

Information about the authors

Ainur Tanatarovna Akhmediarova – PhD, professor at the Institute of Automation and Information Technology, Department of Cybersecurity, Information Processing and Storage, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.akhmediyarova@satbayev.university.

Asem Tultanovna Ayapbergenova* – master of Engineering and Technology, Senior Lecturer at the Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering at Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: asem_007800@inbox.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6388-9458>.

Zhibek Meirambekovna Alibieva – PhD, associate professor, Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: zh.alibieva@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9565-5621>.

Nurzhan Kakenovich Mukazhanov – PhD, Associate Professor, Institute of Automation and Information Technology, Department of Software Engineering, Satbayev University, Republic of Kazakhstan; e-mail: n.mukazhanov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4835-5751>.

Zhanibek Issabekov – PhD, Associate Professor of the Department of Robotics and Engineering Tools of Automation, Satbayev University, Almaty, Kazakhstan; z.issabekov@satbayev.university. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2900-8025>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Принята к публикации 04.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-5](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-5)

MPHTI: 47.45.29



М.С. Мурушкин¹, К.С. Бактыбеков², Б.Р. Жумажанов², А.Е. Кулакаева^{2,3*}

¹ТОО «Эйрбас Казахстан»,

010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Сарыарка, 6

²ТОО «Ghalam»,

010000, Республика Казахстан, г. Астана, пр. Туран, 89

³АО «Международный университет информационных технологий»,

050040, Республика Казахстан, г. Алматы, ул. Манаса, 34/1

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАЗЕМНОЙ АНТЕННЫ С ДВУХДИАПАЗОННЫМ S/X ОБЛУЧАТЕЛЕМ

Аннотация: В данной статье рассматривается модернизация антенны наземной станции с параболическим отражателем диаметром 3,7 м для работы в S- и X-диапазонах. Основное внимание уделяется учету реальной геометрии отражателя, восстановленной на основе высокоточных лазерных измерений. На основе полученных данных был разработан новый двухдиапазонный коаксиальный облучатель, который обеспечивает совмещение фазовых центров в S- и X-диапазонах, а также высокую изоляцию между портами. Оптимизация конструкции и прогнозирование характеристик антенны были выполнены с использованием электродинамического моделирования в среде Ansys HFSS с учетом действительного профиля параболы. Изготовленный прототип прошел лабораторные испытания, которые подтвердили расчетные прогнозы. Ширина луча составила около 0,7°, апертурная эффективность достигла 56 %, а отношение усиления к температуре шума G/T – порядка 25,9 дБ/К, что соответствует требованиям радиолинии для приема сигналов низкоорбитальных спутников. Результаты демонстрируют, что точный учет формы отражателя и корректная настройка облучателя позволяют достичь требуемых характеристик антенны без замены параболического зеркала. Тем самым подтверждается возможность эффективной модернизации существующих наземных антенн среднего класса за счет интеграции методов высокоточной геометрической реконструкции и электродинамического моделирования.

Ключевые слова: параболическая антенна, наземная станция, S диапазон, X диапазон, коаксиальный облучатель, низкоорбитальный спутник, дистанционное зондирование.

Введение

Бурное развитие миссий низкоорбитальных спутников для дистанционного зондирования Земли, научных исследований и передачи данных в реальном времени предъявляет высокие требования к наземным станциям связи. Для таких миссий особенно важна надежная работа антенн наземных комплексов в S- и X-диапазонах, которые обеспечивают каналы телеметрии, командно-телеметрической связи и приема данных с полезной нагрузкой.

Многие наземные станции, особенно в странах с развивающейся космической отраслью, оснащены параболическими отражателями предыдущих поколений. Со временем их геометрическая точность ухудшается под воздействием климатических и эксплуатационных факторов, а штатные облучатели не всегда соответствуют современным требованиям по коэффициенту отношения усиления к температуре шума (G/T). Полная замена антенных систем требует значительных затрат и времени, поэтому актуальной задачей становится модернизация существующих антенн путем установки новых облучателей и корректной настройки их положения в соответствии с реальной формой зеркала.

Большинство известных исследований сосредоточено на проектировании рупорных и коаксиальных облучателей для параболических антенн, основываясь на идеализированной геометрии отражателя и точном совпадении фазовых центров. Однако на практике расхождения между расчетной и фактической формой зеркала, а также неточности в установке облучателя часто приводят к снижению апертурной эффективности, искажению диаграммы направленности и ухудшению характеристик радиолинии.

