

ДЕКАМЕТРОВЫЕ РАДАРЫ ИСЗФ СО РАН**ISTP SB RAS DECAMETER RADARS****О.И. Бернгардт***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, berng@iszf.irk.ru***В.И. Куркин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, kurkin@iszf.irk.ru***Д.С. Кушнарев***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, ds_k@iszf.irk.ru***К.В. Гркович***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, grkovich@iszf.irk.ru***Р.Р. Федоров***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, fedrr@iszf.irk.ru***А.И. Орлов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, andrey_i_orlov@iszf.irk.ru***В.В. Харченко***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, vitaly@iszf.irk.ru***Г.А. Жеребцов***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, gaz@iszf.irk.ru***O.I. Berngardt***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, berng@iszf.irk.ru***V.I. Kurkin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, kurkin@iszf.irk.ru***D.S. Kushnarev***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, ds_k@iszf.irk.ru***K.V. Grkovich***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, grkovich@iszf.irk.ru***R.R. Fedorov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, fedrr@iszf.irk.ru***A.I. Orlov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, andrey_i_orlov@iszf.irk.ru***V.V. Kharchenko***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, vitaly@iszf.irk.ru***G.A. Zherebtsov***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, gaz@iszf.irk.ru*

Аннотация. В рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук» планируется создание нескольких когерентных декаметровых радаров. Однако в Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН работы по созданию когерентных декаметровых радаров проводились задолго до начала финансирования этого проекта. Это позволило получить опыт эксплуатации подобных радаров, выявить технологические проблемы, которые желательно решить при создании отечественных радаров, и разработать проект радаров, имеющих более широкие возможности по диагностике ионосферы по сравнению с существующими аналогичными радарными. В работе представлено описание радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН, рассмотрены его технические недостатки и предложена структура нового радара системы СЕКИРА. Приведены результаты макетирования элементов радара СЕКИРА, продемонстрировавшие возможность его реализации. Обсуждаются потенциальные возможности использования радара в задачах исследования ионосферы на территории Российской Федерации, в том числе в высокоширотных областях.

Ключевые слова: декаметровый радар, SuperDARN, СЕКИРА, ионосфера, обратное рассеяние.

Abstract. Within the project 'National Heliogeophysical Complex of the Russian Academy of Sciences', it is planned to create several coherent decameter radars. However, in the ISTP SB RAS, creating a network of coherent decameter radars began long before the start of financing for this project. This made it possible to get a substantial experience in the operation of such radars, to identify their technological problems that it is desirable to solve when creating radars of own design, and to develop a project of radars that have broader capabilities for diagnostics of the ionosphere compared to existing radars of similar types. The paper presents an analysis of the existing EKB ISTP SB RAS radar, reviewed its technological problems and proposes the structure of the new radars of SECIRA type. The results of prototyping elements of the SECIRA radar are presented, which demonstrated the possibility of its implementation. Potential possibilities of using the radar in the ionospheric studies on the territory of the Russian Federation and in its high latitude areas are discussed.

Keywords: decameter radar, SuperDARN, SECIRA, ionosphere, back scattering.

ВВЕДЕНИЕ

Изучение проявлений космической погоды в магнитосфере, ионосфере и атмосфере Земли является одной из главных задач солнечно-земной физики. На сегодня одним из наиболее эффективных инструментов для исследований в этом направлении является международная система SuperDARN (Super Dual Auroral Radar Network) — сеть декаметровых (коротковолновых) радаров, секторы обзоров которых покрывают в Северном и Южном полушариях высокоширотные области и часть среднеширотных областей. На основе совместного анализа параметров рассеянных сигналов система SuperDARN позволяет как получить глобальную картину конвекции плазмы в высокоширотной ионосфере, являющейся важнейшим индикатором ее взаимодействия с магнитосферой, так и с высоким пространственно-временным разрешением исследовать динамику неоднородностей различных масштабов в ионосфере и верхней атмосфере. За последние 12 лет количество радаров этой сети выросло более чем вдвое, достигнув 35. Многие страны (США, Канада, Великобритания, Франция, Италия, Япония, Австралия, ЮАР, Китай, Норвегия) активно проводят ионосферные исследования в полярных и субполярных широтах обоих полушарий и интенсивно развивают сеть радаров. При этом без деятельного участия России, территория которой охватывает долготный сектор около 100°, сложно с достаточной точностью восстанавливать систему конвекции ионосферной плазмы Северного полушария и прогнозировать развитие возмущений в верхней атмосфере в периоды суровой космической погоды. Создание российской сети когерентных декаметровых радаров позволит эффективно дополнить существующую сеть радаров SuperDARN и обеспечить паритетное участие российских ученых в международной кооперации стран — участниц SuperDARN.

