

АННОТАЦИЯ

диссертационной работы на тему:

«Исследование методов анализа сигналов и определения местоположения ИРИ для систем радиомониторинга на базе низкоорбитальных МКА»,
представленной на соискание степени доктора философии (PhD) по специальности «6D071900 - Радиотехника, электроника и телекоммуникации»
КУЛАКАЕВА АЙГУЛЬ ЕРГАЛИЕВНА

Актуальность темы и научная проблема исследования. В эпоху стремительного технологического развития для улучшения благосостояния граждан, а также социально-экономической стабильности государства, формирование и становление цифровой экономики в Республике Казахстан приобретает особую значимость. Так, в соответствии с Государственной программой «Цифровой Казахстан», утвержденной Постановлением Правительства Республики Казахстан от 12 декабря 2017 года № 827 и Стратегическим планом развития Республики Казахстан до 2025 года, утвержденным Указом Президента Республики Казахстан от 15 февраля 2018 года № 636, одним из ключевых направлений является расширение покрытия сетей связи и развитие информационно-коммуникационной инфраструктуры, а также создание «Умных» городов. Кроме того, развитие и внедрение стандарта мобильной связи 5-го поколения (5G) помимо широкополосного доступа предусматривает возможность поддержки различного рода датчиков, обеспечивающих сбор разнообразной информации в рамках реализации технического концепта Интернета вещей. Развитие данных направлений потребует сбора, передачи и обработки огромного объема различной информации, которая приведет к активному внедрению и росту новых беспроводных (радио) технологий. Такая тенденция непременно увеличит спрос на использование радиочастотного спектра (РЧС) как для действующих, так и для новых внедряемых радиоэлектронных средств (РЭС). Это в свою очередь значительно усложнит электромагнитную обстановку в условиях дефицита РЧС и потребует совершенствования функций и механизмов радиоконтроля использования РЧС. РЧС является важным национальным ограниченным природным ресурсом, который требует рационального и эффективного использования, имеет большое социальное и экономическое значение для каждой страны. В связи с этим задача повышения эффективности систем радиомониторинга не теряет своей актуальности.

Управление радиочастотным спектром и радиомониторинг тесно связаны между собой. Результаты радиомониторинга очень важны при управлении РЧС на национальном и международном уровнях. Основным назначением систем радиомониторинга является периодический или постоянный контроль использования РЧС. В Республике Казахстан в соответствии со статьей 28.5 Закона «О связи» Республики Казахстан от 5 июля 2004 года функций и задачи радиомониторинга возложены на Службу эксплуатации систем радиомониторинга при РГП «Государственная радиочастотная служба» (РГП «ГРС») Министерства цифрового развития, инноваций и аэрокосмической

промышленности Республики Казахстан (МЦРИАП). Служба эксплуатации систем радиомониторинга является основным помощником уполномоченного органа по управлению использованием РЧС в его работе по распределению, выделению и присвоению РЧС. В связи с этим очень важна роль результатов работы систем радиомониторинга. К тому же Международный союз электросвязи (МСЭ) рекомендует проводить мониторинг РЧС круглосуточно, так как большинство РЭС используют РЧС почти непрерывно.

Действующая национальная система радиомониторинга Республики Казахстан свои функции и задачи осуществляет только на базе наземных систем радиоконтроля, которая состоит из:

- 24 стационарных (19 - обслуживаемых пунктов и 5 - необслуживаемых пунктов);
- 15 передвижных измерительно-пеленгационных пунктов;
- 2 мобильных измерительных комплекса реализованных на базе аппаратно-программных средств российского производства (ЗАО «ИРКОС» и ООО «СТЦ»), работающих в диапазоне частот от 30 МГц до 3ГГц;
- 4 мобильных комплекса для измерения сигналов беспроводной связи (Rohde&Schwarz, Ascom);
- 3 мобильных комплекса для измерения сигналов телерадиовещания (Rohde&Schwarz, Promax).

Однако наземные системы радиомониторинга имеют ряд недостатков, например:

- ограниченная зона радиодоступности систем радиоконтроля из-за особенностей распространения радиоволн разных диапазонов частот, рельефа местности, электромагнитной обстановки и т.д;
- трудоемкость и сложность проведения процедур радиоконтроля в неблагоприятных климатических условиях, особенно в северных районах страны;
- недостаточное количество радиоконтрольных пунктов по всей территории страны (общая площадь страны 2724,9 тыс. км), а также технический и моральный износ радиоизмерительного оборудования;
- наземные системы радиоконтроля расположены в основном в крупных городах и областных центрах, следовательно в малонаселенных пунктах практически отсутствует периодический или постоянный радиоконтроль за электромагнитной обстановкой и использованием РЧС;
- недостаточная автоматизация процессов систем радиоконтроля.