Так, опыт последних работ показывает, что точный учет фактической геометрии параболического отражателя критичен. Например, шероховатость и гравитационные деформации снижают усиление и портят фокусировку, тогда как лазерная или фотограмметрическая верификация позволяет удерживать требуемую точность [1-3]. На характеристики также заметно влияют фазовые несовершенства и положение облучателя относительно фокуса [4, 5]. Практика показывает реализуемость компактных S/X-облучателя и согласованность моделирования с измерениями на наземных комплексах [6, 7], включая решения для многолучевых или двухдиапазонных отражателей и альтернативных диапазонов [8, 9] и компактные широкополосные S-антенны [10]. В качестве альтернатив рассматриваются фазированный облучатель фокальной плоскости PAF (Phased Array Feed) и фазированные решетки, повышающие чувствительность и гибкость без замены главного зеркала [11, 12]. Инженерные современные подходы в мембранных и надувных конструкциях расширяют возможности модернизации при условии строгого контроля формы [13]. Все это обосновывает исследование модернизации наземной антенны на основе точного учета фактической геометрии отражателя и оптимизированного двухдиапазонного S/X-облучателя с последующей экспериментальной верификацией.

Целью данной работы является экспериментальная проверка двухдиапазонного коаксиального облучателя S/X-диапазона, предназначенного для модернизации антенны наземной станции с параболическим отражателем Andrew диаметром 3,7 м.

Материалы и методы исследования

Для модернизации антенны наземной станции был использован параболический отражатель Andrew диаметром 3,7 м. Так как геометрическая точность поверхности влияет на фокусировку сигнала и апертурную эффективность антенны, в первую очередь было проведено восстановление реального профиля отражателя. Измерения выполнялись с использованием лазерного трекера Leica AT930. Система измеряла координаты контрольных точек на рабочей поверхности отражателя. Собранные облако точек обрабатывалось в программном обеспечении PolyWorks, где данные приводились к единой системе координат. Поскольку измерения фиксировали координаты центров отражения трекера, для получения фактической поверхности параболы все точки были скорректированы на величину радиуса отражателя в направлении внешней нормали к параболе. На основе уточненных координат была выполнена аппроксимация параболической поверхности с восстановлением ее аналитического уравнения. Точность восстановления оценивалась по среднеквадратическому отклонению (RMS) между измеренными и расчетными точками:

$$\sigma_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum |y_{изм} - y_{расч}|^2} \quad (1)$$

где $y_{изм}$ – импортированные измеренные точки, $y_{расч}$ – расчетные точки по уравнению параболы, а n – количество точек в одном из массивов.

На основе анализа доступных решений для антенн среднего класса был выбран коаксиальный двухдиапазонный облучатель. В процессе разработки была учтена возможность юстировки положения облучателя в фокусе параболы, что особенно важно для отражателей с отклонениями от номинальной формы. Для расчета характеристик антенно-фидерного устройства использовалась программная среда Ansys HFSS, основанная на методе конечных элементов в частотной области.

Моделирование проводилось с учетом:

- реальной геометрии восстановленного профиля параболического зеркала;
- электрических свойств материалов зеркала и облучателя;
- диапазонов частот приема (S) и передачи (X).

Результаты исследований

В качестве основного отражателя было использовано и доработано параболическое зеркало Andrew диаметром 3,7 м. Данное оборудование было куплено в рамках предыдущих проектов и было передано в ТОО «Ghalam» для использования в будущих проектах. Внешний вид параболического зеркала показан на рисунке 1:



а) секция отражателя



б) собранное зеркало на поворотной опоре

Рисунок 1 – Параболическое зеркало Andrew 3.7 м

Данное зеркало антенны выполнено из алюминия с прецизионной штамповки. В комплект входят облучатель (Ku диапазон) и вторичное зеркало по схеме Грегори. Зеркало обладает необходимыми радиочастотными характеристиками для надежного приема сигнала в S и X диапазонах.

Поверхность антенны была измерена с помощью лазерного трекера Leica AT930. ПО PolyWorks, отвечающее за сбор и обработку данных с трекера, формирует таблицу с координатами всех измеренных точек. На основе облака точек была выполнена реконструкция поверхности зеркала в виде 3D-модели. Так как измеренные точки представляют собой координаты отраженного центра рефлектора трекера, то для получения истинной поверхности измеряемой параболы необходимо сместить все точки «наружу» (т.е. в противоположную сторону от положительной нормали, которая смотрит в сторону фокуса параболы) на расстояние равное радиусу рефлектора (в данном случае, 0,75 дюйма). Далее по полученным точкам было восстановлено уравнение параболы. На основе этих данных был проведен регрессионный анализ, который позволил получить аналитическое уравнение параболы. Результаты анализа представлены в таблицах 1-3.

