

КИСЕЛЕВА Анастасия Юрьевна,
аспирант,
Санкт-Петербургский горный
университет императрицы Екатерины II,
e-mail: kiselyova.anastacia@yandex.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИЙ АНТЕНН ДЛЯ АВТОНОМНЫХ ГЕОРАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ЛЕДНИКОВ АНТАРКТИДЫ

Аннотация. Актуальность. Совершенствование антенных систем для георадиолокационного зондирования ледников Антарктиды представляет собой актуальную научно-практическую задачу в контексте мониторинга климатических изменений. Повышение точности оценки толщины льда, выявления субледниковых водоёмов и анализа внутренней стратификации ледникового щита критически зависит от энергоэффективности, широкополосности и помехоустойчивости антенно-фидерного тракта, что особенно важно для автономных платформ в экстремальных условиях. Методы. Проведён системный сравнительный анализ классических и перспективных антенных конфигураций, включая полуволновые диполи, V-образные излучатели, рамочные антенны, широкополосные конструкции типа bow-tie и современные MIMO-системы. Оценка выполнялась по ключевым параметрам: глубина зондирования, временное и пространственное разрешение, полоса пропускания, устойчивость к климатическим воздействиям и энергопотребление. Результаты. Установлено, что каждая антенная архитектура обладает специфической областью применения, а современный тренд заключается в переходе от одиночных излучателей к многоканальным системам с цифровым формированием луча и синтезом апертуры. Обсуждение и выводы. Доказана необходимость комплексного подхода к проектированию антенн, учитывающего электрофизические свойства льда и экстремальные эксплуатационные условия. Перспективы развития связаны с внедрением метаматериалов для миниатюризации и расширения полосы пропускания, оптимизацией многоканальных архитектур и применением методов машинного обучения для автоматического подавления помех и интерпретации данных. Реализация этих направлений позволит значительно повысить детальность радиогляциологических исследований и достоверность прогнозов динамики ледникового покрова Антарктиды, что имеет фундаментальное значение для понимания глобальных климатических процессов.

Ключевые слова: георадиолокационное зондирование, антенные системы, ледниковый щит Антарктиды, широкополосные антенны, MIMO-технологии.

KISELYOVA Anastasia Yuryevna,
Postgraduate Student,
Empress Catherine II
Saint Petersburg Mining University

COMPARATIVE ANALYSIS OF ANTENNA DESIGNS FOR AUTONOMOUS GEORADIOLOCATION STUDIES OF ANTARCTIC GLACIERS

Annotation. Relevance. Improving antenna systems for georadar sensing of Antarctic glaciers is an urgent scientific and practical task in the context of monitoring climate change. The accuracy of ice thickness estimates, identification of subglacial reservoirs and analysis of the internal stratification of the ice sheet depend critically on the energy efficiency, broad-bandwidth and noise immunity of the antenna-feeder path. This is especially important for autonomous platforms under extreme conditions. Methods. A systematic comparative analysis was carried out on classical and promising antenna configurations including half-wave dipoles, V-shaped radiators, loop antennas and bow-tie structures with broadband MIMO systems. The assessment was based on key parameters such as depth of sensing, temporal and spatial resolution, bandwidth and resistance to climactic influences. Results. It has been established that each antenna architecture has a specific field of application, and the current trend is to switch from single radiators to multi-channel systems with digital beam shaping and aperture synthesis. Discussion and conclusions. The necessity of an

integrated approach to antenna design, taking into account the electrophysical properties of ice and extreme operating conditions, is proved. Development prospects are related to the introduction of metamaterials for miniaturization and bandwidth expansion, optimization of multi-channel architectures, and use of machine learning methods for automatic interference suppression and data interpretation. Implementation of these directions will significantly increase detail of radioglaciology studies and reliability of forecasts for Antarctic ice dynamics, which is fundamental for understanding global climate processes.

Key words: geolocation sensing, antenna systems, the Antarctic ice sheet, broadband antennas, MIMO technologies.

Введение

Георадиолокационное зондирование является одним из ключевых инструментов исследования внутренней структуры ледяного щита Антарктиды, анализа его динамики и оценки устойчивости в условиях современных климатических изменений. Радиолокационные методы обеспечивают получение данных о толщине ледникового покрова, стратификации снежно-ледяных слоёв, наличии субледниковых озёр и морфологии ложа, что имеет принципиальное значение для гляциологических и климатических исследований [1, с. 1–2].