Кроме того, следует учитывать, что дефицит РЧС наблюдается в крупных городах, где очень сложно с помощью наземных средств радиоконтроля проконтролировать занятость и загруженность РЧС. С помощью наземных средств радиоконтроля обеспечение полной, оперативной достоверной информацией о реальном состоянии РЧС в условиях мегаполиса является трудно реализуемым, а управление использованием РЧС в масштабах страны является еще более сложным.

К тому же особенно остро стоит вопрос перед действующей национальной системой радиомониторинга земных станций спутниковой связи (ЗССС),

например, в самом широкоиспользуемом традиционном Ku-диапазоне (10.7-12.5 ГГц, 12.75-14.5 ГГц), что связано с особенностью диаграммы направленности антенн земных станций. Так, по предварительным данным РГП «ГРС», в Республике Казахстан через группировку национальных спутников связи «KazSat-2» и «KazSat-3» работают более 10 тысяч ЗССС посредством казахстанских операторов связи, а также существуют трудности с определением количества земных станций, работающих через иностранные спутники связи на геостационарной орбите.

В настоящее время МЦРИАП Республики Казахстан рассматривает возможность использования новых зарубежных негеостационарных спутниковых систем связи таких как Starlink, OneWeb, SES для обеспечения казахстанских пользователей широкополосным доступом к сети Интернет. Также в апреле 2021 года АО «Республиканский центр космической связи», подведомственное предприятие Аэрокосмического комитета МЦРИАП и оператор SES подписали меморандум о взаимопонимании. В рамках данного меморандума планируется совместная работа в сфере предоставления услуг спутниковой связи с использованием системы O3b mPOWER. В состав таких систем будут входить сотни и тысячи спутников, а также огромное количество центральных станций и абонентских терминалов, которые могут предоставлять различные услуги широкополосной связи в еще более «высоких» полосах частот 17,7- 20,2 ГГц (космос-Земля), 27,5 – 30,0 ГГц (Земля – космос), которые сложно контролировать с помощью наземных средств радиоконтроля.

Одним из оптимальных способов решения проблемы повышения эффективности и расширения зоны контроля систем радиомониторинга Республики Казахстан является внедрение спутниковых систем радиомониторинга на базе низкоорбитальных малых космических аппаратов (МКА). Спутниковые системы радиомониторинга на базе низкоорбитальных МКА обладают такими преимуществами, как широкий обзор и отсутствие недоступных для радиомониторинга участков земной поверхности. Также следует отметить, что такие системы могут быть полезны для решения проблем с приграничными странами, которые связаны с обеспечением электромагнитной совместимости, а также проведением процедур международной координации частотных присвоений по заданию МСЭ. К тому же такие системы можно использовать в любых климатических условиях и с любым рельефом местности, вне зависимости от времени года и суток.

С помощью таких систем можно осуществлять измерения и получение следующей информации:

- о количестве РЭС, которые функционируют в интересующем нас диапазоне частот;
- соответствуют ли параметры РЭС требованиям нормативных документов и разрешению на использование РЧС;
- поиск незаконно действующих РЭС.

При проведении процедуры радиомониторинга параметрами, подлежащими радиоконтролю могут быть как диапазон и ширина полосы частот, напряженность поля, плотность потока мощности, координаты источника

радиоизлучений, параметры модуляции, параметры нежелательных излучений и т.д. Эти данные могут в той или иной мере помочь правильно решить многие задачи, которые связаны с рациональным использованием и регулированием национального РЧС.