Таблица 1 – Статистические показатели регрессионной модели

Показатель регрессии	Значение
Множественный R	0,9954
Коэффициент детерминации R^2	0,9908
Скорректированный R^2	0,9907
Стандартная ошибка	43,32
Количество наблюдений	209

Таблица 2 – Анализ вариации (ANOVA)

Источник вариации	df (degrees of freedom)	SS (Sum of Squares)	MS (Mean Square)	F (F-statistic)	Значимость F
Регрессия	2	41811419,05	20 905 709,53	11 142,16	$1,18 \times 10^{-210}$
Остаток	206	386 511,66	1 876,27	–	–
Всего	208	42 197 930,72	–	–	–

Таблица 3 – Коэффициенты регрессии уравнения параболы

Переменная	Коэффициент	Стандартная ошибка	t-статистика	p-значение	Нижний 95 %	Верхний 95 %
Константа (Intercept)	508,305	90,103	5,641	$5,53 \times 10^{-8}$	330,662	685,948
Переменная X_1	–3,203	0,186	–17,174	$1,28 \times 10^{-41}$	–3,571	–2,835
Переменная X_2	0,00283	$9,40 \times 10^{-5}$	30,062	$2,88 \times 10^{-77}$	0,00264	0,00301

Как видно из таблицы 1, модель характеризуется высокой степенью совпадения экспериментальных данных с аппроксимирующей кривой ($R^2 = 0,9908$). Согласно таблице 2, значение F и крайне низкий уровень значимости F ($1,18 \times 10^{-210}$) подтверждают статистическую состоятельность модели. Из таблицы 3 следует, что все коэффициенты регрессии являются статистически значимыми ($p < 0,001$). Полученные значения соответствуют параметрам уравнения параболы следующего вида:

$$y = Ax^2 + Bx + C,$$

где $A=0,00283$, $B=-3,203$, $C=508,305$.

Таким образом, восстановленное аналитическое выражение параболы имеет вид:

$$y=0,00283x^2-3,203x+508,305$$

Для проверки соответствия модели реальной геометрии был сопоставлен поперечный профиль, рассчитанный по уравнению параболы $y = Ax^2 + Bx + C$ профилем, восстановленным на основе данных измерений. Графическое сравнение показано на рисунке 2.



Рисунок 2 – Графическое сравнение полученного уравнения параболы и модели, построенной на базе измерений

На рисунке 2 темная область представляет собой сечение модели отражателя, а синяя линия – профиль, восстановленный на основе измерений.

Разницу между двумя кривыми можно аналитически вычислить по формуле (1). Чем меньше значение RMS, тем точнее восстановленный профиль соответствует параболической модели; это значение впоследствии используется для оценки допусков формы и юстировки облучателя.

Для использования зеркала Andrew диаметром 3,7 м в составе инженерной модели антенного комплекса разрабатывается волноводный облучатель.

Разработка и моделирование параметров антенно-фидерного устройства

Для создания двухдиапазонного S/X облучателя для проекта антенны диаметром 3,7 м, было выбрано проектное решение, основанное на схеме коаксиального волновода.

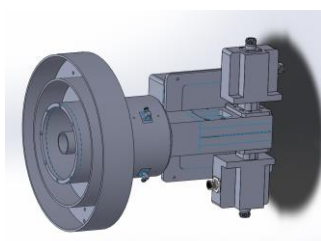
Коаксиальный комбинированный облучатель будет состоять из двух частей: внутреннего высокочастотного облучателя (секция X-диапазона) и периферийного низкочастотного облучателя (секция S-диапазона). Эти две секции будут объединены в одну сборку, что обеспечит совпадение фазовых центров обоих облучателей. Коаксиальный волновод, настроенный как фидер, часто используется для двух- или трехдиапазонных антенных облучателей, при условии, что расстояние между рабочими частотами достаточно большим.

Два токопроводящих коаксиальных цилиндра, которые выполняют функции круглого и коаксиального волноводов, образуют двухдиапазонный облучатель. Сигнал с более высокой частотой распространяется через внутренний цилиндр меньшего диаметра, который работает как круглый волновод и возбуждается своей основной модой TE_{11} . Сигнал с низкой частотой передается через пространство между внутренним и внешним цилиндрами, которые работают как коаксиальный волновод, работающий выше своей частоты среза TEM .