В последние годы наблюдается активное развитие георадиолокационных комплексов, ориентированных на дистанционный мониторинг ледников как в рамках сезонных полевых экспедиций, так и с использованием стационарных или мобильных автономных платформ [2, 52–53]. Ключевым роль в таких системах играет антенно-фидерный тракт, который определяет глубину зондирования, пространственное и временное разрешение, энергетическую эффективность и надёжность функционирования всего комплекса [3, с. 1–2].

Современные требования к антеннам для георадиолокации в антарктических условиях существенно возросли. Наряду с обеспечением широкого частотного диапазона и высокой мощности излучения, антенны должны обладать малой массой, высокой транспортабельностью, энергоэффективностью и устойчивостью к экстремальным климатическим воздействиям, включая низкие температуры, обледенение и сильные ветровые нагрузки.

Хотя классические антенные решения, такие как полуволновые и V-образные диполи, рамочные и широкополосные антенны типа bow-tie, успешно применялись в гляциологических экспедициях предыдущих десятилетий, дальнейшее повышение эффективности георадиолокационных систем требует их конструктивной и функциональной модернизации. Особое значение приобретает использование новых конструктивных и диэлектрических материалов, внедрение распределённой резистивной нагрузки для формирования апериодического импульсного отклика, разработка облегчённых и сетчатых конструкций, а также оптимизация методов согласования антенн с передающей и приёмной аппаратурой с учётом электрофизических свойств ледяной среды.

Целью данной работы является проведение системного сравнительного анализа классиче-

ских и перспективных конструкций антенн для автономных георадиолокационных исследований ледников Антарктиды с целью определения наиболее эффективных решений, обеспечивающих повышение точности, энергоэффективности и надёжности мониторинга ледникового покрова в экстремальных климатических условиях.

Задачи исследования:

- Проанализировать основные типы антенных конструкций по ключевым параметрам: глубина зондирования, временное и пространственное разрешение, полоса пропускания, устойчивость к климатическим воздействиям и энергопотребление;

- Оценить преимущества и недостатки каждой антенной архитектуры в контексте автономных георадиолокационных платформ для Антарктиды;

- Исследовать современные тренды развития антенных систем, включая использование метаматериалов, цифрового формирования луча и синтеза апертуры.

Научная и практическая значимость совершенствования антенных систем определяется необходимостью повышения точности и достоверности данных о состоянии ледников при одновременном снижении энергозатрат автономных измерительных комплексов, что обуславливает необходимость комплексного подхода к выбору типа антенны, её конструкции, материалов и режимов эксплуатации в экстремальных условиях Антарктиды.

1. Обзор антенных решений для радиолокационного зондирования льда

Радиолокационное зондирование ледниковых покровов Антарктиды развивается с середины XX века и остаётся ключевым инструментом гляциологического мониторинга. За это время сформировался широкий спектр антенных решений, адаптированных к экстремальным полярным условиям: от полуволновых диполей до направленных и многоканальных конфигураций. Выбор конкретной конфигурации определяется целевой глубиной зондирования [4, с. 8], пространственно-временным разрешением и ограничениями по массе, габаритам и интеграции на платформы.

1.1 Полуволновые диполи

Классический полуволновый диполь и его модификации широко применяются в ледовых радарх благодаря простоте конструкции и высокой эффективности излучения на низких частотах.

Для глубинного зондирования используют диполи длиной в несколько метров, что соизмеримо с половиной длины волны на выбранной частоте. В задачах исследования наиболее мощных частей антарктического ледникового щита применяются диапазоны порядка 3–30 МГц (HF) и около 60 МГц (нижний VHF), обеспечивающие достижение ложа при приемлемом уровне затухания в толще льда.

Несмотря на простоту и высокую энергетическую эффективность, классический резонансный диполь обладает рядом ограничений. Он характеризуется относительно узкой рабочей полосой и длительным затуханием собственных колебаний после излучённого импульса, что приводит к перекрытию откликов от близкорасположенных границ и снижает разрешающую способность при изучении внутренней структуры льда.

Современные исследования показывают, что повышение широкополосности достигается за счёт введения распределённой резистивной нагрузки и применения облегчённых проводящих/сетчатых конструкций диполя, в том числе для полярных автономных платформ. Такие решения позволяют расширить рабочий диапазон частот и сформировать более короткий апериодический импульс при сохранении достаточной эффективности излучения [5, с. 2172–2173].