Степень разработанности научной проблемы. Вопросами регулирования и мониторинга использования радиочастотного ресурса, в том числе экономическими аспектами использования радиочастотного спектра и методами определения местоположения источника радиоизлучения занимались такие ученые как: Рембовский А.М., Макаров В.В., Володина Е.Е., Ноздрин В.В., Кизима С.В., Ашихмин А.В., Козьмин В.А., Слободянюк П.В., Благодарный В.Г., Андреев Р. Н., Конкин В. В., Мухин И. Е., Хмелевская А. В., Бабанин И.Г., Липатников В.А., Царик О.В., Харченко И.П., Бакулев П.А., Белоцерковский Г.Б., Ворошилин Е.П., Миронов М.В., Громов В.А., Тихвинский В.О, Mazar H., Navarro A., Restrepo J., Souryal M., Zhang J., Chen D., Dexiu H.U., Musicki D., Koch W., Ho K.C., Lu X., Chang D.C., Zhang, Hurtado W., Wang M., Li C., Zhao M.L., Yao G., Mark J.W. и другие. Также существенный вклад в изучение проблемы использования низкоорбитальных МКА в системах радиомониторинга внесли следующие ученые: Пикуль А.И., Хегай Д. К., Шпак А.В., Вознюк В.В., Зайцев С.А., Инчин А.С., Айтмагамбетов А.З., Chen X., Wang M., Zhang L., Ellis P., Dowla F. и другие.

Однако в данных научных трудах вопросы регулирования и мониторинга использования радиочастотного спектра рассматриваются в основном на базе наземных систем радиомониторинга, а все проведенные исследования, связанные с использованием низкоорбитальных МКА в качестве системы радиомониторинга, рассматривались фрагментарно.

Объектом исследования является система спутникового радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА для Республики Казахстан.

Предметом исследования является анализ сигналов и разработка метода определения местоположения источников радиоизлучения системой спутникового радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА.

Основная идея работы заключается в разработке требований к системе спутникового радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА, в разработке метода определения местоположения ИРИ и его имитационной модели для оценки соответствия параметров излучения наземных радиоэлектронных средств нормам разрешительных документов на использование радиочастотного спектра, а также для выявления незаконно работающих РЭС на территории Республики Казахстан.

Цель диссертации: на основе анализа возможности применения низкоорбитальных МКА для осуществления радиомониторинга использования РЧС на территории РК, обосновать методы анализа сигналов от источников радиоизлучений, разработать методы определения местоположения ИРИ и имитационную модель для определения местоположения наземных источников радиоизлучения с помощью системы спутникового радиомониторинга.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- определить проблемные вопросы и обосновать необходимость создания системы спутникового радиомониторинга на базе низкоорбитальных МКА на основе анализа современного состояния систем радиомониторинга;
- дать оценку энергетического бюджета радиолиний для систем радиомониторинга на базе низкоорбитальных спутников и обосновать необходимость создания системы спутникового радиомониторинга;
- оценка реальных уровней радиосигналов низкоорбитальных спутников на примере существующих низкоорбитальных спутниковых систем для обоснования создания спутниковой системы радиомониторинга;
- провести анализ методов определения местоположения источников радиоизлучения;
- разработать новые методы для определения местоположения источников радиоизлучения на базе одного низкоорбитального МКА;
- разработать и обосновать технические требования к системе радиомониторинга на базе низкоорбитальных космических аппаратов;
- анализ существующих методов обнаружения детерминированных сигналов на фоне шумов и выбор наиболее подходящего из них для решения задач спутникового радиомониторинга;
- разработать и обосновать имитационную модель системы спутникового радиомониторинга для определения местоположения источников радиоизлучения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использовались аналитические методы, инструментальные исследования, методы математического и компьютерного моделирования.

Для экспериментальной проверки теоретических исследований данной диссертационной работы и для оценки уровня сигналов в основу работы положены результаты мониторинга радиоканалов (в направлениях Uplink/Downlink низкоорбитальной спутниковой системы дистанционного зондирования Земли АО «НК «Қазақстан Ғарыш Сапары» -KazEOSat-2.

Научная новизна диссертации. Научной новизной диссертационной работы являются предложенный и обоснованный оригинальный метод модернизации отечественной системы радиомониторинга на основе применения одного низкоорбитального МКА, разработанные способы определения местоположения ИРИ на базе одного МКА, разработанная имитационная модель системы радиомониторинга на базе одного МКА.

Практическая значимость работы подтверждается:

-актом внедрения в учебный процесс Международного университета информационных технологий, на кафедре «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», где полученные результаты исследования в рамках данной диссертации применяются в лабораторных занятиях следующих дисциплин: «Спутниковые системы», «Методы регулирования РЧС», читаемых для образовательных программ 6В06201 – «Телекоммуникационные системы и

сети» и 6В06202 – «Радиотехнические системы передачи информации» по направлению подготовки 6В062 – «Телекоммуникации»;

- актом внедрения в ООО «Гейзер-Телеком» при проведении научно-исследовательской работы по теме «Разработка условий совместного использования и регламента взаимодействия по эксплуатации в полосах частот 23,6-24,0 ГГц и 24,25 – 27,5 ГГц РЭС Госкорпорации «Роскосмос» и РЭС стандарта 5G/IMT-2020 операторов мобильной связи, входящих в совместное предприятие операторов 5G».

