состояния оползневого склона по формуле:

$$R_{об} = \frac{K + (1 - r)}{2},$$

где  $R_{об}$  — обобщенный критерий остаточного ресурса устойчивости данного участка, величина которого определяется эмпирически.

Опасным для эксплуатации промышленного объекта следует считать превышение интегрального коэффициента оценки безопасности более чем на 150 % в течение трех суток и более.

Предложенное применение обработки сигналов ЕИЭМПЗ и использование системы разнесенных в пространстве станций обеспечило высокоточные, хорошо воспроизводимые результаты, отражающие активность геодинамических процессов на оползневом склоне магистрального газопровода (МГ) «Уренгой – Помары – Ужгород» при переходе через реку Кама (Урал) [14]. Применение данной системы позволяет в реальном масштабе времени выявлять в структуре склона зоны повышенной и пониженной активности оползневых процессов, зоны растяжения и относительного сжатия, пространственную ориентацию напряжений. Анализ результатов площадных измерений данного участка показал, что самым сложным и опасным с точки зрения геодинамики является северный участок, особенно по береговой линии в районе ниток МГ «Ямбург – Елец-2» и МГ «Ямбург – Западная граница» ЛУПИНГ, а также в районе верховой части между нитками МГ «Уренгой – Центр-1» и МГ «Ямбург – Елец-1» [15].

Полученные пространственные вариации интенсивности естественного импульсного электромагнитного поля Земли позволили выделить аномальные геодинамические зоны по трассе магистрального газопровода «Моздок – Казимагомед», газопроводах-отводах «Ботлих» на участках 95 и 57 км.

Камеральная обработка результатов инструментального обследования, пространственных вариаций интенсивности сигнала ЕИЭМПЗ позволила обосновать местоположения пунктов постоянного мониторинга напряженно-деформированного состояния грунтов радиоволновым методом (Дагестан).

Авторы статьи выражают благодарность Капустину С.А. и Кабанову М.М. за обсуждение результатов исследований и разработку

Интернет-портала автоматизированной системы контроля горных пород (АСК-ГП).

Исследования выполнены в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН.

### Список использованной литературы

1. Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В. О времени высвечивания в процессах трибо- и кристаллолюминесценции // Кристаллография. 1962. Т. 7, Вып. 4. С. 576–580.

2. Беляев Л.М., Мартышев Ю.Н., Набатов В.В. Исследование свечения при разрушении минералов. Времена высвечивания // Физика щелочногалоидных кристаллов. Изд-во Латв. ун-та, 1962. С. 179–182.

3. Мартышев Ю.Н. Исследование свечения и электризации кристаллов LiF при их деформации // Кристаллография. 1965. Т. 10, вып. 2. С. 224–226.

4. Воробьев А.А. О возможности электрических разрядов в недрах Земли // Геология и геофизика. 1970. № 12. С. 3–13.

5. Воробьев А.А. К вопросу об иницировании землетрясений подземными грозвыми явлениями // Электрофизическая аппаратура и электрическая изоляция. М. : Энергия, 1970. С. 494.

6. Исследование импульсных электромагнитных сигналов, излучаемых льдом при механическом нагружении / А.А. Воробьев [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1982. № 4. С. 116–119.

7. Gokhberg M.B., Morgounov V.A., Pokhotelov O.A. Earthquake Prediction: Seismoelectromagnetic Phenomena. Gordon and Breach Science Publishers, 1995. 208 p.

8. Малышков Ю.П., Малышков С.Ю. Периодические вариации геофизических полей и сейсмичности, их возможная связь с движением ядра Земли // Геология и геофизика. 2009. Т. 50, № 2. С. 152–172.

9. Патент № 2238575 РФ. Способ прогноза землетрясений / Малышков Ю.П., Джумабаев К.Б., Малышков С.Ю. [и др.]. 2004.

10. Патент № 2352961 РФ. Способ определения пространственного положения и параметров внутреннего ядра Земли / Малышков Ю.П., Малышков С.Ю., Шталин С.Г. [и др.]. 2009.

11. Патент № 2414726 РФ. Способ геофизической разведки / Малышков Ю.П., Малышков С.Ю., Шталин С.Г. [и др.]. 2011.

12. Патент № 2686383 РФ. Способ мониторинга и прогнозирования оползневой опасности / Задериголова М.М., Малышков С.Ю., Кочновалов Ю.Ф. [и др.]. Заявл. 15.06.18 ; опубл. 25.04.19.

14. Гордеев В.Ф., Малышков С.Ю., Поливач В.И. Геофизический мониторинг опасных техногенных проявлений на подрабатываемых территориях // Вестник СГГУиТ. 2019. Т. 24, № 2. С. 35–44. DOI:10.33764/2411-1759-2019-24-2-35-44.

15. Earth's Natural Pulsed Electro-Magnetic Field Temporal Variations' Anomalies as an Earthquake Precursors / V.F. Gordeev, S.Yu. Malyshkov, V.I. Polivach [et al.] ; eds. G. Kocharyan and A. Lyakhov // Springer Proceedings in Earth Environmental Sciences. 2019. С. 53-60. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-030-31970-0_6) Scopus.

---

*Гордеев Василий Федорович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, лаборатория геоинформационных технологий, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический 10/3, e-mail: gordeev@imces.ru.*

*Малышков Сергей Юрьевич – старший научный сотрудник, лаборатория геоинформационных технологий, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический 10/3, e-mail: msergey@imces.ru.*

*Поливач Виталий Игорьевич – научный сотрудник, лаборатория геоинформационных технологий, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, Россия, 634055, г. Томск, пр. Академический 10/3, e-mail: polivach@imces.ru.*

*Шталин Сергей Георгиевич – ведущий электроник, кафедра автоматизированных систем управления, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Российская Федерация, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: sersh1965@gmail.com.*

### **Physical Basis and Technology of the Radio Wave Method of Early Warning of Activation of Dangerous Geodynamic Processes**

*The article is devoted to the results of studying the phenomenon of electromagnetic emission and assessing the prospects of its application for fundamental research in the section of Earth Sciences. The essence of the phenomenon lies in the generation of pulsed electromagnetic fields by solid bodies in response to mechanical, thermal or other effects. The work considers only electromagnetic emission caused by mechanoelectric energy transformations in solids and rock massifs in the conditions of their natural occurrence. The scientific substantiation of the most promising directions of practical use of the phenomenon for monitoring geodynamic processes, studying natural pulsed electromagnetic fields in the environment and their applica-*

tion for early warning of the activation of dangerous natural phenomena (earthquakes, landslides, rock bumps, etc.) is given.

**Key words:** *electromagnetic emission, geodynamics, electromagnetic fields, impulse flow.*

*Gordeev Vasily Fedorovich – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute for Monitoring of Climate and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 634055, Tomsk, Akademicheskii Ave. 10/3, e-mail: gordeev@imces.ru.*

*Malyshev Sergey Yurievich – Senior Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 634055, Tomsk, Akademicheskii pr. 10/3, e-mail: msergey@imces.ru.*

*Polivach Vitaly Igorievich – Researcher, Laboratory of Geoinformation Technologies, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 634055, Tomsk, Akademicheskii pr. 10/3, e-mail: polivach@imces.ru.*

*Shtalin Sergey Georgievich – Leading Electronics Engineer, Department of Automated Control Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Russian Federation, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: sersh1965@gmail.com.*

**УДК 53.043**

**А.И. Зайниев, И.Ю. Кузьменко**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ SDR-РАДИО В РАДИОФИЗИКЕ**

*Рассматривается модель дальномера, разработанная в среде программирования LabVIEW, реализуемая с помощью SDR-модуля USRP 2901. Приведены результаты работы.*

**Ключевые слова:** *разность фаз, линия передач, свободное пространство, математическая модель, временная задержка, гармонические колебания, полная фаза, USRP, программно-определяемое радио.*

В данной работе используется разность фаз для измерения расстояния между передатчиком и приемником. Также с помощью разработанной модели можно измерять диэлектрическую проницаемость материалов.

Фаза характеризует состояние гармонического колебания в рассматриваемый момент времени. Математически фазу определяют как аргумент синусоидальной функции, описывающей колебательный процесс [1]. Измерение разности фаз является важной задачей радиотехники и радиофизики.

При передаче сигнала на большие расстояния принимаемый сигнал приходит со сдвигом по фазе. В современных системах это физическое явление компенсируется. К примеру, в QPSK-модуляции при передаче сигнала на некоторое расстояние некоторой последовательности (11100001001011) появляется сдвиг по фазе, видный на IQ-диаграмме. В системах радиосвязи этот эффект компенсируется путем добавления фазы и выравнивания IQ-диаграммы.

Но это физическое явление можно использовать для измерения расстояния, а также для измерения диэлектрической проницаемости материала.

При генерировании сигнала передатчиком сигнал можно записать в виде  $TX(t) = Z \exp(i\omega_0 t)$ . Во время прохождения сигнал в свободном пространстве приобретает задержку, описываемую формулой  $ZX(t) = Z \exp(ikr)$ . На приемник приходит сигнал  $RX(t) = Z \exp(i\omega_0 t) \cdot \exp(ikr)$ . В приемнике сигнал переносится на низкую частоту путем умножения на  $\exp(-i\omega_0 t)$ . После проделанной операции получается сигнал  $Z \exp(ikr)$ , который содержит всю информацию о расстоянии между передатчиком и приёмником.

Разработка модели была реализована в среде программирования LabVIEW. LabVIEW предлагает графический подход к программированию, который поможет визуализировать любую деталь поставленной задачи, включая конфигурирование оборудования, данные измерений и отладку. Эта визуализация упрощает интеграцию измерительного оборудования, изображение сложных алгоритмов на диаграмме, разработку алгоритмов анализа данных и специализированных интерфейсов пользователя [2].

Схема экспериментальной установки при передаче в свободном пространстве изображена на рисунке 1.

В данной работе реализуется сканирующий метод по частоте от 500 МГц до 2,5 ГГц с шагом 10 МГц. Блок-диаграмма передатчика представлена на рисунке 2. Изменение частоты производится путем изменения переменной  $i$  в цикле. В разработанной модели используется двухканальная передача. После генерации сигнал поступает в цикл while loop, в котором реализована передача сигнала.

Модель приемника должна принимать передаваемый сигнал, переносить его обратно на низкую частоту и записывать принятые

данные для дальнейшей обработки с отображение их на графике. Блок диаграмма модели приемника представлена на рисунке 3.

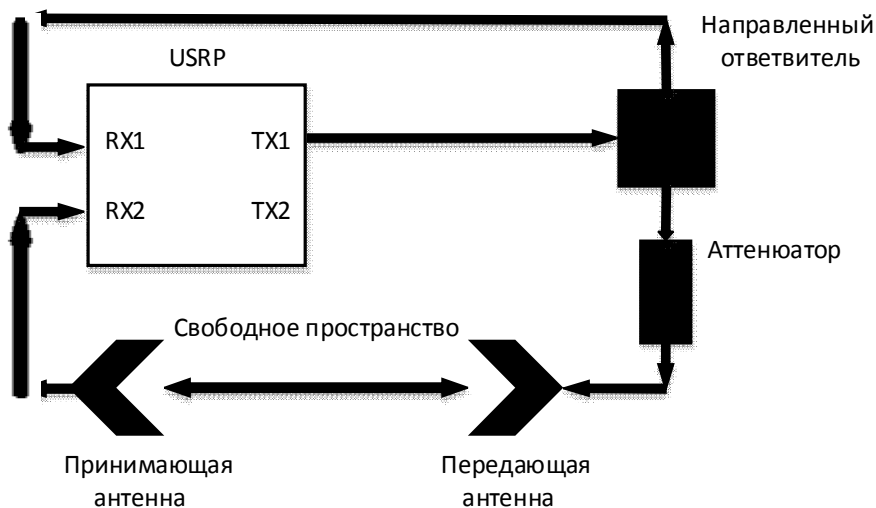


Рисунок 1 — Схема экспериментальной установки

При записи сигнала в файл используется блок для создания пути и имени файла `build text`. Записываются все файлы в одну папку, но с разными именами, связанными с частотой, на которую переносится этот сигнал.