В антарктических условиях диполи, как правило, размещаются на поверхности снега или частично погружаются в него, формируя преимущественно горизонтальную поляризацию; при этом распределение излучения и доля мощности, уходящей в лёд, существенно зависят от границы «воздух–лёд» и учитываются при интерпретации радиолокационных данных.

Тем не менее, благодаря сочетанию глубокой проникающей способности, простоте конструкции и надёжности, полуволновые диполи и их резистивно нагруженные модификации остаются базовой антенной конфигурацией в системах радиолокационного зондирования льда и служат отправной точкой для разработки более сложных широкополосных антенных решений.

1.2 V-образные диполи

V-образный диполь представляет собой модификацию классического полуволнового диполя, у которого плечи разведены под углом и образуют форму «V». Такая геометрия приводит к перераспределению излучаемого поля и повышению доли энергии, направленной в сектор между плечами антенны, что делает V-диполи востребованными в бортовых георадарах, ориентированных на зондирование подстилающей поверхности. В авиационных системах антенну, как правило, подвешивают под крылом или фюзеляжем летательного аппарата с ориентированием вершины «V» в сторону поверхности льда. При этом используются частоты порядка нескольких десятков мегагерц (HF–нижний VHF), обеспечивающие компромисс между глубиной проникновения и вертикальным

разрешением [6, с. 215–218].

С развитием технологий V-диполи продолжают активно совершенствоваться. Современные конструкции с резистивной нагрузкой исследуются как потенциальные ультраширокополосные излучатели. Показано, что резистивно-нагруженный V-образный диполь способен эффективно подавлять запаздывающие отражения сигнала и обеспечивать сглаженную АЧХ [7, с. 182218–182219] для повышения временного разрешения и надёжности интерпретации отражений от сложных структур льда.

К основным ограничениям таких антенн относятся требования к жёсткости и аэродинамической устойчивости подвески, а также чувствительность характеристик к высоте подвеса над поверхностью. Чрезмерно большое расстояние усиливает влияние отражения на границе сред, тогда как слишком малое расстояние приводит к возрастанию роли поверхностных волн и искажению диаграммы направленности [6, с. 223–224].

1.3 Петлевые и рамочные антенны

Рамочные, петлевые антенны представляют собой проводящие замкнутые контуры различной формы (круглой, прямоугольной, квадратной и т.д.), по которым протекает переменный ток. В радиогляциологии они используются существенно реже, чем линейные диполи, однако в ряде задач обладают конструктивными преимуществами. Жёсткая механическая конструкция и стабильность геометрии делает такие антенны перспективными для стационарных и длительно функционирующих измерительных комплексов, где требуется сохранение калибровочных характеристик и устойчивость к деформациям и обледенению [8, с. 5–7].

Поляризационные свойства рамочных антенн определяются ориентацией плоскости контура. Горизонтально ориентированная петля на поверхности снега формирует вертикальную магнитную компоненту поля, что эквивалентно горизонтально поляризованному электрическому полю, направленному в ледяную толщу. По поляризационным характеристикам такая конфигурация близка к горизонтальному диполю, но может быть предпочтительной в условиях, где критичны механическая жёсткость, компактный монтаж и защита от погодных воздействий.

В современных автономных радиолокационных системах для мониторинга толщины и деформации льда используются компактные широкополосные антенны рамочного/щелевого типа, работающие в диапазоне 200–400 МГц и обеспечивающие устойчивые характеристики в течение длительной работы на антарктических ледовых шельфах. Такие системы в сочетании с фазочувствительной обработкой демонстрируют миллиметрово-сантиметровую точность отслеживания изменений толщины и базального таяния при автономной работе в полевых условиях [9, с. 3–5].

Диаграмма направленности одиночной рамочной антенны, расположенной на поверхности льда, характеризуется сравнительно широкой формой и по структуре близка к диаграмме диполя: излучение распространяется как вглубь льда, так и в воздушное полупространство, а коэффициент усиления составляет порядка единиц дБи. Основным ограничением рамочных антенн остаётся снижение эффективности излучения на низких частотах.

1.4 Широкополосные антенны типа bow-tie

Широкополосные диполи типа bow-tie представляют собой плоскую модификацию линейного диполя, у которой плечи выполнены в виде расходящихся треугольных проводящих пластин. Такая геометрия сглаживает частотную зависимость входного импеданса и формирует несколько близко расположенных резонансов, что позволяет реализовать ультраширокополосный режим при относительно компактных габаритах по сравнению с длиной волны. Антенны данного класса широко используются в георадарных системах, ориентированных на высокое временное разрешение при зондировании поверхностных и приповерхностных слоёв грунта, снега и верхней части ледяного покрова.