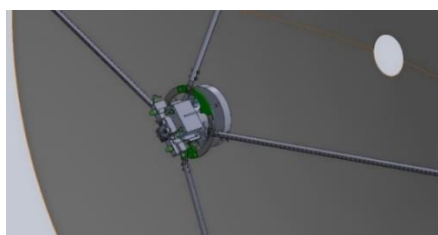
Эта конфигурация имеет ряд важных преимуществ:

- два фазовых центра находятся практически в одной плоскости апертуры для обоих диапазонов;
- обеспечивается отличная изоляция между портами;
- простота сборки.

На рисунке 3 представлена совмещенная модель антенно-фидерной сборки с облучателем, размещенным в фазовом центре параболического отражателя. На CAD-модели показано взаимное расположение облучателя и отражающей поверхности, определенное по восстановленному уравнению параболы.



а) CAD-модель облучателя



б) положение облучателя в фокусе параболы

Рисунок 3 – Модель антенно-фидерной сборки с облучателем, установленным в фазовом центре параболического зеркала

В конструкции предусмотрена возможность юстировки положения облучателя при сборке антенны. Юстировка осуществляется по фазовому центру каналов S/X. Осевое и угловое положения согласованы с расчетной моделью, растяжки обеспечивают центрирование относительно геометрической оси отражателя.

Параболическая антенна использует параболический отражатель для сбора сигналов от космического аппарата и фокусировки их на облучающую антенну. Облучающая антенна обычно представляет собой рупорную антенну с круглой апертурой. Она улавливает РЧ-волны, а облучатель антенны преобразует электромагнитные волны в электрические РЧ-сигналы. Облучатель состоит из резонатора, настроенного на частоту передачи или приема, полосового фильтра и маломощного усилителя. Эти элементы формируют сигнал. Затем сигнал проходит по коаксиальному кабелю в SDR, в котором программное обеспечение демодулирует радиочастотный сигнал в цифровые данные. В обратном направлении SDR модулирует биты данных на несущую радиочастоту, которая проходит через усилитель высокой мощности. Усиленный радиочастотный сигнал резонирует с облучателем антенны, а параболическое зеркало антенны усиливает электромагнитные волны и фокусирует их на спутнике.

Данная конструкция была смоделирована в среде ANSYS HFSS с учетом геометрии зеркал антенны. Результаты моделирования диаграммы направленности в X канале приведены на рисунке 4.

Для $f=8,2$ ГГц показаны сечения $G_{total}(\theta)$ в плоскостях $\varphi=0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$. Максимальное значение G составляет примерно $G \approx 47,3$ дБи при $\theta=0^\circ$, уровень -3 дБ достигается при $\theta \approx 0,4^\circ$, что соответствует ширине главного лепестка по уровню -3 дБ $\approx 0,8^\circ$. При $\theta=1,5^\circ$ относительный уровень составляет около $-21,7$ дБ. В плоскости $\varphi=90^\circ$ наблюдаются более выраженные колебания (боковые лепестки), что указывает на небольшую асимметрию возбуждения.

Далее результаты моделирования диаграммы направленности в X канале приведены на рисунке 5.