Для того чтобы модель работала с перестройкой по частоте, был реализован цикл `while loop` с установленным временем работы приёмопередачи.

После принятия сигнала его нужно разделить, потому как в нем присутствуют компоненты двух разных сигналов. В разработанной модели это реализуется с помощью блока `Delete From Array Function`. После разделения сигналов необходимо определить реальную и мнимую части. Далее все сигналы строятся на графиках для визуального контроля правильности работы модели.

Вскоре после завершения цикла все данные собираются в один массив для дальнейшей записи в файл. Передняя панель блок-диаграммы разработанной модели приемника представлена на рисунке 4.

При перестройке частоты на графике отображения фазы можно увидеть картину изменения фазы. Данный график представлен на рисунке 5.



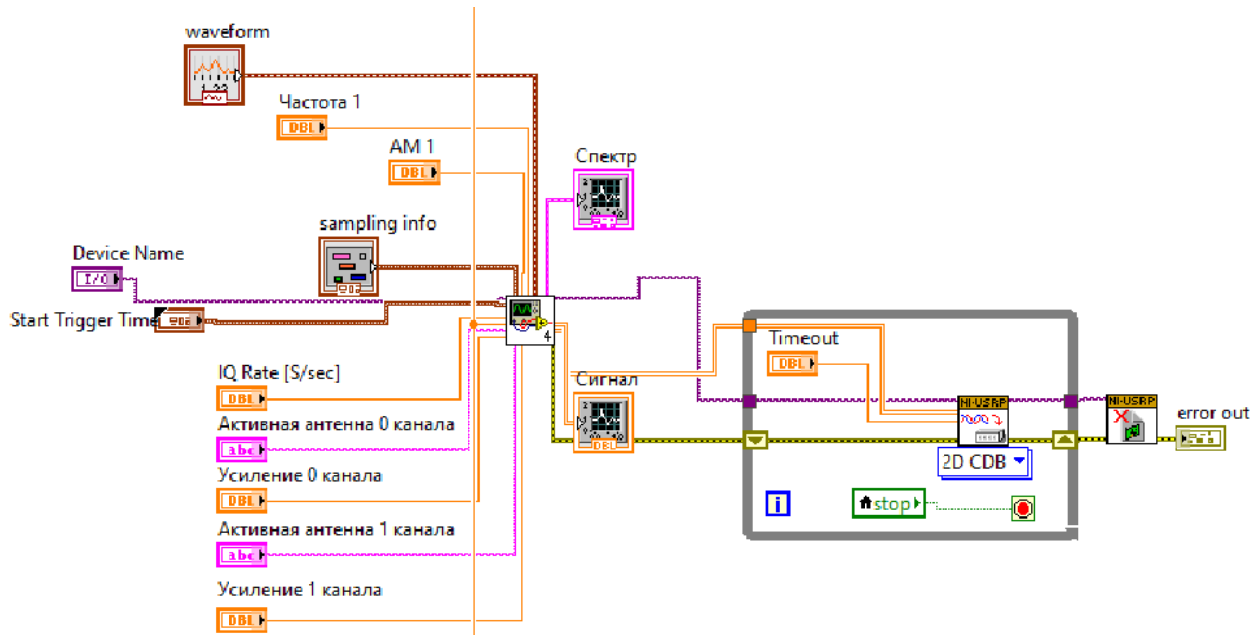


Рисунок 2 — Блок-диаграмма модели передатчика

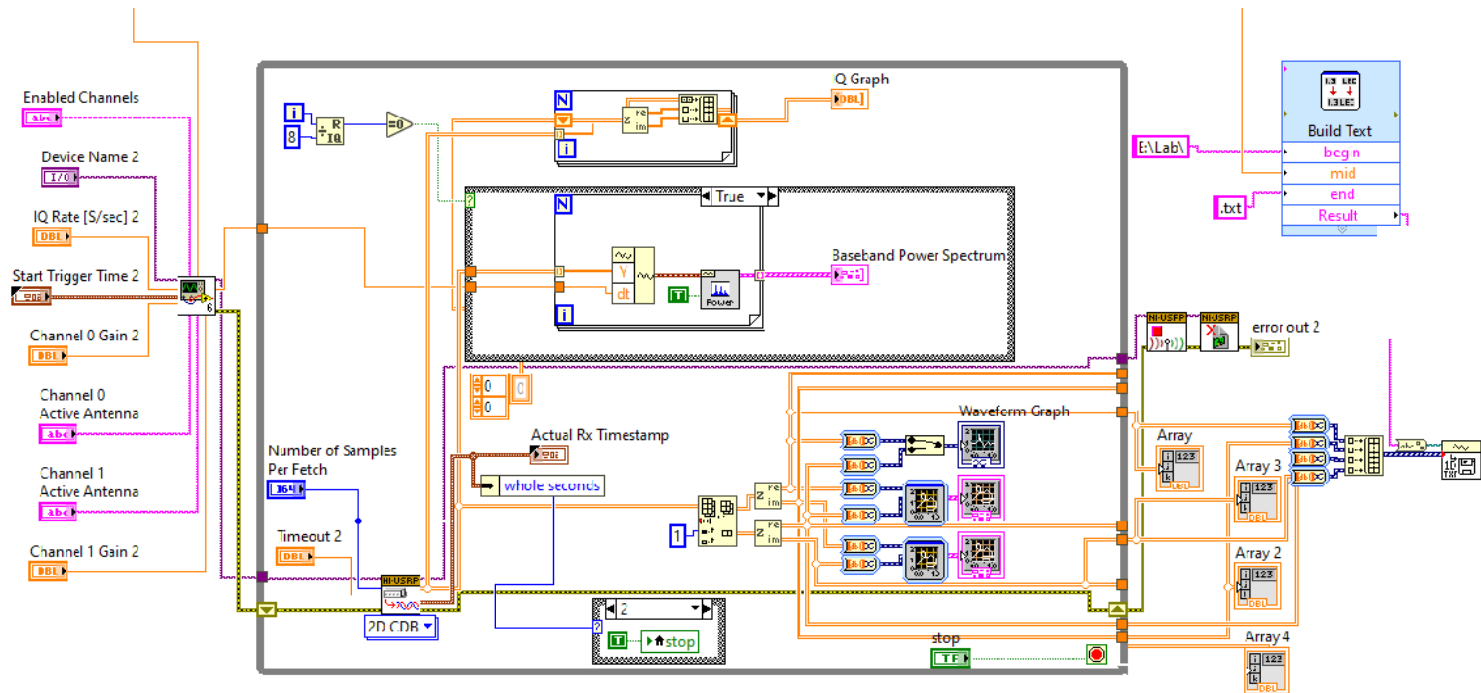


Рисунок 3 — Блок-диаграмма модели передатчика

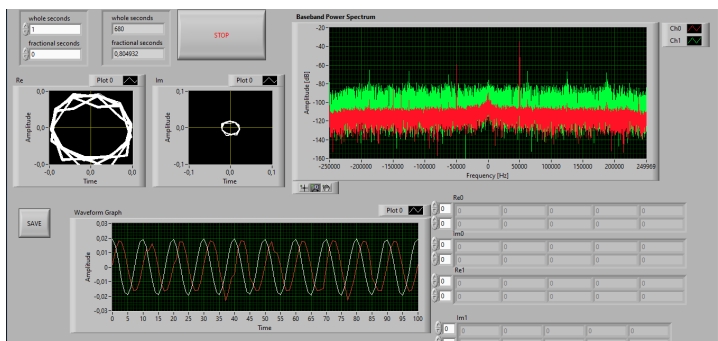


Рисунок 4 — Передняя панель блок-диаграммы

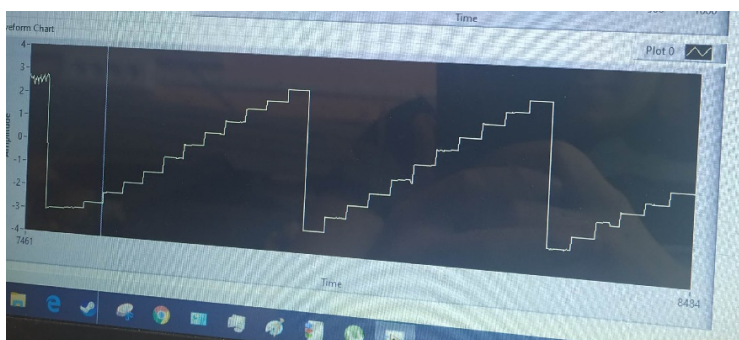


Рисунок 5 — Передняя панель разработанной модели с отображение фазы

После переноса всех данных в Mathcad-программу был построен график полной фазы сигнала (рисунок 6). По этому графику можно определить угол наклона и найти ошибку, построив график разницы между линейризованным графиком и реальным (рисунок 7).

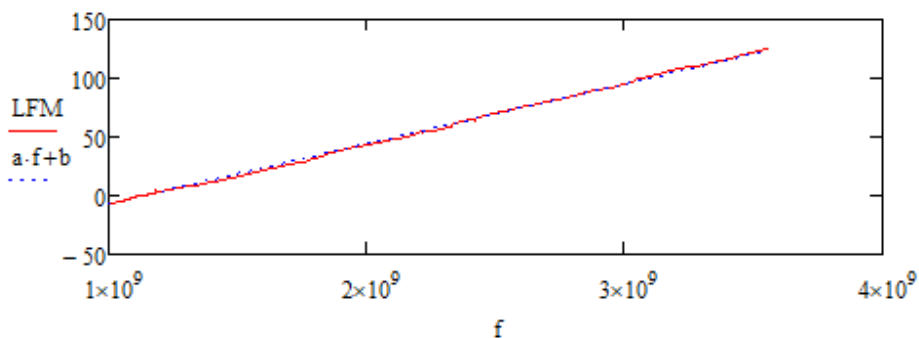


Рисунок 6 — График с линейризованной полной фазой и реальной полной фазой

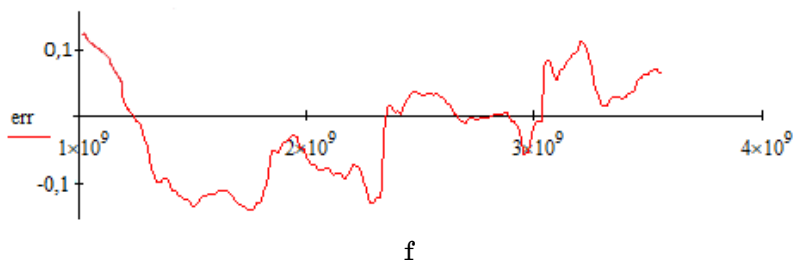


Рисунок 7 — График ошибок

Представленный на рисунке 8 график включает в себя зависимости полной фазы от частоты сигнала при разных длинах линии передачи.

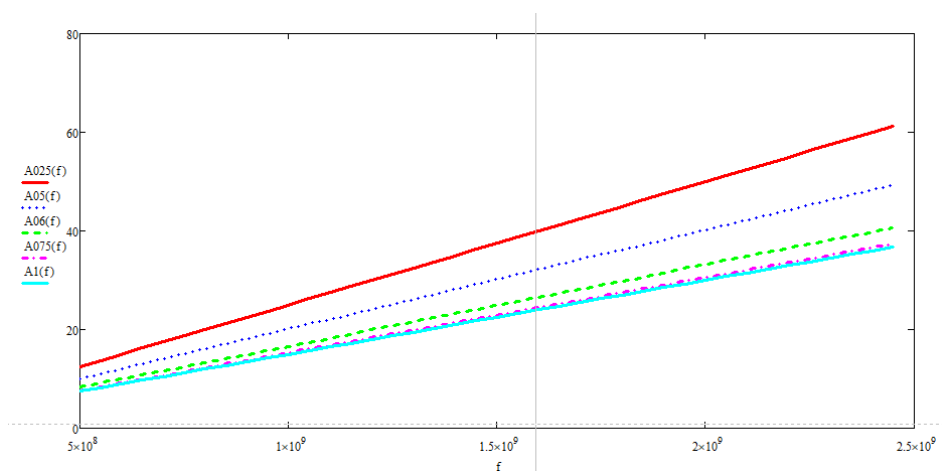


Рисунок 8 — Полная фаза сигнала в свободном пространстве

Для расчета расстояния применялось обратное преобразование Фурье, после чего был построен график импульсов отклика (рисунок 9). На данном графике расположены импульсы откликов сигнала при разнесении их на 30 см друг относительно друга (было установлено изначально).