Решение задач мониторинга ионосферных возмущений, оказывающих существенное влияние на работу систем глобальной позиционирования, связи и радиолокации на всей территории России, с высоким временным разрешением с помощью относительно небольшого количества установок определяет важную практическую значимость подобных радаров. Исследования планируется проводить в рамках как международных, так и российских проектов и программ по нескольким направлениям. К ним относятся:

- восстановление поля ионосферной конвекции в высоких широтах РФ и уточнение полного поля ионосферной конвекции в кооперации с радарными сетями SuperDARN;
- исследование субавроральных поляризационных потоков (SAPS) и субавроральных ионных дрейфов (SAID), в том числе при интеграции с существующей сетью инструментов для оптических и ионосферных наблюдений, а также со спутниковыми измерениями;
- исследование среднеширотных и высокоширотных ионосферных мелко-, средне- и крупномасштабных неоднородностей и их связи с космической погодой и воздействием снизу — из

нейтральной атмосферы и литосферы, в том числе при интеграции с существующей сетью инструментов для сейсмических и ионосферных наблюдений, а также со спутниковыми измерениями;

- исследование магнитосферно-ионосферного взаимодействия и магнитогидродинамических волн, в том числе при интеграции с сетью инструментов для наземных магнитных наблюдений и спутниковыми измерениями;
- исследование искусственных возмущений в ионосфере, связанных работой высоко- и среднеширотных нагревных стендов;
- исследование динамики нижней части ионосферы по наблюдениям поглощения радиоволн в D- и E-слоях, в том числе при интеграции с сетью радиометров;
- исследование процессов в нейтральной атмосфере по данным метеорных наблюдений, в том числе при интеграции с существующей сетью оптических инструментов и метеорных радаров.

В рамках проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук» (НГК РАН) планируется создание нескольких когерентных декаметровых радаров. В Институте солнечно-земной физики (ИСЗФ) СО РАН работы по созданию когерентных декаметровых радаров проводились задолго до начала финансирования этого проекта. Это позволило получить опыт эксплуатации подобных радаров, выявить технические проблемы, которые желательно решить при создании отечественных радаров, и разработать проект радаров, имеющих более широкие возможности диагностики ионосферы по сравнению с существующими аналогичными радарными.

НАУЧНЫЕ ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ СЕТИ КОГЕРЕНТНЫХ РАДАРОВ

Основными механизмами формирования рассеянного сигнала, регистрируемого подобными радарными, считаются: рассеяние на магнитоориентированных ионосферных неоднородностях E- и F-слоев, рассеяние на земной (и водной) поверхности, обнаруживаемое за счет рефракции в ионосфере, рассеяние на ионизированных следах сгорания метеоров на высотах D- и E-слоев ионосферы, мезосферное эхо.

Крупно- и среднемасштабная конвекция авроральной плазмы является одним из важных процессов при изучении взаимодействия магнитосферы с ионосферой. Исследование магнитосферно-ионосферного взаимодействия является основной задачей, решаемой с помощью радаров SuperDARN. Основу составляет исследование конвекции в ионосфере по данным рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях F-слоя. Возникновение таких неоднородностей может быть обусловлено как естественными причинами, например геомагнитными бурями и суббурями, так и работой нагревных стендов, формирующих слой подобных неоднородностей в малой области над нагревным стендом [Robinson et al., 2006]. Скорость движения неоднородностей на этих высотах в основном обусловлена движением частиц в пере-

крестных электрическом и магнитном полях. Ее анализ позволяет восстановить направление и амплитуду электрического поля, что дает возможность изучать процессы в магнитосфере Земли, рассматривая проекцию магнитосферы на высокоширотные области ионосферы по магнитным силовым линиям. Для нахождения полного вектора электрического поля требуется определение полного вектора скорости и, соответственно, изучение неоднородностей в одной и той же области при помощи нескольких радаров. Следовательно, необходимо создание плотной сети таких радаров в высоких широтах [Greenwald et al., 1995; Chisham et al., 2007] и ее расширение на средние [Nishitani et al., 2019] и экваториальные [Chizurmoke et al., 2020] широты.