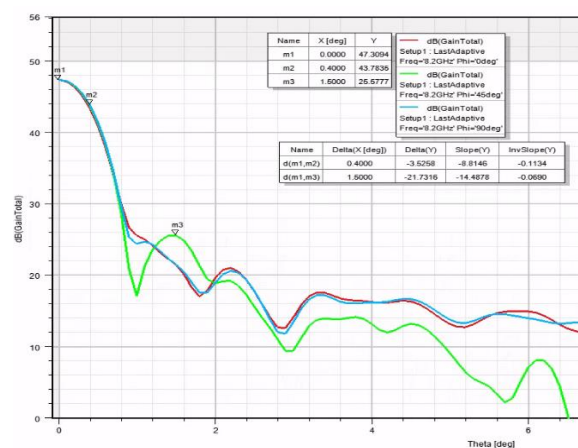


Рисунок 4 – Результаты моделирования диаграммы направленности в X канале

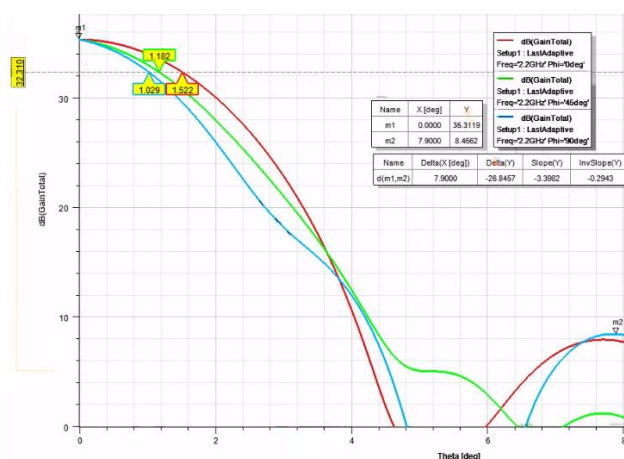


Рисунок 5 – Результаты моделирования диаграммы направленности в S канале

Максимум направленности $G \approx 35,31$ дБи при угле $\theta = 0^\circ$ (m1). Ширина главного лепестка по уровню – 3 дБ составляет примерно $2,06^\circ$ ($\varphi = 90^\circ$), $2,36^\circ$ ($\varphi = 0^\circ$) и $3,04^\circ$ ($\varphi = 45^\circ$). При угле $\theta = 7,9^\circ$ относительный уровень составляет около –26,85 дБ (разность m1-m2), что свидетельствует о низких боковых лепестках.

Для наглядности формирования луча параболической системы приведена пространственная (3D) ДН, на которой изображены геометрия отражателя и облучателя, как показано на рисунке 6.

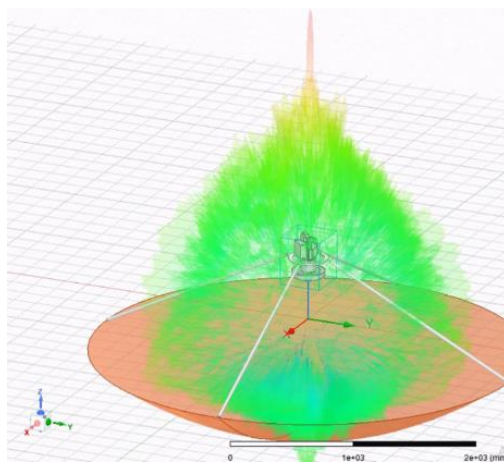


Рисунок 6 – Графическое отображение диаграммы направленности в X канале

В данной конфигурации G/T станции значение составляет 25,87 дБ/° К в дипазаоне частот от 8025 до 8400 МГц. При этом шум-фактор малошумящего усилителя (LNA) в X-

диапазоне равным 0,8 дБ, ширина луча составляет 0,7°, а апертурная эффективность антенны составляет 56%. Эти показатели соответствуют требованиям, установленным в результате расчетов бюджета радиолинии.

Обсуждение научных результатов

Таким образом, проведенные исследования показали, что учет реальной геометрии параболического отражателя и оптимизация параметров облучателя на этой основе позволяют достичь высоких характеристик антенны без полной замены наземного комплекса.

Полученные в ходе моделирования и подтвержденные лабораторными измерениями значения, ширина главного лепестка 0,7°, апертурная эффективность 56%, а также отношение усиления к температуре шума $G/T \approx 25,9$ дБ/К в диапазоне 8,0-8,4 ГГц соответствуют расчетным требованиям бюджета радиолинии для приема сигналов от низкоорбитальных аппаратов.

Важным результатом исследования стало подтверждение того, что совмещение фазовых центров коаксиального облучателя в обоих диапазонах минимизирует искажения диаграммы направленности и обеспечивает стабильную работу антенны. Высокая изоляция между портами S- и X-диапазонов предотвращает паразитные взаимные влияния, что положительно сказывается на точности измерений и энергетике канала связи.

Практическая ценность работы заключается в разработке воспроизводимой инженерной методики модернизации существующих антенн среднего класса (3-5 м). Применение лазерных измерений позволяет объективно оценить состояние и точность отражателя, а численное моделирование с учетом реальной геометрии помогает прогнозировать характеристики антенны на этапе проектирования.

Предложенная методика может быть адаптирована для других наземных станций, что позволит существенно сократить затраты на обновление инфраструктуры и улучшить качество каналов связи с низкоорбитальными аппаратами.

С теоретической точки зрения работа демонстрирует эффективность интеграции методов геометрического реверс-инжиниринга и электродинамического моделирования в задачах модернизации антенных систем.