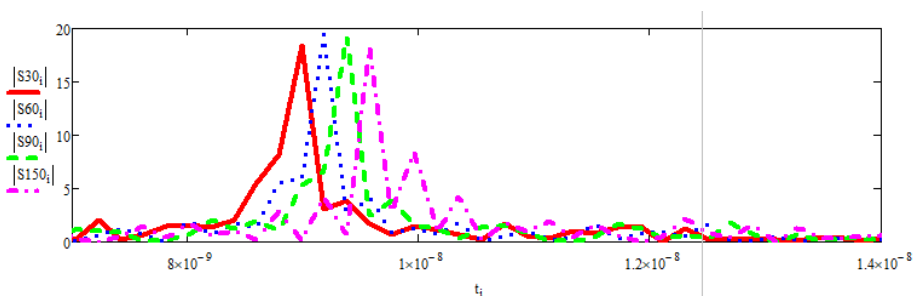


Рисунок 9 — График импульсов отклика

Для расчета разницы между откликами используем разницу между максимумами откликов и умножаем на постоянную распространения в линии передач. Результаты расчета длины линии передач представлены на рисунке 10.

$$(9.1796875e-009 - 8.984375e-009) \cdot c = 0.3 \text{ м}$$

$$(9.375e-009 - 9.1796875e-009) \cdot c = 0.3 \text{ м}$$

$$(9.5703125e-009 - 9.375e-009) \cdot c = 0.3 \text{ м}$$

Рисунок 10 — Скриншот из Mathcad программы с расчетом длины линии передач

Как видно из рисунка 10, расчет длины производится корректно, так как разница между первым и вторым импульсом ровно тридцать сантиметров, так же как между вторым и третьим и как между третьим и четвертым.

Результаты проделанной работы: адаптация разностного метода для измерения длины линии передач с помощью SDR-модуля USRP-2901; создание математической модели в среде Mathcad, реализующей расчет длины линии передач, а также скорости распространения электромагнитной волны.

### Список использованной литературы

1. Измерение разности фаз в СВЧ-диапазоне [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/138/20138/3351> (дата обращения: 25.07.2020).

2. Знакомьтесь: LabVIEW [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.ni.com/ru-ru/shop/labview.html> (дата обращения: 1.11.2019).

---

*Кузьменко Иван Юрьевич – кандидат технических наук, доцент, кафедра радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com.*

*Зайниев Александр Ильнорович – магистрант группы 148-М1, кафедра радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: king.2020@mail.ru.*

## Investigation of the Possibility of Using Sdr Radio in Radiophysics

*The article considers a rangefinder model developed in the LabVIEW programming environment, implemented using the USRP 2901 SDR module. The results are given.*

**Key words:** *Phase difference, transmission line, free space, mathematical model, time delay harmonic oscillations, full phase, USRP, software-defined radio.*

*Kuzmenko Ivan Yurievich – associate Professor, Department of Radio Electronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 40 Lenin Ave., Tomsk, 634050 Russia; e-mail: kuzmenko.ivan.yu@gmail.com*

*Zainiev Alexander Ilnarovich – undergraduate of group 148-M1, Department of Radio Electronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 40 Lenina Ave., Tomsk, 634050, Russia; e-mail: king.2020@mail.ru*

**УДК 551.507+551.508.8**

**Ю.Б. Попов, П.А. Карпушин, Н.П. Красненко,  
С.А. Кураков, А.С. Раков**

### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ КОМПЛЕКСОВ МУЛЬТИРОТОРНОГО ТИПА ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ РАДИОМЕТРИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПРОФИЛЯ АТМОСФЕРЫ**

*Рассматриваются возможности измерения вертикальных профилей параметров атмосферы: температуры и влажности, с использованием беспилотных летательных аппаратов на базе мультироторных аэромобильных платформ. Проводится сравнение данных измерений с измерениями метеорологического температурного профилемера МТР-5.*

**Ключевые слова:** *атмосфера, температурный профиль, мультикоптер, температурный профилемер.*

Состояние атмосферы как случайно-неоднородной среды определяется различными процессами, протекающими в её толще [1–3]. При этом для оценки характеристик распространяющихся в ней волн различной природы: электромагнитных или звуковых, анализа и прогнозирования работы радиотехнических систем различного назначения необходима информация о структуре атмосферы и динамике её

изменения как по вертикали, так и вдоль трассы распространения волн [3–5]. Использование дистанционных средств зондирования: активных и пассивных, позволяет определять её вертикальную структуру, но, как правило, в одной точке трассы, и какие-то отдельные параметры атмосферы. В частности, метеорологический температурный профилемер МТР-5 [6], использующий пассивный метод приема приходящего теплового радиоизлучения атмосферы на частоте поглощения кислорода с разных угломестных направлений, определяет вертикальный профиль температуры воздуха до высоты 1 км, обрабатывая измеренные сигналы по специальной программе. Профилемер МТР-5 утвержден как средство измерений, работает в диапазоне температур  $\pm 50$  °С, предел погрешности результата измерений 1,2 °С, дискретность представления профиля температуры в диапазоне высот от 0 до 100 м не более 25 м, а в диапазоне высот от 100 до 1000 м не более 50 м. Его измерения ранее сопоставлялись с радиозондовыми и содарными измерениями, измерениями на высотной метеомачте.

В последнее время в практических целях также стали широко использоваться различного типа беспилотные летательные аппараты (БПЛА). БПЛА (или иначе дроны), помимо выполнения традиционных задач по видео- и фотосъемке местности, могут выполнять геофизические и метеорологические задачи, в частности измерения параметров состояния атмосферы [7]. Для решения задач в области метеорологии, в частности для измерения вертикальных профилей метеопараметров, на наш взгляд, наиболее перспективным является применение БПЛА на базе мультироторных аэромобильных платформ (МАП), или мультикоптеров. Данный вид БПЛА является универсальной несущей платформой с широким спектром применения. Высокая стабильность в полете, устойчивость к ветровым нагрузкам, наличие программируемых бортовых навигационных устройств — все это позволяет использовать данный тип БПЛА в широком диапазоне метеорологических условий, в любое время суток, в режиме ручного управления и автономного полета. В научных публикациях обсуждаются ближайшие перспективы применения БПЛА для решения метеорологических задач, их преимущества и недостатки.

В качестве одной из таких задач рассматривается использование метеорологических БПЛА для верификации данных дистанционного зондирования (ДЗ). Оснащение МАП блоком измерительных метеодатчиков (БИМ) позволяет проводить контактные измерения вертикального профиля метеорологических параметров в атмосферном пограничном слое (АПС) при каждом подъеме и спуске аппарата. При этом высота измеренных профилей может достигать нескольких километров в зависимости от типа аппарата и погодных условий.

Актуальность этой задачи обусловлена ещё и тем, что данные средств дистанционного зондирования атмосферы всё более вовлека-

ются в процесс контроля и прогнозирования состояния атмосферы. Очевидно, что любые измерительные средства требуют проверки и калибровки, тем более средства дистанционного зондирования. С этой точки зрения БПЛА является универсальным и очень мобильным аппаратом, который может быть полезен для получения данных о состоянии атмосферы. Комплектация БПЛА метеорологическими датчиками различного назначения позволяет обеспечивать многоплановые измерения и быстро перенастраивать платформу под решение специфических задач. Развитие технологий зондирования с помощью метеорологических БПЛА дает возможность не только получать значительный объем данных, но и решать задачи фундаментальных исследований атмосферы на качественно новом уровне.

Таким образом, для верификации данных средств ДЗ, а также калибровки измерительной аппаратуры целесообразно использовать измерения, полученные контактными методами с помощью метеостанции, размещенной на МАП. Такие данные от МАП могут быть использованы как самостоятельно в качестве альтернативы аэрологическим измерениям, так и в комплексе с ними. При этом возможно создание автономной стационарной или передвижной локальной сети, обеспечивающей с помощью нескольких МАП периодические контактные измерения параметров пограничного слоя атмосферы вдоль заданной трассы или над какой-то территорией, что позволит осуществлять мониторинг и прогнозирование состояния атмосферы над выбранной территорией.

На основе разработанной в ИМКЭС СО РАН портативной автоматической электронной метеостанции, установленной на гексакоптере DJI (модель S900) и квадрокоптере Walkera Voyager 3 (рисунок 1,а,б), были реализованы макеты беспилотных измерителей метеопараметров атмосферы: температуры, влажности, давления, а также проведены их испытания. Испытания продемонстрировали возможность измерений строго вертикальных профилей метеопараметров. В отличие от шар-зонда, траектория которого зависит от ветра, МАП обеспечивали подъем с автоматическим удержанием аппарата над точкой старта по данным бортового приемника GPS. Кроме этого, имелась возможность выполнять горизонтальный полет над определенной территорией в ручном и программном режиме по заданной траектории. Вертикальное разрешение измерений зависит от скорости подъема и постоянной времени используемых датчиков. Во время экспериментальных полетов реализованных макетов измерителей вертикальное разрешение составляло 10–15 м. Полученные полетные данные позволили оценить достижимую высоту измерений с помощью использованных БПЛА, она не менее 3 км. При этом время подъема на данную высоту составило около 15 минут, а на спуск — около 8 минут. МАП может быть оперативно запущен несколько раз по заданной



трассе, что позволяет отслеживать динамику измеряемых профилей метеопараметров. Для сокращения времени регистрации быстропротекающих процессов в атмосфере можно использовать одновременно несколько МАП по схемам «воздушной этажерки» или конвейера. Измеренные значения метеопараметров сохраняются в памяти контроллера и могут быть считаны по USB или через SD-карту по завершению полёта. В перспективе данные могут передаваться с борта БПЛА в реальном времени в наземный центр регистрации и обработки данных по WiFi. В таблице приведены измеряемые метеорологические величины и их основные характеристики.



*а*

*б*

Рисунок 1 — Макет метеоизмерителя на БПЛА в полете (*а*) и на площадке крыши здания (*б*)

Таблица — Изменяемые метеопараметры

Изменяемая величина	Диапазон измерения	Погрешность
Температура воздуха, °С	минус 70 – плюс 55	$\pm 0,2$ при $T \leq 20$ °С $\pm 0,3$ при $T > 20$ °С
Относительная влажность воздуха, %	5–100	$\pm 2,5$ при $T > 0$ °С $\pm 5$ при $T < 0$ °С
Атмосферное давление, ГПа	500–1100	$\pm 0,5$ разрешение 0,0025

Проведенные испытания позволяют рассматривать МАП как эффективное средство для оперативных измерений профилей метеопараметров атмосферы, верификации и дополнения для дистанционных методов зондирования атмосферы.

Блок измерения метеопараметров (БИМ) может устанавливаться на различных типах мультикоптеров, удовлетворяющих требованиям по полетному весу, вертикальной и горизонтальной скорости полета. Требование к вертикальной скорости подъема составляет не менее

5 м/с для сопоставления с метеозондовыми измерениями, а горизонтальная скорость — не менее 20 м/с для возможности работы при сильном ветре. Предпочтительным является летательный аппарат с возможностью задания скорости спуска не менее 10 м/с.

При проведении верификации метеоизмерителей запуск БПЛА осуществлялся с поверхности земли, профилимер находился на крыше здания на высоте 18 м. Расстояние между измерителями составляло около 60 м. Полеты БПЛА осуществлялись до высоты 500 м.

По результатам комплексных экспериментов были проведены сравнения измерений вертикального температурного профиля атмосферы с помощью МАП и температурного профилимера МТР-5 при различных стратификациях атмосферы.