Современные разработки показывают, что расширение полосы рабочих частот и увеличение направленного коэффициента усиления достигаются за счёт введения резистивной нагрузки, оптимизации формы плеч и применения отражающих/метаматериальных надстроек [10, с. 86-91]. В диапазоне сотен мегагерц, характерном для подповерхностного и ледового зондирования, эти подходы часто реализуются в виде экранированных bow-tie-конструкций с внутренними поглотителями, что позволяет снижать излучение в верхнее полупространство антенны при регистрации слабых отражений от глубоких и мало-контрастных границ [11, с. 1-5].

К основным преимуществам антенн типа bow-tie относятся простота конструкции, возможность реализации ультраширокой рабочей полосы при меньших габаритах по сравнению с проволочными диполями. Вместе с тем указанные достоинства сопровождаются рядом существенных ограничений.

1.5 Направленные антенны (логопериодические, Yagi, рупорные).

К направленным антенным конфигурациям, используемым в георадиолокационных системах, относятся логопериодические дипольные решётки, антенны типа Yagi-Uda и рупорные излучатели. Их применение целесообразно в случаях, когда требуется увеличение энергетического потенциала и дальности зондирования за счёт повышения коэффициента усиления и формирования суженной диаграммы направленности по сравнению с простыми дипольными или рамочными антеннами.

Логопериодические дипольные антенны представляют собой широкополосные направленные структуры, в которых набор излучающих элементов с различной длиной и шагом вдоль несущей стрелы обеспечивает близкую к постоянной диаграмму направленности и импеданс в широком диапазоне частот. Для диапазонов VHF, используемых при глубинном зондировании ледников (частоты порядка 150–250 МГц), одиночные элементы LPDA обеспечивают коэффициент усиления порядка 8–10 дБи, а их объединение в линейные или двумерные решётки позволяет существенно увеличить эффективную апертуру [12, с. 1881–1883].

Рупорные антенны используются преимущественно в радиолокационных альтиметрических системах, эксплуатируемых на борту самолётов и спутников. Металлические рупоры на частотах Ку-диапазона (около 13,6 ГГц) формируют узкую диаграмму направленности и высокий коэффициент усиления, что критично для высокоточной оценки высоты поверхности ледников и морского льда из космоса [13, с. 1-2]. Однако из-за сильного затухания радиоволн в ледяной среде на частотах порядка десятков гигагерц рупорные антенны практически не используются для глубокого подповерхностного зондирования ледниковой толщины [13, с. 6-7].

Антенны типа Yagi-Uda представляют собой узкополосные направленные системы, состоящие из активного вибратора, рефлектора и набора директоров. Они обеспечивают усиление, сопоставимое с одиночными логопериодическими элементами, при меньшей массе и относительной простоте конструкции, но обладают выраженной узкополосностью, что делает их пригодными преимущественно для систем с фиксированной или слабо перестраиваемой рабочей частотой [14, с. 384]. В георадарных и родственных криосферных применениях такие антенны рассматриваются как потенциальный вариант для компактных направленных модулей, однако широкополосные требования современных ледорадаров чаще удовлетворяются логопериодическими и другими широкополосными решениями.

Использование крупногабаритных направленных антенн и антенных решёток на подвижных наземных и воздушных платформах ограничивается механическими и аэродинамическими факторами (масса, парусность и требования к креплению).

1.6 Перспективные антенные конфигурации и решения

Переход от одиночных излучателей к фазированным антенным решёткам и многоканальным системам типа MIMO является ключевым направлением развития радиогляциологических комплексов. Использование массивов из дипольных, щелевых, Vivaldi- и других широкополосных элементов с индивидуальным управлением амплитудой и фазой позволяет реализовывать электрон-

ное сканирование диаграммы направленности, цифровое формирование луча и синтез апертуры, тем самым повышая пространственное разрешение и чувствительность при зондировании многокилометровой ледяной толщи. Современные системы проектируются как многоканальные или ММО-конфигурации с возможностью приёма в нескольких поляризациях и с многолучевой обработкой.