Заключение

Исследование показало, что модернизация наземной антенны диаметром 3,7 м может быть успешно выполнена без замены параболического зеркала, при условии точного учета его реальной геометрии и правильного проектирования облучателя. Поверхность зеркала была измерена с помощью лазерного трекера, на основе полученных данных был восстановлен действительный профиль параболы и спроектирован новый двухдиапазонный коаксиальный облучатель для работы в S и X диапазонах. Моделирование в среде Ansys HFSS позволило определить оптимальные параметры конструкции и прогнозировать ее характеристики. Лабораторные испытания подтвердили расчетные прогнозы, антенна с новым облучателем показала ширину луча около 0,7°, апертурную эффективность порядка 56% и отношение усиления к температуре шума G/T около 25,9 дБ/К, что соответствует требованиям для приема сигналов низкоорбитальных спутников. Согласованность расчетных и экспериментальных данных подтвердила исходную гипотезу о том, что точный учет формы зеркала и корректная настройка облучателя позволяют достичь высоких характеристик антенны без замены основного отражателя. Представленный подход обеспечивает экономически эффективную модернизацию существующих наземных станций, продлевает срок их службы и отвечает современным требованиям к каналам связи с низкоорбитальными аппаратами.

Список литературы

1. Casco N.A. Surface roughness estimation of a parabolic reflector / N.A. Casco // arXiv preprint arXiv:1007.4600. – 2010.
2. Photogrammetric measurements of a 12-metre preloaded parabolic dish antenna / N.U. Shankar et al // arXiv preprint arXiv:0905.1252. – 2009.
3. Using a Tracking Laser Interferometer to Characterize the Planarity of a Planar Near-Field Scanner / P. Rousseau et al // Proceedings of the Antenna Measurement Techniques Association. – 2002. – P. 501-506.
4. Feng Y.C. The imperfect phase pattern of real parabolic radar antenna and data quality / Y.C. Feng, F. Fabry // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2016. – Т. 33, № 12. – P. 2655-2661.

5. Zhang Y. Influences of the Reflector Subtended Angle on the Performance of Parabolic Antennas with Feed Displacement / Y. Zhang, H. Liu, X. Liu // Electronics. – 2022. – Т. 11, № 17. – P. 2635.
6. A dual-band reflector feed in coaxial configuration for satellite communication [antenna applications corner] / R. Galuscak et al // IEEE Antennas and Propagation Magazine. – 2018. – Т. 60, № 5. – P. 89-94.
7. Design and Realization of an X Band Monopulse Feed Antenna for Low Earth Orbit (LEO) Satellite Ground Station / İ. Şişman et al // International Journal of Antennas and Propagation. – 2024. – Т. 2024, № 1. – P. 6659390.
8. Dual-Band Dual-Beam Shared-Aperture Reflector Antenna Design with FSS Subreflector / Q. Wang et al // Sensors. – 2025. – Т. 25, № 9. – P. 2934.
9. Esmail B.A. A Ku-Band Compact Offset Cylindrical Reflector Antenna with High Gain for Low-Earth Orbit Sensing Applications / B.A. Esmail, D. Isleifson, L. Shafai // Sensors. – 2024. – Т. 24, № 23. – P. 7535.
10. Design, Development, and Qualification of a Broadband Compact S-Band Antenna for a CubeSat Constellation / S. Sánchez-Sevilleja et al // Sensors. – 2025. – Т. 25, № 4. – P. 1237.
11. An S-band-receiving phased-array antenna with a phase-deviation-minimized calibration method for LEO satellite ground station applications / D.H. Lee et al // Electronics. – 2022. – Т. 11, № 23. – P. 3847.
12. Design of the New Dual-Polarized Broadband Phased Array Feed Antenna for the Sardinia Radio Telescope / P. Maxia et al // Electronics. – 2025. – Т. 14, № 4. – P. 807.
13. Test and analysis of an inflatable parabolic dish antenna / J. Gaspar et al // In Proceedings of the 47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference; 14th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference; 7th. – Newport, Rhode Island, USA, 2006. – P. 1600.

Благодарность. Данное исследование финансировалось Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (BR27198365 «Разработка оптикоэлектронной системы в коротковолновой инфракрасной области спектра в контексте развития космических систем ДЗЗ Казахстана»).