Некоторые результаты сравнительного сопоставления измерений при устойчивой стратификации атмосферы за 30.03.2019 г., 16.05.2019 г. и 20.05.2019 г. приведены на рисунке 2.

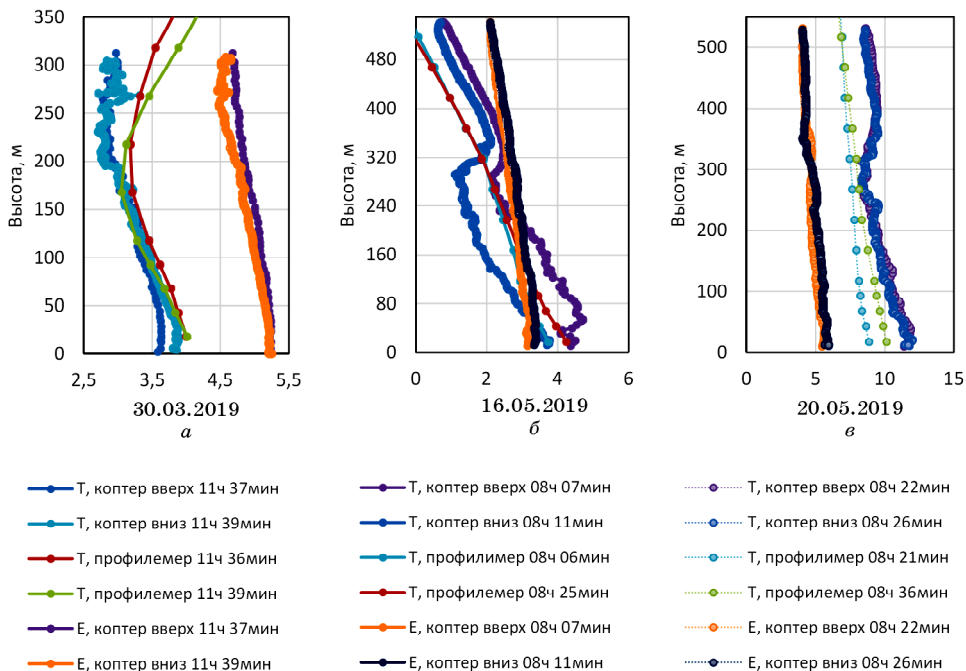


Рисунок 2 — Высотные профили температуры ( $T$ , °C) и абсолютной влажности ( $E$ , г/м<sup>3</sup>)

Как видно из рисунков, кривые профилимера более гладкие, что обусловлено меньшим пространственным и временным разрешением. Каждый профиль температуры выдается профилимером с дискретностью 5 минут. На рисунке 2,а БПЛА фиксируется слабая приземная температурная инверсия до высоты примерно 40 м и приподнятая с

нижней границей 200 м. Профилемер также фиксирует приподнятую инверсию, но данные по температуре с увеличением высоты расходятся. На рисунке 2,б БПЛА фиксирует наличие тонкого слоя приподнятой температурной инверсии на высотах 300-350 м, профилемер её не замечает. Также на рисунке 2,в БПЛА фиксирует приподнятую температурную инверсию на высотах 250–330 м, которая отсутствует на профилях температуры профилемера. При других стратификациях атмосферы кривые идут синхронно.

Результаты сравнений указывают на расхождение данных измерителей при устойчивой стратификации атмосферы и необходимость дополнительного набора экспериментальных данных с увеличенной высотой измерений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ-КЭС СО РАН.

### Список использованной литературы

1. Турбулентность, динамика атмосферы и климата : тр. междунар. конф., посвящ. памяти акад. А.М. Обухова / отв. ред. Г.С. Голицын, С.Н. Куличков, М.В. Курганский [и др.]. М. : ГЕОС, 2014. 696 с.

2. Моргунов В.К. Основы метеорологии, климатологии. Метеорологические приборы и методы наблюдений : учеб. Ростов/Д. : Феникс – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2005. 331 с.

3. Киселев О.Н. Мезомасштабные неоднородности коэффициента преломления в тропосфере и их влияние на распространение радиоволн УКВ-диапазона. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2007. 199 с.

4. Арсеньян Т.И. Распространение электромагнитных волн в тропосфере : учеб. пособие. Томск : Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2006. 170 с.

5. Красненко Н.П. Приземное распространение звуковых волн в атмосфере // Доклады ТУСУР. 2013. № 2(28), июнь. С. 86–92.

6. Кадыгров Е.Н., Кузнецова И.Н. Методические рекомендации по использованию дистанционных измерений пофилей температуры в атмосферном пограничном слое микроволновыми профилимерами: теория и практика. Долгопрудный : Физматкнига, 2015. 171 с.

7. Кураков С.А. Беспилотный измеритель вертикальных профилей метеопараметров в пограничном слое атмосферы / С.А. Кураков, В.В. Зуев // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 11. С. 994–999.

---

*Попов Юрий Борисович – кандидат технических наук, доцент, кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: rorovuib@mail.ru.*

*Карпушин Павел Александрович – старший преподаватель, кафедра радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: karpushinpa@yandex.ru.*

*Красненко Николай Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Кураков Сергей Анатольевич – научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: ksa@imces.ru.*

*Раков Александр Сергеевич – младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: dipole@ngs.ru.*

**The Use of Meteorological Unmanned Aircraft Complexes of Multipotor Type for Verification of Radiometric Measurements of the Atmospheric Temperature Profile**

*Possibilities of measuring vertical profiles of atmospheric parameters: temperature and humidity, using unmanned aerial vehicles based on multirotor airmobile platforms are considered. A comparison of the measurement data with the measurements of the meteorological temperature profiler MTP-5 is carried out.*

**Key words:** *atmosphere, temperature profile, multicopter, temperature profiler.*

*Popov Yuri Borisovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Telecommunications and Fundamentals of Radio Engineering, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: popovyub@mail.ru.*

*Karpushin Pavel Aleksandrovich – Senior Lecturer, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: karpushinpa@yandex.ru.*

*Krasnenko Nikolai Petrovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40; Chief Researcher, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems,*

*Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskii Ave., 10/3, email: krasnenko@imces.ru.*

*Kurakov Sergey Anatolyevich – Researcher, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskii Ave., 10/3, e-mail: ksa@imces.ru.*

*Rakov Alexander Sergeevich – Junior Researcher, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskii Ave., 10/3, e-mail: dipole@ngs.ru.*

**УДК 551.515+551.594.21**

**В.А. Жукова, Н.П. Красненко, К.Н. Пустовалов, А.С. Раков**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ  
НИЖНЕГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ В КАЧЕСТВЕ ПРЕДВЕСТНИКА  
ГРОЗ И ШКВАЛОВ**

*На основе данных метеорологических температурных профилей МТР-5 (радиометров) проанализирована пространственно-временная изменчивость температуры нижнего слоя атмосферы в период развития аномально ранних гроз и шквалов в районе г. Томска на юго-востоке Западной Сибири. Отмечено, что наибольшая плотность разрядов молний во время исследуемого события приходится не на центры зон с наиболее высокими температурами, а на их периферийные части, где отмечаются большие контрасты изменения температур.*

**Ключевые слова:** атмосфера, термическая стратификация, гроза, шквал, температурный профилимер.

Опасные явления погоды, такие как грозы и шквалы, связанные с зонами активной конвекции, относятся к мезомасштабным метеорологическим явлениям. Они образуются в результате сложного взаимодействия атмосферных процессов синоптического масштаба и подстилающей поверхности [1]. Грозы и шквалы коротки по времени воздействия и локальны в пространстве, поэтому сложно поддаются оперативной регистрации стандартными способами. Исключением являются данные метеорологических радаров (МРЛ), но МРЛ расположены редко и, в частности, на территории Западной Сибири не образуют наблюдательную сеть. Зачастую факт явления фиксируется по его окончанию с помощью данных визуальных наблюдений на метеостанциях и данных дистанционного зондирования Земли из космоса.

Грозы и шквалы могут существенно влиять на работу радиотехнических систем различного назначения. Точность прогноза гроз и шквалов современными методами остается недостаточно высокой. Все это и определяет трудности в регистрации, изучении и прогнозировании опасных явлений погоды, связанных с зонами активной конвекции. Поэтому во всем мире продолжают исследования возникновения гроз и шквалов, ведутся разработки и усовершенствования методов их прогнозирования [1].

Целью данной работы было изучение пространственно-временной изменчивости температуры нижнего слоя атмосферы в период развития аномально ранних гроз и шквалов в районе г. Томска на юго-востоке Западной Сибири как возможного предвестника.

В качестве индикатора термической стратификации атмосферы применялся метеорологический температурный профилемер МТР-5, использующий пассивный метод приема приходящего теплового радиоизлучения атмосферы на частоте поглощения кислорода с разных угломестных направлений для определения вертикального профиля температуры воздуха до высоты 1 км путем обработки измеренных сигналов по специальной программе.

Для анализа синоптической ситуации и полей облачности над рассматриваемым регионом привлекались синоптические карты с фронтальным анализом [2] и спутниковые изображения (RGB-композиции) на основе данных спектрорадиометра MODIS (космические аппараты «Terra» и «Aqua») [3].

Использовались данные двух температурных профиломеров, установленных на территории ИМКЭС СО РАН в Академгородке г. Томска и на полигоне ТУСУРа в п. Аникино. Расстояние от ИМКЭС СО РАН до п. Аникино составляет ~ 10 км. Данные МТР-5 представляются в виде значений температуры на высотах от 0 до 1000 м через каждые 50 м с временной дискретностью в 5 мин. Погрешность измерения температуры не превышает 0,5 °С [4]. При этом высота 0 м соответствует высоте установки прибора над уровнем земли. Важной характеристикой атмосферы для оценки изменения конвективной неустойчивости в пункте исследования является показатель термической стратификации атмосферного пограничного слоя (АПС) — вертикальный градиент температуры ( $\gamma_t$ , °С/100 м), который вычислялся по данным профиломера МТР-5 для различных слоёв.

Для оценки грозовой деятельности на исследуемой территории были использованы данные о координатах разрядов молний, полученные Всемирной грозопеленгационной сетью WWLLN [5]. Кроме того, привлекались данные мониторинга градиента потенциала электрического поля в приземной атмосфере, полученные на геофизической обсерватории ИМКЭС СО РАН с помощью электростатического флюксметра CS110. Временное разрешение прибора составляет 1 с,

что позволяет регистрировать наличие конвективных облаков и разряды молний в окрестностях пункта мониторинга на основе их известного отклика в электрическом поле [6, 7].

Оценка пространственного распределения полей температуры и конвективной неустойчивости над исследуемой территорией осуществлялась на основе данных реанализа ERA5, являющегося пятым поколением реанализа глобальных атмосферных наблюдений, созданным Европейским центром среднесрочных прогнозов (ECMWF) [8]. Реанализ ERA5 обладает высоким пространственным ( $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ ) и временным (1 час) разрешением и хорошо воспроизводит температурные поля. В данном исследовании использовались данные реанализа ERA5 о температуре воздуха, а также индексов неустойчивости KI и CAPE. Авторами работы [9] для прогноза гроз над Сибирью были получены оптимальные пороговые значения индексов неустойчивости атмосферы.

В качестве примера ниже приведена пространственно-временная изменчивость температуры атмосферы в пунктах наблюдения за 30 апреля 2019 г. В этот день наблюдались аномально ранние для юго-востока Западной Сибири грозы и шквалы, достигающие критериев ОЯ [10]. Непосредственно перед и во время рассматриваемого события над юго-востоком Западной Сибири фиксировались значительные пространственно-временные изменения многих метеорологических и геофизических величин, обусловленные смещением далеко на север полярного основного фронта и кратковременным вторжением тропической воздушной массы, последующим прохождением холодного фронта и наступлением арктической воздушной массы.