Наземные многоканальные VHF/UHF-радары, разработанные для зондирования Гренландского и Восточно-Антарктического ледниковых щитов, используют линейные и двумерные антенные решётки в диапазонах порядка 170–230, 180–340 и 600–900 МГц для многоугловых и многочастотных измерений. Такие системы, буксируемые гусеничными платформами, обеспечивают зондирование льда толщиной более 2–3 км и обеспечивают трёхмерную реконструкцию внутренней структуры ледников [15, с. 2070–2072, 16 с. 4841–4842].

На концептуальном уровне ММО-решётки рассматриваются в качестве базиса для перспективных воздушных и орбитальных систем

глубинного радиолокационного зондирования ледниковых щитов, однако специализированные космические радары низкочастотного диапазона пока находятся на стадии проектных исследований. В целом развитие фазированных и многоканальных антенных систем характеризуется переходом от простых линейных массивов к адаптивным ММО-конфигурациям с цифровой апертурой, что существенно расширяет возможности радиогляциологической томографии при одновременном росте требований к сложности антенной подсистемы и объёму вычислительной обработки.

Сравнительный анализ и результаты

На основе проведенного сравнительного анализа конструкций антенн для автономных георадиолокационных исследований ледников Антарктиды были выявлены их ключевые характеристики, которые позволили определить наиболее эффективные подходы для подповерхностного зондирования снежно-ледового покрова. Результаты сравнения представлены ниже (табл. 1).

Таблица 1. Сравнение характеристик антенных конструкций (составлено авторами).

Тип антенной конструкции	Диапазон частот/коэф. усиления	Хар-ки направленности	Преимущества	Ограничения	Примечания
Полуволновый диполь	HF –нижний VHF (3–30 МГц и 60 МГц); КУ 2 дБи.	Широкая ДН, близка к дипольной; излучение уходит и в лёд, и в воздух при укладке на поверхности.	Простота и надёжность конструкции; высокая эффективность излучения на низких частотах; максимальная глубина.	Узкая полоса пропускания; длительное затухание после импульса; большие габариты на низких частотах.	Базовое решение для глубинного ледорадара; оптимально при приоритете глубины над разрешением.
V-образный диполь	HF–нижний VHF (десятки МГц); КУ выше линейного диполя, за счёт концентрации излучения в секторе «V».	Основная доля энергии направлена преимущественно вниз в секторе «V»; ДН чувствительна к высоте подвеса.	Более направленное излучение на подстилающую поверхность; пригодны для авиа-/БПЛА размещения; в резистивно-нагруженных версиях — более «чистый» импульс.	Требуют жёсткого, аэродинамически устойчивого подвеса; характеристики ДН сильно зависят от высоты над льдом	Бортовые ледорадары (самолёт/БПЛА на контролируемой высоте); компромисс между глубиной проникновения и разрешением по толщине

Рамочная/петлевая	VHF/UHF 200–400 МГц; КУ порядка 1–3 дБи	Широкая ДН; близка к дипольной (двунаправленная)	Механическая прочность и стабильность; устойчивость к деформации/обледенению; удобный монтаж, компактность.	Снижение эффективности излучения на низких частотах; ограничение применения по глубине	Длительный мониторинг (стационарные измерения), когда важны стабильность и долговечность антенны
Bow-tie (плоский широкополосный диполь)	Сотни МГц; КУ 0–3 дБи; (выше экранированием/надстройками)	Без экранирования ДН близка к дипольной; с экранированием - направленное излучение в лёд.	Простая печатная реализация, ультраширокая полоса пропускания; высокое временное разрешение	Без экранирования часть энергии уходит в воздух; на нижних частотах падает эффективность; глубина ограничена затуханием ВЧ	Наземные георадары для приповерхностная стратиграфии (снег/фирн), высокое разрешение, поиски неоднородностей в верхней части покрова
Направленные антенны (логопериодические, Yagi, рупорные)	ЛПДА - VHF диапазон (150 – 250 МГц, КУ 8–10 дБи); Yagi – узкополосный диапазон около фиксированной частоты, КУ 8 дБи; рупор – СВЧ (Ku-диапазон -13 ГГц), высокий КУ порядка 20-23 дБи	Узконаправленные ДН по сравнению с диполями; концентрируют энергию в направлении зондирования, увеличивая дальность действия радара; рупорные антенны формируют особенно узкий луч (обеспечивает высокую точность)	Высокий КУ повышает энергетический потенциал радара (большая глубина/дальность зондирования); логопериодические (LPDA) антенны – широкополосные при устойчивой направленности (близкая к постоянной ДН в широком диапазоне); антенны Yagi-Uda проще и легче LPDA при сопоставимом усилении; рупорные обеспечивают крайне высокий КУ, пригодный для высокоточных альтиметрических измерений поверхности	Большие габариты и масса (особенно на низких частотах) затрудняют использование направленных антенн на движущихся платформах (парусность, требования к креплению); антенны Yagi узкополосны (эффективны только на фиксированных частотах); рупоры на высоких частотах непригодны для глубокого зондирования льда из-за сильного радиоволнового затухания	Логопериодические антенны и их решётки применяются для увеличения глубины зондирования на наземных и воздушных платформах. Антенны Yagi рассматриваются для компактных модулей, однако современным требованиям широкой полосы чаще удовлетворяют LPDA и другие ШП решения. Рупорные излучатели используются в спутниковых и авиационных радарах-альтиметрах.