Другим направлением является исследование динамики крупномасштабных ионосферных неоднородностей с характерными размерами сотни километров. Основу методик составляет исследование распространения радиоволн в неоднородной ионосфере после рассеяния земной поверхностью (возвратно-наклонное зондирование). По изменениям групповой задержки, модового состава и углов прихода сигнала возможно оценить изменения характеристик ионосферы в области точки отражения и провести мониторинг крупномасштабных неоднородностей, вызывающих вариации положения точки (точек) отражения, и в том числе внутренних атмосферных волн [Oinats et al., 2016]. В настоящее время выявлено большое количество источников крупномасштабных внутренних атмосферных волн в верхней атмосфере. К ним можно отнести: сильный джоулев нагрев в высокоширотной ионосфере, связанный либо с суббурями и усиленными электроджетами, либо с усиленными ионосферными потоками в каспе; землетрясения; прохождение солнечного терминатора; запуски ракет-носителей. Такие волны, распространяясь в верхней атмосфере, вызывают перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), которые могут наблюдаться радаром. Российские радары облегчат поиск и экспериментальное исследование крупномасштабных волн, важных для понимания процессов передачи энергии в системе магнитосфера—ионосфера—атмосфера—литосфера.

Основу методик исследования нейтральной ионосферы составляет изучение рассеяния на мелкомасштабных неоднородностях ионизации, формирующихся после сгорания метеоров, — метеорных следах. Скорость движения и время жизни неоднородностей на этих высотах в основном обусловлены процессами диссипации и переноса, что дает возможность оценить скорость нейтрального ветра на высотах 80–100 км [Arnold et al., 2003]. Радары позволяют наблюдать рассеяние радиоволн на метеорных следах и на основе этого измерять скорость и направление ветра в мезосфере. Такие измерения существенно дополняют наблюдения на сети метеорных радаров и позволят интенсифицировать исследование структуры мезосферных ветров на различных пространственных масштабах.

Одним из методов изучения нижней части ионосферы является исследование поглощения радиоволн в D- и E-слоях. Поглощение может измеряться двумя методами: по интенсивности сигнала ВНЗ

[Chakraborty et al., 2018] и по уровню шума в периоды, когда излучение радара отсутствует [Berngardt et al., 2018; Bland et al., 2018]. При этом для повышения валидности метода желательно проводить измерения поглощения на нескольких частотах одновременно [Berngardt et al., 2019a]. Исследование и прогноз ионосферного поглощения являются важными практическими задачами, поскольку поглощение существенным образом влияет на амплитуды и качество приема сигналов средств радиосвязи и радиолокации. Диагностика ионосферного поглощения с помощью радаров позволяет существенно дополнить данные высокоширотных радиометрических наблюдений.

Важным направлением исследований является также изучение магнитогидродинамических волн в магнитосфере по данным когерентных радаров. Среднеширотные радары позволяют провести выделение и идентификацию таких волн, что затруднительно на высокоширотных радаров. Благодаря высокому временному разрешению радаров и широкому пространственному покрытию возможно провести детальный пространственно-временной анализ таких волн и выявить ответственные за их генерацию и динамику [Chelpanov et al., 2018; Mager et al., 2019] физические механизмы, которые затруднительно изучить другими, как наземными, так и космическими средствами.