Согласно рисунку 1,а поле температуры воздуха на уровне 1000 гПа в 7:00 UTC над юго-востоком Западной Сибири было очень контрастным. Температура воздуха по Томской области изменялась в диапазоне от минус 4 °C на северо-западе до +21 °C на юге области. При этом ярко прослеживался «язык» тепла, вытянутый с юго-запада на северо-восток, обусловленный адвекцией тепла. Положению данного «языка», в целом, соответствуют очаги сильной неустойчивости, хорошо проявляющиеся в полях KI и CAPE (рисунок 1,б,в). При этом как поле температуры, так и поля KI и CAPE в пределах тёплого сектора являются очень пёстрыми и распадаются на отдельные очаги и языки. Разряды молний по данным WWLLN за 07:00–08:00 UTC подтверждают наличие неустойчивости в атмосфере.

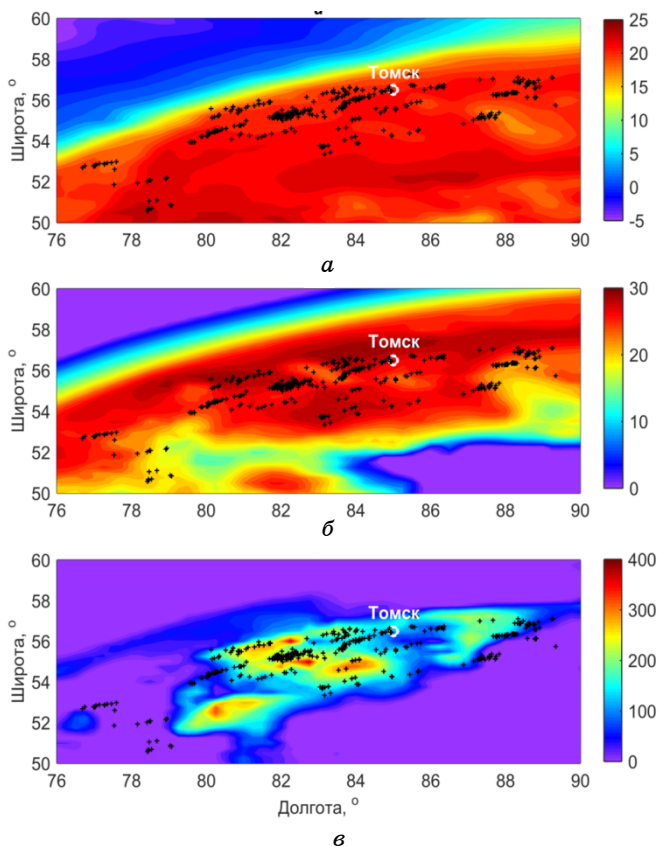


Рисунок 1 — Пространственное распределение температуры ( $^{\circ}\text{C}$ ) воздуха на уровне 1000 гПа за 7:00 UTC и разряды молний по данным WWLLN за 07:00–08:00 UTC (*a*), KI( $\epsilon\text{C}$ ) за 7:00 UTC (*б*), CAPE (Дж/кг) за 7:00 UTC 30.04.2019 г.

Высотно-временные изменения температуры за 30.04.2019 г. показаны на рисунках 2,*a* и 2,*б*. В течение дня, когда проводились измерения термической структуры нижнего километрового слоя атмосферы на территории ИМКЭС СО РАН и в п. Аникино с помощью профиломеров МТР-5, температура в этом слое характеризовалась значительной внутрисуточной изменчивостью. Минимальные значения температуры воздуха фиксировались с 12:00 ч до 15:10 ч местного времени на высотах 0–500 м и составляли 15–22  $^{\circ}\text{C}$ , а максимальные — на высотах от 600 до 1000 м и составляли примерно 8–10  $^{\circ}\text{C}$ . Изменение вертикального градиента температуры воздуха рассматривалось в слое от 0 до 50 м (рисунки 2,*в*,*г*). Начиная с 12:00 ч, вертикальный градиент температуры был равен  $\sim 1^{\circ}/50$  м, что характеризовало атмосферу как неустойчивую. Далее наблюдались два резких пика высоких значений вертикального градиента температуры:



первый в 13:50 ч, и второй в 15:10 ч. Второй пик соответствовал прохождению полярного атмосферного фронта, тогда как первый пик был проявлением облачности внутримассового характера. В случае первого скачка профиля вертикального градиента он составил  $2,18 \text{ }^\circ/50 \text{ м}$  и  $1,38 \text{ }^\circ/50 \text{ м}$  на территории ИМКЭС СО РАН и в п. Аникино соответственно.

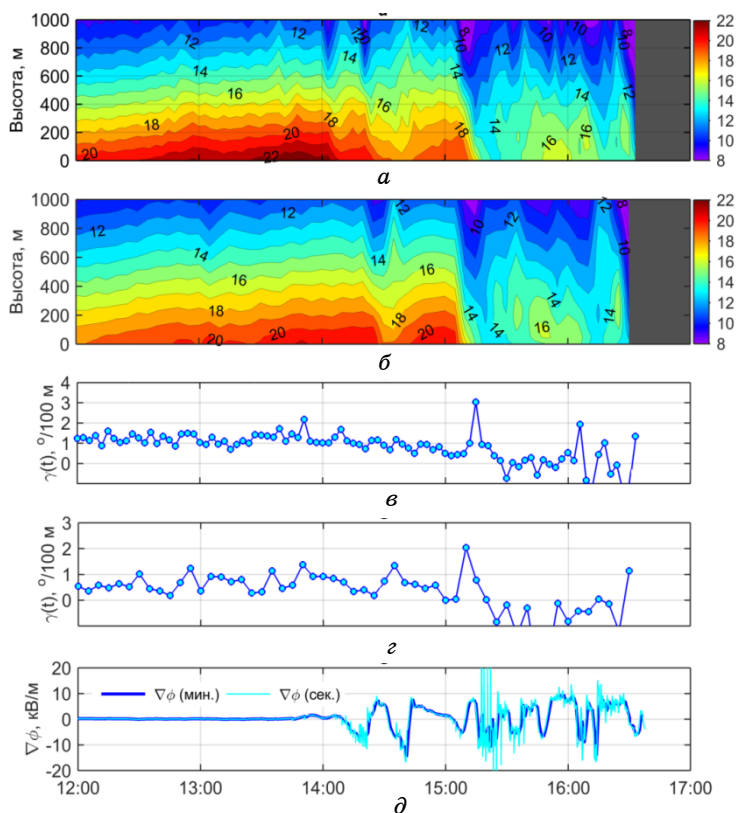


Рисунок 2 — Профили распределения температуры атмосферы в пункте ИМКЭС СО РАН (а) и пункте Аникино (б); вертикальных градиентов в ИМКЭС СО РАН (в) и в Аникино (д), градиента потенциала электрического поля (е) с 12:00 до 17:00 по местному времени за 30.04.2019 г.

Данные профиля градиента потенциала электрического поля (рисунок 2,д) подтверждают наличие внутримассовой облачности. Можно проследить также два подъема: это короткопериодные в 13:50 ч и длиннопериодные разряды в 15:10 ч, которые соответствуют внутримассовой кучево-дождевой облачности и прохождению атмосферного фронта соответственно.

На основании проведенного анализа синоптических, метеорологических и микрофизических условий сделан вывод, что ситуация, которая наблюдалась в атмосфере г. Томска 30.04.2019 г., способствовала крайне неустойчивому состоянию нижнего слоя атмосферы, что в свою очередь приводит к образованию ранних гроз и шквалов. Это позволяет надеяться, что мониторинг термической стратификации нижней атмосферы позволит прогнозировать появление таких опасных явлений.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИМ-КЭС СО РАН.

### Список использованной литературы

1. Ершова Т.В., Горбатенко В.П., Клипова О.А. Термодинамические параметры атмосферы при грозах и ливнях // Вестник ТГПУ. 2012. С. 9–14.
2. Гидрометцентр России. Синоптические карты с фронтальным анализом [Электронный ресурс]. URL: <https://meteoinfo.ru/mapsynop>.
3. EOSDISWorldview [Электронный ресурс]. URL: <https://worldview.earthdata.nasa.gov/>.
4. Кадыгров Е.Н., Крученицкий Г.М., Лыков А.Д. Количественные оценки возмущений, вносимых мегаполисом в поле температуры атмосферного пограничного слоя // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43, № 1. С. 1–13.
5. WWLLN – World Wide Lightning Location Network [Электронный ресурс]. URL: <http://webflash.ess.washington.edu>.
6. Pustovalov K.N., Nagorskiy P.M. Response in the Surface Atmospheric Electric Field to the Passage of Isolated Air Mass Cumulonimbus Clouds // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 2018. V. 172. P. 33–39.
7. Rakov V.A., Uman M.A. Lightning: Physics and Effects. New York : Cambridge Univ. Press, 2003. 687 p.
8. Copernicus Climate Change Service [Электронный ресурс]. URL: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/search?type=dataset>.
9. Индексы неустойчивости атмосферы и их пороговые значения, оптимальные для прогноза гроз над Сибирью / В.П. Горбатенко [и др.] // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 2 (368). С. 44–59.
10. ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС». Перечень опасных явлений [Электронный ресурс]. URL: <http://www.meteo-nso.ru/pages/115>.

---

*Жукова Вера Андреевна – аспирантка 1-го года, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения*

Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: e-mail: jukowa.vera2017@yandex.ru.

*Красненко Николай Петрович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40; главный научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Пустовалов Константин Николаевич – научный сотрудник, кандидат физико-математических наук, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: const.pv@yandex.ru*

*Раков Александр Сергеевич – младший научный сотрудник, Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, 634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3, e-mail: dipole@ngs.ru.*

### **Study of Temperature Stratification of the Lower Atmosphere Layer as a Precursor of Thunderstorm and Squalls**

*Based on the data of meteorological temperature profilers MTP-5 (radiometers), the spatial-temporal variability of the temperature of the lower atmosphere during the development of anomalously early thunderstorms and squalls in the region of Tomsk in the southeast of Western Siberia was analyzed. It is noted that the highest density of lightning discharges during the event under study falls not on the centers of zones with the highest temperatures, but on their peripheral parts, where large contrasts of temperature changes are noted.*

**Key words:** *atmosphere, thermal stratification, thunderstorm, squall, temperature profiler.*

*Zhukova Vera Andreevna – 1st year postgraduate student, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskij Ave., 10/3, e-mail: e-mail: jukowa.vera2017@yandex. ru.*

*Krasnenko Nikolai Petrovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40; Chief Researcher, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskij Ave., 10/3, e-mail: krasnenko@imces.ru.*

*Pustovalov Konstantin Nikolaevich – Researcher, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskij Ave., 10/3, e-mail: const.pv@yandex.ru.*

*Rakov Alexander Sergeevich – Junior Researcher, Institute for Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 634055, Tomsk, Akademicheskij Ave., 10/3, e-mail: dipole@ngs.ru.*

## Секция 2. РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

---

УДК 621.396.969.182.3

В.П. Денисов, Д.В. Дубинин, Д.В. Ерофеев

### ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ДЛЯ УГЛОВОГО РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ В МНОГОБАЗОВЫХ ФАЗОВЫХ ПЕЛЕНГАТОРАХ

*Показано, что угловое разрешение источников сигналов в фазовых пеленгаторах с антенными системами в виде линейных решеток из слабонаправленных элементов может быть получено путем определения для каждого из источников своего набора полных периодов разностей фаз, утраченных при измерениях. Показано, что метод максимального правдоподобия, развитый для оценки угла прихода одного сигнала, пригоден для углового разрешения сигналов. Показана общность оснований для углового разрешения методом максимального правдоподобия и методом «суммирования косинусов». Даны оценки точности пеленгования принимаемых сигналов.*  
**Ключевые слова:** разность фаз, разрешающая способность, метод максимального правдоподобия.

#### Введение

Рассматривается угловая разрешающая способность фазовых радиопеленгаторов, то есть способность одновременно пеленговать два или более источника радиоизлучения. Фазовый пеленгатор понимается в традиционном смысле [1]. Его простейшая структурная схема приведена на рисунке 1. В англоязычной литературе подобное устройство называют интерферометрами. Предполагается, что элементы антенной системы слабонаправленные, так что могут одновременно принимать сигналы из широкого углового сектора.