Многоканальные и MIMO-конфигурации	VHF/UHF-диапазоны (170–230, 180–340, 600–900 МГц); эквивалентный КУ растёт за счёт фазированного суммирования сигналов	Электронное управление ДН, многолучевость, синтез апертуры (3D)	Высокое пространственное/временное разрешение; повышение помехоустойчивости и информативности (томография/3D)	Сложность аппаратуры и синхронизации каналов; рост энергопотребления и объёма данных; требования к вычислительной обработке и калибровке в полевых условиях	3D-картирование структуры льда, повышенная информативность, буксируемые/многоканальные комплексы; перспективно для автономных платформ
------------------------------------	--	---	---	---	--

Анализ показал, что представленные типы антенн охватывают весь спектр применяемых в радиогляциологии решений - от низкочастотных диполей, обеспечивающих максимальную глубину зондирования, до многоканальных фазированных и MIMO-архитектур, позволяющих формировать адаптивные диаграммы направленности и трёхмерные изображения внутренней структуры льда. Каждая конфигурация имеет свою область оптимального применения: классические диполи и рамочные антенны обеспечивают стабильность и простоту эксплуатации, тогда как широкополосные bow-tie, LPDA и Vivaldi-системы - высокое временное разрешение и импульсную «чистоту». Развитие

MIMO-технологий открывает возможности интеграции с методами синтезированной апертуры и цифрового формирования луча, формируя основу для нового поколения радиогляциологических комплексов.

Заключение

Проведённый обзор и сравнительный анализ показали, что развитие антенных систем для радиогляциологического зондирования льда прошло путь от простых полуволновых диполей к широкополосным и направленным конструкциям, а затем к многоканальным фазированным и MIMO-решёткам. Каждое из рассмотренных решений реализует свой баланс между глубиной зондирования, временно-пространственным разрешением, энергетической эффективностью и эксплуатационной надёжностью в суровых ус-

ловиях Антарктиды.

Опираясь на проведенный анализ выделен ряд перспективных направлений развития антенн для георадаров подлёдного зондирования в условиях Антарктиды:

1. Исследование возможности использования антенн с синтезированной апертурой в георадарах подлёдного зондирования ледников, аналогично радиолокаторам дистанционного зондирования, что позволит уточнить модели рельефа и внутренней структуры льда.

2. Разработка и апробация широкополосных антенн Вивальди с высоким коэффициентом направленности в сочетании с облегчённой конструкцией при сохранении энергетической эффективности.

3. Поиск и внедрение альтернативных радиопрозрачных покрытий и материалов, обеспечивающих защиту при экстремально низких температурах без ухудшения направленных и энергетических характеристик антенны аналогично радиопрозрачному лаку для СВЧ-устройств.

4. Разработка методов компенсации и подавления интерференции в многоканальных георадарах, где когерентное суммирование сигналов приводит к взаимным помехам и снижению точности фазовых измерений.

5. Применение цифрового моделирования и алгоритмов машинного обучения для оптимизации антенных решёток и метаповерхностных структур, что позволит адаптивно управлять диаграммой направленности и снижать паразитные моды в реальном времени.