Высокая чувствительность когерентных радаров к различным проявлениям космической погоды определяет основные прикладные задачи сети таких радаров:

- мониторинг ионосферных возмущений, оказывающих существенное влияние на работу систем связи, навигации, радиолокации и других технологических систем на территории России;
- мониторинг условий прохождения радиоволн в секторах обзора радаров, создающий основу для эффективного прогноза поглощения и условий распространения радиоволн, в том числе и оптимальных частот в КВ-радиоканалах в различных геофизических условиях;
- изучение и мониторинг процессов в системе магнитосфера—ионосфера—атмосфера—литосфера, являющиеся основой прогноза возмущений, влияющих на функционирование различных радиотехнических средств и технологических систем.

АППАРАТНОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ РАДАРОВ СЕТИ SUPERDARN

Сеть когерентных декаметровых радаров SuperDARN [Greenwald et al., 1995; Chisham et al., 2007; Nishitani et al., 2019] и аналогичных им радаров [Berngardt et al., 2015a] является одним из эффективных современных наземных средств исследования магнитосферно-ионосферного взаимодействия и мониторинга верхней атмосферы в большой пространственной области. Система радаров SuperDARN в настоящее время насчитывает более 35 радаров, и их количество постоянно растет. Положения и секторы обзора радаров приведены на рис. 1.

Радары сети SuperDARN являются установками с аналогичным аппаратным и программным обеспечением. Радар представляет собой моностатическую установку с сектором обзора $\sim 50^\circ$ и максимальной дальностью работы 3500–4500 км. Это позволяет обеспечить пространственное покрытие порядка 1 млн кв. км. Радары работают в диапазоне частот 8–20 МГц со средней излучаемой мощностью ~ 600 Вт, что позволяет использовать их в режиме постоянного мониторинга. Сектор обзора радара разбит на фиксированное число направлений (лучей), общее количество которых обычно составляет от 16 до 24. Ширина одного луча — от 3° до 6° в зависимости от рабочей частоты. Пространственное разрешение радара составляет от 15 до 45 км, временное разрешение в регулярном режиме работы порядка 1–2 мин.

Работа когерентного радара состоит в послылке радиосигнала специальной формы, который распространяется в ионосфере и рассеивается на неоднородностях среды, встречающихся на его пути. Часть мощности посланного сигнала возвращается в место излучения в виде рассеянного сигнала и принимается радаром. Форма излучаемого радиосигнала и методика обработки результатов позволяют обеспечивать хорошее пространственное (точность определения дальности до неоднородностей) и спектральное (точность определения скорости неоднородностей) разрешение. Рассеяние назад является наиболее интенсивным для неоднородностей с масштабами вдоль луча зрения порядка половины излучаемой длины волны, поэтому подобные когерентные радары чувствительны к плазменным неоднородностям с характерными размерами несколько десятков метров. Разница частот излученного и принимаемого сигналов для высот 150–450 км характеризует ско-

рость перемещения неоднородности под действием перекрещенных электрического поля в ионосфере и магнитного поля Земли. Несмотря на то, что теория формирования и развития подобных неоднородностей в настоящее время еще находится в стадии разработки, экспериментальные исследования показывают хорошее соответствие подобной модели результатам, получаемым на когерентных радарх. Необходимо отметить, что наблюдение когерентного эха от ионосферных неоднородностей на радарх SuperDARN возможно только при соблюдении определенных (ракурсных) условий распространения радиоволн по отношению к магнитному полю Земли. Такие условия при распространении коротких радиоволн хорошо выполняются в полярных и приполярных областях, что, в свою очередь, обуславливает высокую практическую ценность сети SuperDARN для исследований высокоширотных ионосферных эффектов. Для работы радары используют многоимпульсные аперiodические последовательности коротких импульсов. Использование многоимпульсных последовательностей позволяет одновременно улучшить спектральное и пространственное разрешение радара [Farley, 1972].

Для радара SuperDARN длительность традиционной 7-импульсной зондирующей последовательности составляет ~ 70 мс с периодом повторения ~ 100 мс [Chisham et al., 2007].