Разность фаз сигналов  $\varphi$  на антеннах пеленгатора и угол прихода  $\alpha$  на пеленгатор плоской волны связаны известным соотношением

$$\Phi = \varphi + 2\pi k = 2\pi \frac{l}{\lambda} \sin \alpha, \quad (1)$$

где  $\Phi$  — полная разность фаз;  $l$  — расстояние между фазовыми центрами антенн (фазометрическая база);  $\lambda$  — длина волны;  $k$  — число полных периодов разности фаз, утрачиваемых при фазовых измерениях.

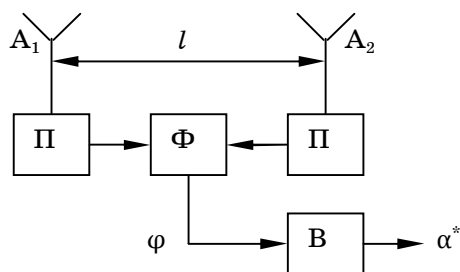


Рисунок 1 — Простейший фазовый радиопеленгатор:  
 $A_1$ ,  $A_2$  — антенны;  $\Pi$  — приемники;  $\Phi$  — фазометр;  $B$  — вычислитель

В фазовых пеленгаторах с антенными системами из слабонаправленных элементов отыскание  $k$  (разрешение неоднозначности фазовых измерений) производится путем применения ряда разнесенных антенн и последующей обработки совокупности измеренных разностей фаз. Разные подходы к разрешению неоднозначности фазовых измерений можно найти в [2–5].

Схожесть терминов «угловое разрешение» и «разрешение неоднозначности измерений» заставляет нас подчеркнуть, что предмет рассмотрения статьи — угловая разрешающая способность. Разрешение неоднозначности фазовых измерений затрагивается в свете решения поставленной задачи.

Вопросы угловой разрешающей способности радиопеленгаторов с антенными решетками широко обсуждаются в литературе, причем акценты делаются на сверхразрешение. Алгоритмы сверхразрешения основаны на вычислении корреляционной матрицы сигналов с выходов элементов решетки [7]. Для реализации такой возможности приемные тракты должны быть линейными, чтобы не исказить фазовые и амплитудные соотношения сигналов.

В фазовых пеленгаторах линейность приемных трактов не требуется. Как правило, они включают в себя ограничители сигналов по амплитуде для увеличения точности фазовых измерений. Кроме того, обзорные фазовые пеленгаторы беспойсковые по углу. Указанные особенности приводят к их широкому применению в системах радиоэлектронной борьбы [8, 9]. Придание фазовым пеленгаторам свойства углового разрешения улучшает их оперативные возможности. Реально угловое разрешение проявляется в способности пеленгования сигналов, одновременно попадающих в полосу пропускания приемника.

### Постановка задачи

В настоящее время для расчета пеленга по совокупности разностей фаз, измеряемых между элементами антенной системы, находит применение метод максимального правдоподобия, разработанный для

условий, когда на вход пеленгатора поступает одна плоская волна, а погрешности измерения разности фаз случайны и подчиняются нормальному закону распределения.

Предположим, что антенная система пеленгатора представляет собой линейную решетку из  $N$  элементов и на ней образовано  $n = N - 1$  фазометрических баз, как показано на рисунке 2.

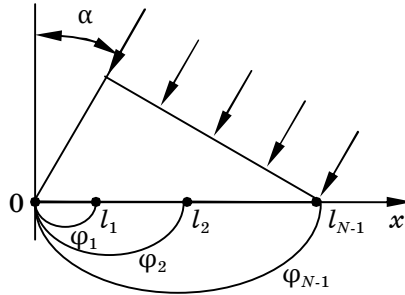


Рисунок 2 — Антенная система пеленгатора

Если на входе пеленгатора одна плоская волна, а фазовые погрешности на базах независимы и имеют равные дисперсии  $\sigma_\varphi^2$ , плотность распределения вероятностей совокупности  $n$  измеренных разностей фаз, которую далее будем рассматривать как функцию правдоподобия параметра  $v = \sin \alpha$ , имеет вид

$$L_\varphi(v) = \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_\varphi}} \right)^2 \cdot \exp \left\{ -\sum_{i=1}^n \frac{(\varphi_i + k_i - n_{xi}v)^2}{2\sigma_\varphi^2} \right\}, \quad (2)$$

где  $\varphi_i$  — измеренная разность фаз на базе  $l_i$ ; выраженная в рад/2 $\pi$ ,  $n$  — число фазометрических баз,

$$n_{xi} = l_i / \lambda .$$

Решая уравнение правдоподобия  $\frac{d}{dv} L_\varphi(v) = 0$  получаем

$$v = \sum_{i=1}^n q_i \Phi_i = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + 2\pi k_i), \quad (3)$$

где  $v = \sin \alpha$  — направляющий косинус приходящей волны по отношению к оси  $x$  (см. рисунок 2);  $\Phi_i$  — полная разность фаз на базе  $l_i$ ;  $\varphi_i$  — измеренная разность фаз на базе  $l_i$ ;  $\vec{q} = (q_1, q_2, \dots, q_n)$  — вектор весов, зависящий от структуры антенной системы и корреляционной матрицы фазовых погрешностей [3].

Формула (3) позволяет вычислить направляющий косинус падающей волны. Предварительно необходимо найти полное число периодов разностей фаз на измерительных базах. Соответствующие алгоритмы можно найти в [2, 3].

Для наглядного представления вида функции правдоподобия предположим, что истинное значение синуса пеленга  $\nu = 0$ , разность фаз на базах равна нулю. Последнее предположение означает, что в конкретной совокупности измеренных разностей фаз  $\varphi_i$  погрешности измерений отсутствуют. При сделанных допущениях целое число периодов разностей фаз в формуле (3) на измерительных базах

$$k_i = [n_{xi}\nu],$$

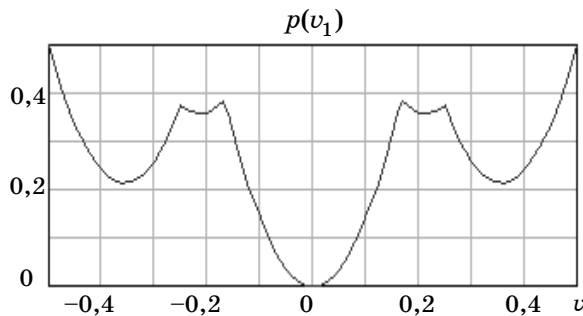
где знак  $[\bullet]$  означает округление до ближайшего целого.

Функцию правдоподобия (2) можно записать в виде

$$L_{\bar{\varphi}}(\nu_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_{\varphi}^2} \sum_{i=1}^n (n_{xi}\nu_1 - [n_{xi}\nu_1])^2 \right\}. \quad (4)$$

На рисунке 3,а представлен показатель степени формулы (4), являющийся достаточной статистикой функции правдоподобия, а на рисунке 3,б — функция правдоподобия  $L_{\bar{\varphi}}(\nu)$  для антенной решетки

с относительными базами  $n_{x1} = \frac{l_1}{\lambda} = 1$ ,  $n_{x2} = \frac{l_2}{\lambda} = 2$ ,  $n_{x3} = \frac{l_3}{\lambda} = 3$ . Кривая на рисунке 3,б, так же как и другие изображения функции правдоподобия в данной статье, нормирована к максимальному значению. Видно, что как один, так и другой график имеют экстремумы, точно соответствующие  $\nu = 0$ .



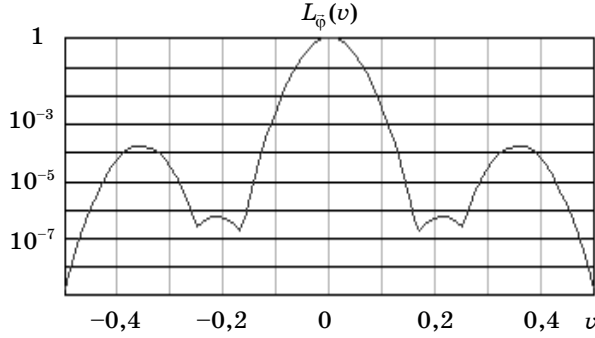
а

Рисунок 3 — Показатель степени функции правдоподобия (3),

$\bar{n}_x = (1, 2, 3)$ ,  $\nu = 0$  (а); функция правдоподобия (3),

$\bar{n}_x = (1, 2, 3)$ ,  $\nu = 0$  (б) (начало, окончание см. на с. 88)





б

Рисунок 3 — Окончание (начало см. на с. 87)

В дальнейшем для краткости письма структуру баз будем задавать вектором-строкой  $\vec{n}_x$ . В данном случае  $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$ .

Применим изложенный подход к ситуации, когда на входе пеленгатора присутствуют две плоские волны.

### Теоретическая часть

Предположим, что на антенную систему приходят сигналы от двух (или более) источников радиоизлучения (ИРИ). Они создают единую совокупность измеренных разностей фаз  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$ . Вычисление направляющего косинуса каждой из волн возможно по формуле (3) за счет определения для каждой из них своего набора полных периодов разностей фаз на фазометрических базах  $k_1, k_2, \dots, k_n$ . Это положение является основой для рассматриваемого ниже алгоритма. Направляющие косинусы каждой из волн при таком походе определяются с некоторой ошибкой.

Пусть на антенную систему пеленгатора (см. рисунок 2) падают две плоские одинаково поляризованные волны одной частоты под углами  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  к нормали. Воспользовавшись формулами для фазы результирующего сигнала в точке  $x$  антенной решетки [3], определим разность фаз сигналов на произвольной базе  $l_i$

$$\Phi_i = \frac{2\pi}{\lambda} l_i v_1 + \operatorname{arctg} \frac{2R \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[ \frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cdot \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[ \frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}, \quad (5)$$

где  $v_1 = \sin \alpha_1$ ,  $\alpha_1$  — угол прихода первой волны;  $v_2 = \sin \alpha_2$ ,  $\alpha_2$  — угол прихода второй волны;  $R = \frac{U_2}{U_1}$  — отношение амплитуд волн;  $\gamma$  — разность фаз приходящих волн на антенне  $A_0$ .

Будем считать, что амплитуда первой волны всегда больше, чем второй, так что  $U_2 / U_1 < 1$ . Случай равенства амплитуд не рассматривается, как маловероятный.

Формула (3) представляет разность фаз сигналов на базе  $l_i$  в виде суммы двух слагаемых.

$$\Phi_i = \Phi_{1i} + \Delta\Phi_i. \quad (6)$$

Первое слагаемое  $\Phi_{1i} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot l_i v_1 = \varphi_i + 2\pi k_i$  — разность фаз, которую создавал бы на базе  $l_i$  более сильный сигнал, если бы он был один,  $|\varphi_i| < \pi$ .

Второе слагаемое  $\Delta\Phi_i$  состоит из целого числа периодов разности фаз  $2\pi \cdot \Delta k_i$  и дробной части периода

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_i = \\ = \arctg \frac{2R \sin \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] + R^2 \sin \left[ \frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}{1 + 2R \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) + \gamma \right] \cos \left[ \frac{\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right] + R^2 \cos \left[ \frac{2\pi \cdot l_i}{\lambda} (v_2 - v_1) \right]}. \end{aligned} \quad (7)$$

Это слагаемое зависит от базы  $l_i$  разности пеленгов источников радиоизлучения  $v_2 - v_1$  и разности фаз сигналов  $\gamma$  этих источников на антенне  $A_0$ . По предположению  $R < 1$ , так что аргумент арктангенса с учетом возможных знаков числителем и знаменателем формулы (7) не превосходит  $\pm\pi$ .