М.С. Мурушкин¹, К.С. Бактыбеков², Б.Р. Жумажанов², А.Е. Кулакаева^{2,3*}

¹ЖШС «Эйрбас Казахстан»,

010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ, Сарыарка, 6 даңғылы

²ЖШС «Ghalam»,

010000, Қазақстан Республикасы, Астана қ, Туран, 89 даңғылы

³«Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті» АҚ,
050040, Қазақстан Республикасы, Алматы қ., Манас 34/1 көшесі

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

ЕКІ SIX ДИАПАЗОНДЫ СӘУЛЕЛЕГІШТІ ЖЕР ҮСТІ АНТЕННАСЫНЫҢ ПАРАМЕТРЛЕРІН МОДЕЛЬДЕУ

Бұл мақалада диаметрі 3,7 м параболалық шағылдырғышы бар жер үсті станциясының антеннасын S және X диапазоңдарында жұмыс істеуге бейімдеу мәселесі қарастырылады. Негізгі назар жоғары дәлдікті лазерлік өлшеулер нәтижелері бойынша қалпына келтірілген шағылдырғыштың нақты геометриясын есепке алуға аударылған. Алынған деректер негізінде S және X диапазоңдарындағы фазалық орталықтардың сәйкес келуін және порттар арасындағы жоғары оқшаулауды қамтамасыз ететін жаңа екі диапазоңды коаксиалды сәулелігіш жасалды. Антеннаның құрылымын оңтайландыру және сипаттамаларын болжау Ansys HFSS бағдарламалық ортасында электродинамикалық модельдеу арқылы, параболаның нақты профилін ескере отырып, жүргізілді. Дайындалған прототип зертханалық сынақтардан өтіп, есептік нәтижелерді растады. Негізгі сәуле ені шамамен 0,7° болды, апертура тиімділігі 56%-ға жетті, ал күшейту мен шу температурасының арақатынасы (G/T) шамамен 25,9 дБ/К құрады, бұл төмен орбитадағы спутниктер сигналдарын қабылдау радиожолының талаптарына сәйкес келеді. Зерттеу нәтижелері шағылдырғыш пішінін дәл есепке алу және сәулелігішті дұрыс баптау антеннаның қажетті сипаттамаларына параболалық айнаны ауыстырмай-ақ қол жеткізуге мүмкіндік беретінін көрсетті. Осылайша, жоғары дәлдікті геометриялық реконструкциялау әдістері мен электродинамикалық модельдеуді біріктіру арқылы орта класты қолданыстағы жерүсті антенналарын тиімді жаңғырту мүмкіндігі расталады.

Түйін сөздер: параболалық антенна, жер үсті станциясы, S диапазоны, X диапазоны, коаксиалды сәулелігіш, төмен орбиталы спутник, қашықтан зондтау.

M. Murushkin¹, K. Baktybekov², B. Zhumazhanov², A. Kulakayeva^{2,3*}

¹LLP «Airbus Kazakhstan»,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Saryarka Ave., 6

²LLP «Ghalam»,
010000, Republic of Kazakhstan, Astana, Turan Ave., 89

³JSC «International Information Technologies University»,
050040, Republic of Kazakhstan, Almaty, 34/1 Manasa St.

*e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz

MODELING OF PARAMETERS OF A GROUND ANTENNA WITH A DUAL-BAND SIX FEED

This paper discusses the modernization of a ground station antenna with a parabolic reflector of 3.7 m diameter for operation in the S- and X-bands. The main focus is on accounting for the actual reflector geometry, which was reconstructed based on high-precision laser measurements. Using the obtained data, a new dual-band coaxial feed was developed, ensuring the alignment of phase centers in the S- and X-bands and high port isolation. The antenna design optimization and performance prediction were carried out using electromagnetic modeling in Ansys HFSS, taking into account the actual parabolic profile. The fabricated prototype underwent laboratory testing, which confirmed the simulation results. The beamwidth was approximately 0.7°, the aperture efficiency reached 56%, and the gain-to-noise temperature ratio (G/T) was about 25.9 dB/K, meeting the requirements of the radio link for receiving signals from low-orbit satellites. The results demonstrate that accurate consideration of the reflector shape and proper feed tuning make it possible to achieve the desired antenna characteristics without replacing the parabolic mirror. Thus, the feasibility of efficient modernization of existing medium-class ground antennas through the integration of high-precision geometric reconstruction methods and electrodynamic modeling is confirmed.

Key words: parabolic antenna, ground station, S-band, X-band, coaxial feed, low-orbit satellite, remote sensing.

Сведения об авторах

Михаил Сергеевич Мурушкин – старший координатор GSD и бизнес эксперт по цифровому обслуживанию, ТОО «Эйрбас Казахстан» город Астана, Республика Казахстан; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9917-3842>.

Казбек Сулейменович Бактыбеков – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, ТОО «Ghalam» город Астана, Республика Казахстан; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-8053>.