Отдельные теоретические и методические положения и разработанные модели, предложенные в диссертации, имеют практическое значение для уполномоченного органа Республики Казахстан с целью повышения эффективности системы радиомониторинга для регулирования национального радиочастотного спектра и могут быть использованы для оценки соответствия параметров излучения наземных радиоэлектронных средств нормам разрешительных документов на использование радиочастотного спектра, а также для выявления незаконно работающих наземных радиоэлектронных средств и улучшения электромагнитной обстановки на территории Республики Казахстан.

Основные положения, выносимые на защиту. На защиту выносятся следующие положения:

- обоснована возможность применения низкоорбитальных МКА для осуществления радиомониторинга территории РК на основе исследований, проведенных на базе реальных данных;

- разработаны новые методы определения местоположения источников радиоизлучения с помощью одного низкоорбитального МКА, основанные на угломерном методе, с применением на борту МКА сканирующих антенн;

- обоснован метод обнаружения детерминированного сигнала с помощью системы радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА с применением вероятностной модели;

- разработана принципиально новая имитационная модель для определения местоположения наземных источников радиоизлучения с помощью системы спутникового радиомониторинга и алгоритм определения координат источников радиоизлучения с помощью одного спутника.

Описание основных результатов исследования:

- выявлена возрастающая роль радиочастотного спектра в национальной экономике страны как незаменимого ограниченного природного ресурса, повышение эффективности использования радиочастотного спектра как ограниченного природного ресурса требует применения эффективных методов его регулирования и управления и модернизации действующей национальной системы радиомониторинга;

- доказано, что учитывая территорию страны существующая национальная система радиомониторинга Республики Казахстан на базе наземных радиоконтрольных пунктов на сегодняшний день неэффективна;

- выполнен анализ энергетического бюджета радиолиний, который показал возможность применения низкоорбитальных малых космических аппаратов для осуществления радиомониторинга;

- проведен анализ уровней сигналов на входе приемника системы радиомониторинга, который показал, что для большинства рассматриваемых наземных радиоэлектронных средств отношение сигнал/помеха больше 10 дБ, что приемливо для осуществления радиомониторинга. Однако для эффективной работы системы радиомониторинга на базе МКА необходимо применение специальных методов обработки слабых сигналов, применение бортовых приемных устройств с повышенной чувствительностью и антенн с повышенным коэффициентом усиления;

- разработан способ определения местоположения источников радиоизлучения с помощью одного низкоорбитального МКА, основанный на угломерном методе, с применением на борту МКА сканирующих антенн типа АФАР, координаты местоположения источников радиоизлучения определяются на основе анализа геометрических соотношений расстояний и углов между МКА, источников радиоизлучения и центром масс Земли, пеленгами на источник радиоизлучения с использованием итераций;

- разработаны алгоритмы и программы для определения координат ИРИ по предложенному способу;

- определены источники погрешностей и погрешности при определении координат источников радиоизлучения для разработанного способа определения местоположения источников радиоизлучения с помощью одного низкоорбитального МКА;

- обоснована возможность повышения точности определения координат источников радиоизлучения при помощи многократного измерения координат наземного источника радиоизлучения, где определение пеленгов производят в нескольких (не менее двух) точках орбиты низкоорбитального МКА;

- проведена оценка уровней реальных радиосигналов телеметрии спутника дистанционного зондирования Земли KazEOSat-2 на базе национальной компании «Қазақстан Ғарыш Сапары» с целью подтверждения теоретических выводов по созданию спутниковой системы радиомониторинга и повышения надежности обнаружения и распознавания радиосигналов от источников радиоизлучения. Проведенные измерения показали, что максимальный уровень радиосигналов телеметрии на входе бортового измерительного приемника находится в диапазоне -85 дБм до -120 дБм, что приемливо для осуществления спутникового радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА;

- исследования и расчеты показателя надежности показали, что предлагаемый метод обнаружения сигнала с помощью фильтров Калмана может с очень высокой точностью принимать правильные решения;