Список литературы:

- [1] An J., Huang S., Chen X., Xu T., Bai Z. Research progress in geophysical exploration of the Antarctic ice sheet // *Earthquake Research Advances*. — 2023. — Т. 3(3). — 100203.
- [2] Большунов А. В., Игнатьев С. А., Горелик Г. Д., Крикун Н. С., Васильев Д. А., Ракитин И. В., Шадрин В. С. Комплексные исследования снежно-фирновой толщи в районе российской антарктической станции Восток // *Записки Горного института*. — 2025. — Т. 273. — С. 52-64.
- [3] Guo J., Li L., Liu J., Fu L., Tang X., Wang Y., Sun Y. Ground-penetrating radar survey of subsurface features at the margin of ice sheet, East Antarctica // *Journal of Applied Geophysics*. — 2022. — Т. 206. — 104816.
- [4] Schlegel R., Kulesa B., Murray T., Eisen O. Towards a common terminology in radioglaciology. // *Annals of Glaciology*. — 2022. — Т. 63(87-89). — С. 8-12.
- [5] Hawkins J. D., Lok L. B., Brennan P. V., Nicholls K. W. HF wire-mesh dipole antennas for broadband

ice-penetrating radar // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. — 2020. — T. 19(12). — C. 2172-2176.

[6] Suganya J., Baskaradas J. A., Sciacca U., Zirizzotti A. Simplified Analytical Approach for an Airborne Bent Wire Ground Penetrating RADAR Antenna System // *Radioengineering*. — 2021. — T. 30(1). — C. 215-226.

[7] Yang G., Ye S., Ji Y., Zhang X., Fang G. Radiation enhancement of an ultrawideband unidirectional folded bowtie antenna for GPR applications // *IEEE Access*. — 2020. — T. 8. — C. 182218-182228.

[8] Raza A., Lin W., Ishfaq M. K., Inam M., Masud F., Dahri M. H. A Wideband Reflector-Backed Antenna for Applications in GPR // *International Journal of Antennas and Propagation*. — 2021. — T. 2021(1). — C. 3531019.

[9] Zeising O., Humbert A. Indication of high basal melting at EastGRIP drill site on the Northeast Greenland Ice Stream // *The Cryosphere Discussions*. — 2021. — T. 2021. — C. 1-15.

[10] Alali O., Badawieh A., Alhariri M. Bandwidth Improvement of Bowtie Antenna for GPR Applications Using Antipodal Technique, Corner Bending, and Triangular Slot Modifications // *Progress in Electromagnetics Research M*. — 2021. — T. 106. — C. 83-92.

[11] Barkataki N., Borah P., Sarma U., Tiru B. Design of a 400 MHz cavity backed CPW fed bowtie antenna for GPR applications // *2021 International Conference on Industrial Electronics Research and Applications (ICIARA)*. — IEEE, 2021. — C. 1-6.

[12] Lilien D. A., Steinhage D., Taylor D., Parrenin F., Ritz C., Mulvaney R., Eisen O. Brief communication: New radar constraints support presence of ice older than 1.5 Myr at Little Dome C // *The Cryosphere*. — 2021. — T. 15(4). — C. 1881-1888.

[13] Jutila A., Haas C. C and K band microwave penetration into snow on sea ice studied with off-the-shelf tank radars // *Annals of Glaciology*. — 2025. — T. 65, e5. — C. 1-11.

[14] Haque M. A., Zakariya M. A., Al-Bawri S. S., Yusoff Z., Islam M., Saha D., Paul L. C. Quasi-Yagi antenna design for LTE applications and prediction of gain and directivity using machine learning approaches // *Alexandria Engineering Journal*. — 2023. — T. 80. — C. 383-396.

[15] Yan J. B., Li L., Nunn J. A., Dahl-Jensen D., O'Neill C., Taylor R. A., Eisen O. Multiangle, frequency, and polarization radar measurement of ice sheets // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2020. — T. 13. — C. 2070-2080.

[16] Rodriguez-Morales F., Braaten D., Mai H. T., Paden J., Gogineni P., Yan J. B., Steinhage D. A mobile, multichannel, UWB radar for potential ice core drill site identification in east Antarctica: Development and first results // *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. — 2020. — T. 13. — C. 4836-4847.

References:

[1] An J., Huang S., Chen X., Xu T., Bai Z. Research progress in geophysical exploration of the Antarctic ice sheet // *Earthquake Research Advances*. — 2023. — T. 3(3). — 100203.

[2] Bolshunov A.V., Ignatiev S.A., Gorelik G.D., Krikun N.S., Vasiliev D.A., Rakitin I.V., Shadrin V.S. Comprehensive studies of snow-firn strata in the area of the Russian Antarctic Vostok station // *Notes of the Mining Institute*. — 2025. — T. 273. — P. 52-64.