Берик Рахимбекович Жумажанов – руководитель отдела полезной нагрузки и научных разработок, ТОО «Ghalam»; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5926-9619>.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – Phd, ассоциированный профессор кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации», Международный Университет Информационных Технологий города Алматы, Республика Казахстан; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Авторлар туралы мәліметтер

Михаил Сергеевич Мурушкин – GSD аға үйлестірушісі және «Airbus Kazakhstan» ЖШС-нің цифрлық қызмет көрсету бойынша бизнес сарапшысы, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9917-3842>.

Казбек Сулейменович Бактыбеков – физика-математика ғылымдарының докторы, «Ghalam» ЖШС-нің бас ғылыми қызметкері, Астана қаласы, Қазақстан Республикасы; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-8053>.

Берик Рахимбекович Жумажанов – «Ghalam» ЖШС пайдалы жүктеме және ғылыми әзірлемелер бөлімінің жетекшісі; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5926-9619>.

Айгуль Ергалиевна Кулакаева* – PhD, «Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар» кафедрасының қауымдастырылған профессоры, Алматы қаласындағы Халықаралық ақпараттық технологиялар университеті, Қазақстан Республикасы; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Information about the authors

Mikhail Sergeyevich Murushkin – Senior GSD Coordinator and Business Expert in Digital Services, Airbus Kazakhstan LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: mikhail.murushkin@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-9917-3842>.

Kazbek Suleimenovich Baktybekov – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Chief Researcher, Ghalam LLP, Astana, Republic of Kazakhstan; e-mail: k.baktybekov@ghalam.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6401-8053>.

Berik Rakhimbekovich Zhumazhanov – Head of the Payload and Scientific Research Department, LLP «Ghalam»; e-mail: b.zhumazhanov@ghalam.kz. ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5926-9619>.

Aigul Yergaliyevna Kulakayeva* – PhD, Associate Professor of the Department of «Radio Engineering, Electronics and Telecommunications», International Information Technologies University, Almaty, Republic of Kazakhstan; e-mail: a.kulakayeva@iitu.edu.kz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0143-085X>.

Поступила в редакцию 05.01.2026

Поступила после доработки 04.02.2026

Принята к публикации 06.02.2026

[https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1\(21\)-6](https://doi.org/10.53360/2788-7995-2026-1(21)-6)

MPHTI: 50.43.15



Д.Т. Алдашева^{1*}, О.С. Салыкова¹, М.Ю. Зарубин², Т.А. Жуаспаев², М.Д. Мусина²

¹Костанайский региональный университет имени Ахмет Байтұрсынұлы,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул. А. Байтұрсынова 47

²Костанайский инженерно-экономический университет имени М. Дулатова,
110000, Республика Казахстан, г. Костанай, ул. Чернышевского 59

*e-mail: aldasheva.dinara@mail.ru

EXPLAINABLE AI ДЛЯ ИНТЕРПРЕТАЦИИ ПРОГНОЗОВ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ ПРЕДИКТИВНОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Аннотация: В статье рассматривается применение методов Explainable Artificial Intelligence (XAI) для интерпретации прогнозов нейросетевых моделей в системах предиктивного обслуживания промышленного оборудования. Цель исследования – повышение прозрачности, точности и доверия к результатам машинного обучения при диагностике и прогнозировании технических неисправностей. В работе использованы методы SHAP, LIME и Grad-CAM, обеспечивающие визуализацию вклада признаков в предсказания моделей. На примере предприятий Костанайского автомобильного кластера показано, что интеграция Explainable AI позволяет повысить достоверность диагностики на 12-15%, сократить внеплановые простои оборудования на 13% и уменьшить время реагирования инженеров на 18%. Исследование демонстрирует, что интерпретируемые модели машинного обучения формируют основу для прозрачных решений в рамках цифровизации и внедрения промышленного интернета вещей (IIoT) в Казахстане. Предложенный подход соответствует стратегическим направлениям программ «Цифровой Казахстан» и «Концепция развития искусственного интеллекта до 2029 года», способствуя повышению эффективности и надёжности ответственных систем технического обслуживания.

Экспериментальные результаты получены на обезличенных данных промышленного предприятия автомобильного машиностроения Республики Казахстан, что подтверждает применимость предложенного подхода в реальных производственных условиях.

Ключевые слова: Explainable AI, предиктивное обслуживание, интерпретируемость моделей, машинное обучение, нейронные сети, XAI-подход.

Введение

Современная промышленность в Казахстане, как и во многих странах, всё активнее переходит к стратегии предиктивного обслуживания (Predictive Maintenance, PdM), ориентированной на минимизацию простоев, продление срока службы оборудования и снижение операционных затрат. Это особенно важно для таких отраслей, как добыча,