- проведена оценка влияния скорости принятия решения фильтра Калмана на результаты обработки радиосигналов;

- разработаны предварительные технические требования к характеристикам радиооборудования системы радиомониторинга на базе низкоорбитального МКА;

- определены характеристики траектории движения низкоорбитального МКА и проведен анализ покрытия (радиодоступности) системы спутникового

радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА, а также определена область радиомониторинга территории Республики Казахстан;

- разработана имитационная модель системы радиомониторинга на базе одного низкоорбитального МКА для учебных и исследовательских целей;

- предлагаемая спутниковая система позволит значительно расширить зону радиомониторинга и ускорить получение данных, необходимых для проведения анализа использования радиочастотного спектра и может интегрироваться с существующей наземной сетью радиомониторинга Республики Казахстан и с международной сетью радиомониторинга МСЭ.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются публикациями в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан и в базу данных Scopus; апробацией в отечественных и зарубежных международных научно-практических конференциях и форумах; патентами на полезную модель Республики Казахстан и свидетельством о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом на виртуальную лабораторную работу.

Также предложенные технические решения были использованы при разработке цифровой образовательной платформы для дистанционного выполнения виртуальных лабораторных работ по изучению современных радиосистем СВЧ и КВЧ диапазонов рамках проекта №АР08857146, финансируемого МОН РК.

Апробация работы. Основные положения данной диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях, форумах и в научных семинарах:

- научных семинарах кафедры «Электроника, телекоммуникация и космические технологии» КазНИТУ им. К. И. Сатпаева (2018 – 2021 гг.);

- научных семинарах кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Международного университета информационных технологий (2020 – 2021 гг.);

- Международной конференции Сатпаевские чтения: «Инновационные технологии – ключ к успешному решению фундаментальных и прикладных задач в рудном и нефтегазовом секторах экономики РК», Республика Казахстан, г. Алматы (2019 г.);

- II Международный научно-технический форум: Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019, Российская Федерация, г. Рязань (2019 г.);

- IV Международная научная конференция: Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности, Российская Федерация, г. Казань (2020 г.);

- XXXIII Международная научно-практическая конференция: Вопросы технических и физико-математических наук в свете современных исследований, Российская Федерация, г. Новосибирск (2020 г.);

- Международная научная конференция: «Digital Technologies in Education, Science and Industry 2020» (DTEESI 2020), Республика Казахстан, г. Алматы (2020 г.);

- Международный научный форум: Наука и инновации – современные концепции, Российская Федерация, г. Москва (2021 г.);

- LIV Международной научно-практической конференции «Технические науки: проблемы и решения, Российская Федерация, г. Москва (2021 г.);

- International Scientific and Practical Conference: Problems and prospects in the international transfer of innovative technologies, Российская Федерация, г. Оренбург (2021 г.).

Публикации по теме диссертации. По теме данной диссертационной работы имеется 3 патента на полезную модель Республики Казахстан; свидетельство о внесении сведений в государственный реестр прав на объекты, охраняемые авторским правом на виртуальную лабораторную работу «Изучение принципов системы радиомониторинга на базе одного малого космического аппарата»; опубликовано 13 печатных работ, из них 4 статьи опубликованы в журналах, входящих в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки МОН РК; 9 статей в Международных форумах и конференциях, из них 1 статья проиндексирована в базе данных Scopus; 1 статья в журнале, входящая в базу данных Scopus.

Личный вклад автора. Диссертация является самостоятельной работой, все результаты научных исследований получены лично автором. Постановка задач исследований, определение методов решения и анализ результатов исследований выполнены совместно с научным руководителем и зарубежным научным консультантом. Также Кулакаева А.Е. участвовала как член делегации Республики Казахстан в работе рабочей группы 1С ИК-1 - Управление использованием спектра (рабочая группа 1С – Контроль использования спектра) Международного Союза Электросвязи от Администрации связи Республики Казахстан. Является членом исполнительной группы по программе «Грантовое Финансирование научных исследований» в рамках выполнения работ по проекту №АР08857146 на тему «Разработка цифровой образовательной платформы для дистанционного выполнения виртуальных лабораторных работ по изучению современных радиосистем СВЧ и КВЧ диапазонов с использованием технологии виртуальной реальности», финансируемого МОН РК.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников, содержащего 137 наименований. Общий объем диссертации составляет 135 страниц; 74 рисунков; 10 таблиц; 7 приложений.