Заметим, что разность фаз  $\gamma$  может быть постоянной, если излучения пеленгуемых источников когерентны. Такая ситуация возможна, когда пеленгуется так называемая «парная цель», специально организованная в процессе РЭБ [10]. Для пеленгаторов, работающих в системах радиомониторинга или радиотехнической разведки более вероятна ситуация, когда пеленгуются независимые источники, и, следовательно, их излучения некогерентны. Практически это означает, что разность фаз  $\gamma$  случайная величина, изменяющаяся во времени, распределенная равномерно на интервале  $\pm\pi$ .

Заметим, что классические критерии разрешения (Релея, Вудворда) сформулированы для некогерентных источников сигналов [11].

Применим метод максимального правдоподобия к рассматриваемой ситуации, когда на входе пеленгатора присутствуют две плоские волны, так что разность фаз на базах определяется формулой (5). Напишем функцию правдоподобия направляющего косинуса более сильного сигнала  $v_1$ , считая направляющий косинус второго сигнала, разность фаз сигналов  $\gamma$  и отношение амплитуд  $R$  фиксированными параметрами.

При таком подходе добавка  $\Delta\Phi_i$  к измеряемой разности фаз формально выступает как погрешность измерений угла прихода более сильного сигнала.

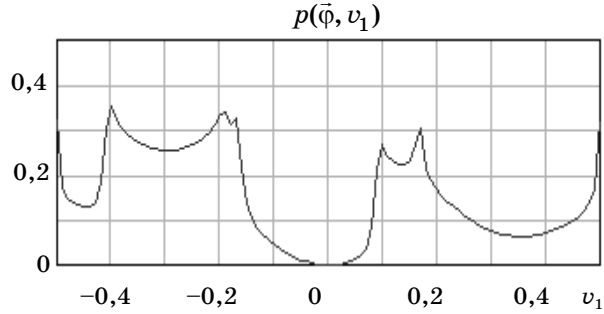
Как и ранее, будем считать, что погрешности фазовых измерений распределены по нормальному закону с равными дисперсиями  $\sigma_\Phi^2$  и не коррелированы от канала к каналу. Получим

$$L_\Phi(v_1) = K \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_\Phi^2} \cdot \sum_{i=1}^n \left( n_{xi}v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i - [n_{xi}v_1 + \Delta\Phi_i - \Phi_i] \right)^2 \right\}, \quad (8)$$

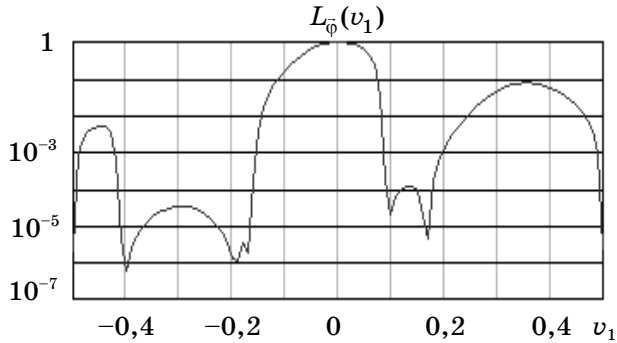
где  $\Delta\Phi_i$  определяется формулой (7), в которой  $v_1$  — текущее значение синуса пеленга более сильного сигнала;  $\Phi_i$  определяется формулой (5), в которой  $v_1$  истинное значение параметра,  $[\bullet]$  означает округление до ближайшего целого.

На рисунке 4, а, б показаны функции правдоподобия  $L_\Phi(v_1)$  и показатель степени функции (8) вычисленные для антенной решетки  $\vec{n}_x = (1, 2, 3)$ ,  $v_1 = 0$ ,  $v_2 = 1/3$ ,  $\gamma = 0$ . Разнос источников  $v_2 - v_1 = 1/3$  соответствует Релеевскому критерию разрешения для данной антенной решетки.

Видно, что как один, так и другой графики имеют четкие экстремумы, соответствующие положению целей. В обоих случаях экстремумы значительно превышают боковые лепестки функции правдоподобия, сигналы разрешаются. Таким образом, метод максимального правдоподобия, оптимальный для оценки угла прихода единственного сигнала на входе пеленгатора, оказался работоспособным и для случая, когда сигналов два, и способен их разрешать.



a



б

Рисунок 4 — Показатель степени функции правдоподобия (8),

$$\bar{n}_x = (1, 2, 3), v_1 = 0, v_2 = \frac{1}{3}, \gamma = 0, R = 0,9 \text{ (a);}$$

функция правдоподобия (8),  $\bar{n}_x = (1, 2, 3)$ ,

$$v_1 = 0, v_2 = \frac{1}{3}, \gamma = 0, R = 0,9 \text{ (б)}$$

Функция правдоподобия (8) существенно зависит от разности начальных фаз сигналов  $\gamma$ . Чтобы подчеркнуть данную зависимость запишем  $L_{\bar{\varphi}}(v_1) = L_{\bar{\varphi}}(v_1, \gamma)$ . В приведенных построениях мы полагали  $\gamma = 0$ , тогда сигналы разрешаются. При некоторых других значениях  $\gamma$  разрешение отсутствует. Для устранения зависимости функции правдоподобия от  $\gamma$  усредним ее по  $\gamma$ , считая эту величину распределенной равномерно на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

$$\overline{L_{\bar{\varphi}}(v_1)} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} L_{\bar{\varphi}}(v_1, \gamma) d\gamma. \quad (9)$$

Черта над  $L_{\bar{\varphi}}(v_1)$  в левой части равенства означает усреднение.

На рисунке 5 приведена функция (9), рассчитанная для тех же значений  $v_1, v_2, R$ , что и график на рисунке 4,б. Усреднение выполнено

численным методом по 1000 значениям  $\gamma$ , равномерно распределенным на интервале  $[-\pi, \pi]$ .

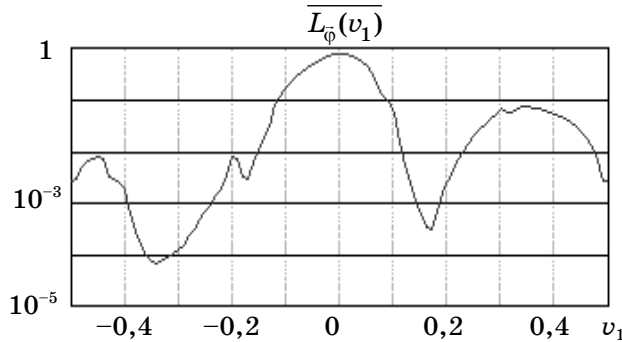


Рисунок 5 — Усредненная по  $\gamma$  функция правдоподобия  $L_{\bar{\varphi}}(v_1)$ ,

$$\bar{n}_x = (1, 2, 3), v_1 = 0, v_2 = 1/3, \gamma = 0, R = 0,9$$

Видно, что усредненная функция имеет четкие максимумы, соответствующие положению обеих целей. Сигналы разрешаются.

Приведенные выкладки и графики показывают принципиальную возможность использования функции правдоподобия более сильного сигнала для углового разрешения двух сигналов. Однако достаточно быстродействующий алгоритм практической реализации такой возможности пока не разработан.

Покажем, что некоторые характеристики разрешения сигналов на основе функции правдоподобия близки к получаемым при обработке сигналов методом «суммирования косинусоид» [2]. Его разрешающая способность рассмотрена в статье [14], а пример практической реализации с учетом необходимости усреднения по разности начальных фаз  $\gamma$  в монографии [3].

При наличии на входе пеленгатора одной волны пеленг методом «суммирования косинусоид» находится по максимуму суммы

$$S_{\bar{\varphi}}(v) = \sum_{i=1}^n A_0 \cos(2\pi \cdot n_{xi}v - \varphi_i), \quad (10)$$

где  $\varphi_i$  — разность фаз на  $i$ -й базе.

Функция правдоподобия  $L_{\bar{\varphi}}(v)$  и «сумма косинусоид» имеют одинаковую структуру. Действительно, если  $\varphi_i = 0$ , то с учетом неоднозначности фазовых измерений функция правдоподобия выражается формулой (4). На рисунке 6,а показано изменение сомножителей функции (7) в зависимости от  $v_1$

$$y(v_1) = K \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma_\varphi^2} (n_{xi}v_1 - [n_{xi}v_1])^2 \right\}. \quad (11)$$

На рисунке 6,б одно из гармонических слагаемых функции (10) соответствующего масштаба

$$S_1(v_1) = A_0 \cos(2\pi n_{x1}v_1). \quad (12)$$

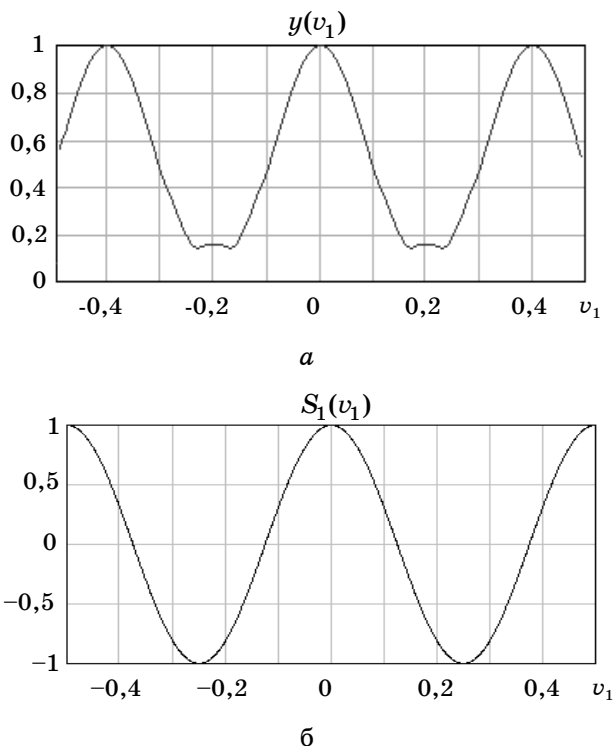


Рисунок 6 — Один из сомножителей функции правдоподобия (7)  $n_{x3} = 3$  (а); одно из гармонических слагаемых функции (10)  $n_{x3} = 3$  (б)

Положение максимумов функций на оси  $v_1$  совпадают. Заметим, что в области максимумов, там, где справедливо разложение  $\cos(2\pi n_{xi}v) = 1 - (2\pi n_{xi}v)^2$ , сумма косинусоид точно аппроксимирует показатель степени функции правдоподобия (4). Вследствие этого «сумма косинусоид» (10) обеспечивает получение эффективной оценки пеленга при условии, что сигнал на входе один [2].

Основное различие заключается в том, что  $S_1(v_1)$  (12) имеет отрицательные полуволны, а функция  $y(v_1)$  (11) их не имеет. В связи с этим различаются и функции  $L_{\bar{\varphi}}(v)$  (4) и «сумма косинусоид». На

рисунке 7 показана «сумма косинусоид» (10) для тех же условий, для которых построены графики на рисунках 3, 4. Различие в области минимумов весьма значительно. Вместе с тем положение целых определяется по максимумам функций, которые формируются похожими компонентами и расположены в одних и тех же точках на оси  $v_1$ .

Поэтому по данным, полученным с помощью «суммы косинусоид», можно судить о характеристиках разрешения методом максимального правдоподобия.

«Сумма косинусоид», помимо основного лепестка, имеет побочные, меньшие основного. Эти лепестки образуются путем суммирования «косинусоид», максимумы которых расположены симметрично справа и слева от него.

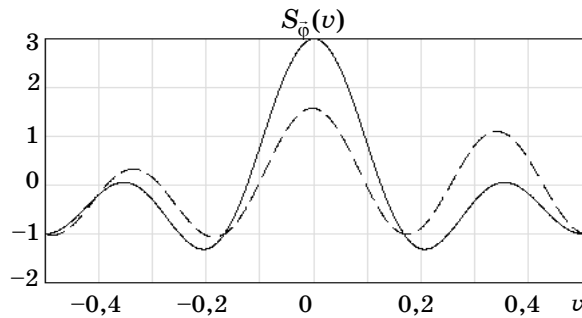


Рисунок 7 — «Сумма косинусоид»:

— — при воздействии одного сигнала на входе,  $v_1 = 0$ ;

- - - - при воздействии двух сигналов на входе,  $v_1 = 0$ ,  $v_2 = \frac{1}{3}$

Положение побочного максимума относительно главного найдем по формуле (3)

$$\Delta v = \sum_{i=1}^n q_i (\varphi_i + k)_i,$$

где  $|\varphi_i| \leq 0,5$ .