[3] Guo J., Li L., Liu J., Fu L., Tang X., Wang Y., Sun Y. Ground-penetrating radar survey of subsurface features at the margin of ice sheet, East Antarctica // *Journal of Applied Geophysics*. — 2022. — T. 206. — 104816.

[4] Schlegel R., Kulesa B., Murray T., Eisen O. Towards a common terminology in radioglaciology. // *Annals of Glaciology*. — 2022. — T. 63(87-89). — C. 8-12.

[5] Hawkins J. D., Lok L. B., Brennan P. V., Nicholls K. W. HF wire-mesh dipole antennas for broadband ice-penetrating radar // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. — 2020. — T. 19(12). — C. 2172-2176.

[6] Suganya J., Baskaradas J. A., Sciacca U., Zirizzotti A. Simplified Analytical Approach for an Airborne Bent Wire Ground Penetrating RADAR Antenna System // *Radioengineering*. — 2021. — T. 30(1). — C. 215-226.

[7] Yang G., Ye S., Ji Y., Zhang X., Fang G. Radiation enhancement of an ultrawideband unidirectional folded bowtie antenna for GPR applications // *IEEE Access*. — 2020. — T. 8. — C. 182218-182228.

[8] Raza A., Lin W., Ishfaq M. K., Inam M., Masud F., Dahri M. H. A Wideband Reflector-Backed Antenna for Applications in GPR // *International Journal of Antennas and Propagation*. — 2021. — T. 2021(1). — C. 3531019.

[9] Zeising O., Humbert A. Indication of high basal melting at EastGRIP drill site on the Northeast Greenland Ice Stream // *The Cryosphere Discussions*. — 2021. — T. 2021. — C. 1-15.

[10] Alali O., Badawieh A., Alhariri M. Bandwidth Improvement of Bowtie Antenna for GPR Applications Using Antipodal Technique, Corner Bending, and Triangular Slot Modifications // *Progress in Electromagnetics Research M*

Research M. — 2021. — Т. 106. — С. 83-92.

[11] Barkataki N., Borah P., Sarma U., Tiru B. Design of a 400 MHz cavity backed CPW fed bow-tie antenna for GPR applications // 2021 International Conference on Industrial Electronics Research and Applications (ICIARA). – IEEE, 2021. – С. 1-6.

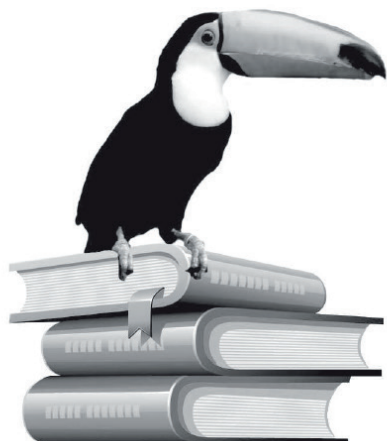
[12] Lilien D. A., Steinhage D., Taylor D., Parrenin F., Ritz C., Mulvaney R., Eisen O. Brief communication: New radar constraints support presence of ice older than 1.5 Myr at Little Dome C // The Cryosphere. — 2021. — Т. 15(4). — С. 1881-1888.

[13] Jutila A., Haas C. C and K band microwave penetration into snow on sea ice studied with off-the-shelf tank radars // Annals of Glaciology. — 2025. — Т. 65, e5. — С. 1-11.

[14] Haque M. A., Zakariya M. A., Al-Bawri S. S., Yusoff Z., Islam M., Saha D., Paul L. C. Quasi-Yagi antenna design for LTE applications and prediction of gain and directivity using machine learning approaches // Alexandria Engineering Journal. — 2023. — Т. 80. — С. 383-396.

[15] Yan J. B., Li L., Nunn J. A., Dahl-Jensen D., O'Neill C., Taylor R. A., Eisen O. Multiangle, frequency, and polarization radar measurement of ice sheets // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2020. — Т. 13. — С. 2070-2080.

[16] Rodriguez-Morales F., Braaten D., Mai H. T., Paden J., Gogineni P., Yan J. B., Steinhage D. A mobile, multichannel, UWB radar for potential ice core drill site identification in east Antarctica: Development and first results // IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. — 2020. — Т. 13. — С. 4836-4847.



ЮРКОМПАНИ

www.law-books.ru

Юридическое издательство
«ЮРКОМПАНИ»

Издание учебников,
учебных и методических
пособий, монографий,
научных статей.

Профессионально.

В максимально
короткие сроки.

Размещаем
в РИНЦ, E-Library.