При суммировании оказывается, что в побочных максимумах дробные части полной разности фаз компенсируются  $\sum_{i=1}^n q_i \varphi_i = 0$ .

Так что

$$\Delta v = \sum_{i=1}^n q_i k_i, \quad (13)$$

То есть положение каждого побочного максимума относительно главного соответствует определенному набору целых чисел, которые

в монографии [3] названы векторами неоднозначности  $\vec{k}_i$ . Данное утверждение распространяется на минимумы «суммы косинусоид» и побочные максимумы функции правдоподобия.

Дадим объяснение данному факту. В статье [13] показано, что если на входе пеленгатора два сигнала и  $\gamma = 0$ , «сумма косинусоид» представима в виде

$$S_{\varphi}(v) = (R + 1) \sum_{i=1}^n \frac{\cos[2\pi n_{xi}(v - v_1)]}{\sqrt{B_i}} + R \sum_{i=1}^n \frac{\cos[2\pi n_{xi}(v - v_2)]}{\sqrt{B_i}},$$

где  $B_i = 1 + R^4 + 4(R + R^2 + R^3) \cos^2[2\pi n_{xi}(v_2 - v_1)] + 2R^2 \cos[2\pi n_{xi}(v_2 - v_1)]$ .

Следовательно, функция  $S_{\varphi}(v)$  — это сумма откликов пеленгатора на воздействие «сильной» и «слабой» цели, различающихся лишь параметром  $v_i$  и амплитудными коэффициентами. Если главный максимум отклика «слабой» цели располагается в точке максимума (минимума) «сильной», то его побочный максимум (минимум) совпадает с главным максимумом «сильной». Положение главных максимумов «сильной» и «слабой» цели в сумме  $S_{\varphi}(v)$  при этом не изменяется. Это утверждение имеет место и при пеленговании некогерентных сигналов по усредненному значению  $S_{\varphi}(v)$ .

Поскольку в статье оно строго не доказано, проверим его выполнение на конкретном примере. Для примера возьмем 11-базовый пеленгатор с эквидистантной антенной решеткой  $\vec{n}_x = (1, 2, 3, \dots, n)$ , рассматриваемый в [3]. Из приведенного в ней рисунка следует, что первый побочный максимум «суммы косинусоид» расположен в точке  $v = 0,107$ , первый минимум — в точке  $v = 0,152$ , третий минимум — в точке  $v = 0,326$ .

Векторы неоднозначности, соответствующие данным экстремумам,  $\vec{k}_1 = (0, 0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$ ,  $\vec{k}_2 = (0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 2, 2)$ ,  $\vec{k}_3 = (0, 1, 1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 4)$ .

Весовые коэффициенты в (2) для данной антенной решетки вычисляются по формуле [3]

$$q_i = \frac{i}{\sum_{i=1}^n i^2}.$$



Вычисления по формуле (13) дают: первый максимум  $v_1 = 0,1085$ , первый минимум  $v_1 = 0,149$ , третий минимум  $v_1 = 0,329$ . Расхождение расчетных и гипотетических значений не превышает 1,5 %. Расхождение объясняется тем, что метод «суммирования косинусоид» неточно реализует алгоритм (13) в силу нелинейности слагаемых.

При наличии на входе пеленгатора двух сигналов более слабый из них мало влияет на точность пеленгования более сильного, что следует из формулы (3). Полученные соотношения позволяют оценить точность пеленгования более слабой из разрешаемых целей. Учтем, что главный максимум функции правдоподобия («суммы косинусоид») всегда соответствует положению более сильной цели. Предположим, что «слабая» цель отстоит от более сильной на целое число интервалов между главным максимумом суммы косинусоид и одним из побочных максимумов (минимумов), когда цель одна. В этом случае погрешность пеленгования вообще отсутствует. В силу соотношения (3) максимальная погрешность пеленгования «слабой» цели при ее произвольном положении на оси  $v_1$  равна половине интервала между соседними максимумом и минимумом.

### Результаты численного эксперимента

Рассмотрим пеленгатор с эквидистантной антенной решеткой и вектором баз  $\vec{n}_x = (1, 2, 3, \dots, n)$ . Если на такой пеленгатор воздействует одна плоская волна, «сумма косинусоид» описывается формулой [13]:

$$S_{\varphi}(v_1) = n \cos \left[ (n+1) \pi n_{x1} v_1 \right] \frac{\sin(n \pi n_{x1} v_1)}{n \sin(\pi n_{x1} v_1)}.$$

Из этой формулы следует, что интервал между соседними минимумом и максимумом  $\Delta v_{mm}$  определяется примерным соотношением

$$\Delta v_{mm} = \frac{1}{2n+1}.$$

Следовательно, погрешность пеленгования «слабой» цели не должна превосходить

$$\Delta v_{\text{погр}} = \frac{1}{2(2n+1)}. \quad (14)$$

Интервал однозначного пеленгования по самой большой базе  $\Delta v_{\text{одн}}(l_n) = \frac{1}{n}$ . Максимальная погрешность пеленгования «слабой» цели не превосходит четверти этой величины.

На рисунке 8 показаны погрешности пеленгования «сильной» и «слабой» целей  $v_{\text{изм}} - v_{\text{ист}}$  в зависимости от положения последней для 11-базового пеленгатора  $\bar{n}_x = (1, 2, \dots, 11)$ . Видно, что при расположении «слабой» цели в максимумах и минимумах кривой  $S_{\varphi}(v)$  (10) погрешности пеленгования равны нулю. Они максимальны в середине интервала между ними и при этом не превышают максимальной расчетной величины (14). Погрешности пеленгования более «сильной» цели значительно (в разы) меньше, чем «слабой».

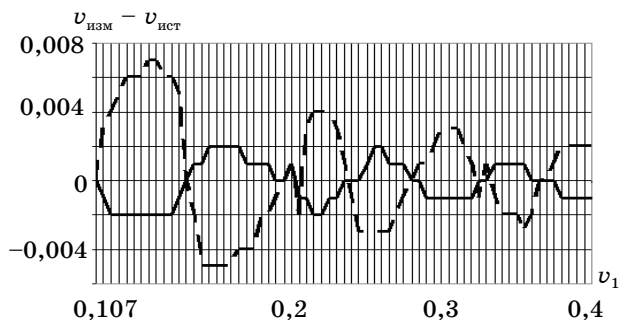


Рисунок 8 — Погрешности пеленгования «сильной» и «слабой» целей:

—— — «сильная» цель; - - - - — «слабая» цель

### Обсуждение результатов

По мнению авторов, в статье получены следующие интересные результаты.

1. Показано, что при наличии на входе фазового радиопеленгатора с антенной системой в виде линейной решетки двух плоских волн их угловое разрешение возможно на основе сопоставления каждой из них своей совокупности полных разностей фаз, утраченных при измерениях. Таким образом, угловое разрешение в фазовых радиопеленгаторах тесно связано с устранением неоднозначности фазовых измерений.

2. Показано, что при наличии на входе пеленгатора двух плоских волн функция правдоподобия более сильного из них может использоваться для углового разрешения. Если волны не когерентны, требуется усреднение функции правдоподобия по разности фаз принимаемых волн.

3. Проведен сравнительный анализ углового разрешения на основе функции правдоподобия и методом «суммирования косинусоид». В основе каждого из алгоритмов лежат похожие функции, поэтому относительно просто реализуемый метод «суммирования косинусоид» можно использовать для оценки характеристик разрешения методом максимального правдоподобия.

4. Оценена точность пеленгования более «слабой» цели, которая, как известно, в нелинейной системе давится более сильной. Показано, что в эквидистантных решетках максимальная ошибка пеленгования не превосходит  $j$  интервала однозначного пеленгования по самой большой фазометрической базе.

### Заключение

Приведенные результаты носят теоретический характер. Однако они дают основание к поиску приемлемых технических решений для углового разрешения сигналов на основе метода максимального правдоподобия. Кроме того, они показывают, что практически реализуемый метод «суммирования косинусоид» в отношении углового разрешения сигналов близок к методу максимального правдоподобия.

Работа выполнена в рамках проекта по госзаданию Минобрнауки РФ № FEWM-2020-0039.

### Список использованной литературы

1. Теоретические основы радиолокации : учеб. пособие для вузов / А.А. Коростелев [и др.] ; под ред. В.Е. Дулевича. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Сов. радио, 1978. 608 с.
2. Белов В.И. Теория фазовых измерительных систем. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 1994. 102 с.
3. Денисов В.П., Дубинин Д.В. Фазовые радиопеленгаторы. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2002. 251 с.
4. Кинкулькин И.Е. Глобальные навигационные спутниковые системы: алгоритмы функционирования аппаратуры потребителя. М. : Радиотехника, 2018. 325 с.
5. Lipsky S.E. Microwave passive direction finding. Raleigh, USA: SciTech Publishing, Inc., 2004. 320 p.
6. Verhagen S., Teunissen P.J.G. New Global Navigation Satellite System Ambiguity Resolution Method Compared to Existing Approaches // Journal of Guidance Control and Dynamics. 2006. Vol. 29, № 4. P. 981–991.
7. Ратынский М.В. Адаптация и сверхразрешение в антенных решетках. М. : Радио и связь, 2003. 200 с.
8. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М. : Вузовская книга, 2011. 800 с.
9. Смирнов Ю.А. Радиотехническая разведка. М. : Военное издательство, 2006. 454 с.
10. Леонов А.И., Фомичев К.И. Моноимпульсная радиолокация. 2-е изд., перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1984. 312 с.
11. Хургин Я.И., Яковлев В.П. Фinitные функции в физике и технике. М. : Наука, 1971. 408 с.

12. Патент РФ 2536440 МПК G 01 S 3/46. Фазовый пеленгатор / Смирнов В.Н. (РФ), Шереметьев А.В. (РФ), Кульпин С.Н. (РФ), Тимофеев М.Н. (РФ), Иванов В.В. (РФ). № 2 013 125 080 / 07; заявл. 29.05.13; опубл. 27.12.14, Бюл. № 36. – 12 с.

13. Денисов В.П., Дубинин Д.В., Ерофеев Д.В. Вопросы разрешающей способности фазовых радиопеленгаторов с антенными системами в виде линейных решеток // Доклады ТУСУР. Томск : Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники. 2017. Т. 20, № 4. С. 11–16. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-11-16

---

*Денисов Вадим Прокопьевич – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: dvp15@sibmail.com.*

*Дубинин Дмитрий Владимирович – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры радиоэлектроники и систем связи, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: dmitrii.v.dubinin@tusur.ru.*

*Ерофеев Денис Вадимович – аспирант кафедры радиотехнических систем, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, e-mail: erofeev\_dv@mail.ru.*

### **Application of the Maximum Likelihood Method for the Angular Resolution of Signals in Multibase Phase Direction Finders**

*It is shown that the angular resolution of signal sources in phase direction finders with antenna systems in the form of linear arrays of weakly directional elements can be obtained by determining for each of the sources its own set of total periods of phase differences lost during measurements. It is shown that the maximum likelihood method developed for estimating the angle of arrival of one signal is suitable for the angular resolution of signals. The commonality of the foundations for the angular resolution by the method of maximum likelihood and the method of "summation of cosines" is shown. Estimates of the accuracy of direction finding of the received signals are given.*

**Key words:** *phase difference, resolution, maximum likelihood method.*

*Denisov Vadim Prokopyevich – Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor of the Department of Radio Engineering Systems, Tomsk State University of Control Systems and Radio Electronics, 634050, Tomsk, Lenin Ave., 40, e-mail: dvp15@sibmail.com.*

*Dubinin Dmitry Vladimirovich – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Radioelectronics and Communication Systems, Tomsk State University of Control Systems*