Традиционным способом обработки принятого сигнала на этих радарх является расчет его автокорреляционных матриц или усредненных комплекснозначных автокорреляционных функций (АКФ). АКФ аппроксимируются модельными функциями для получения оценок мощности рассеяния, продольной доплеровской скорости и ширины спектра сигнала как функций дальности от радара. Программное

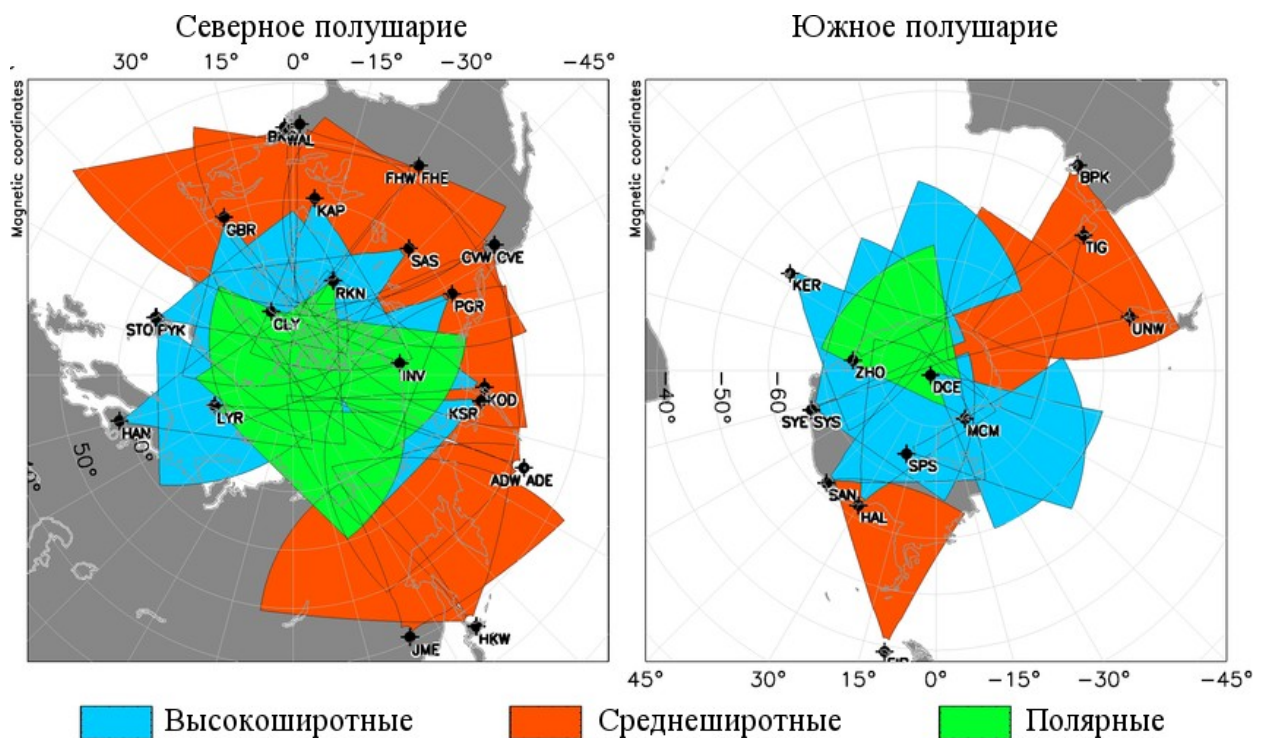


Рис. 1. Положение радаров SuperDARN и их секторы обзора (по данным [vt.superdarn.org] на ноябрь 2019 г.)

обеспечение радаров позволяет получать данные трех уровней детализации: квадратурные компоненты сигнала (IQdat), усредненные корреляционные функции сигнала (RawACF) и обработанные данные (FitACF) [RST, 2019].

РАДАР ЕКВ ИСЗФ СО РАН

Первый российский радар, аналогичный радарам SuperDARN, был развернут ИСЗФ СО РАН совместно с Институтом геофизики УрО РАН на территории обсерватории «Арти» Института геофизики УрО РАН (пос. Арти Свердловской области, 56.5° N, 58.5° E). Его приемо-передающая аппаратура, представляющая собой радар типа CUTLASS [Lester et al., 2004], создана в Университете Лейстера (UK) и закуплена при финансовой поддержке СО РАН. Фазированная антенная решетка (ФАР) радара представляет собой две стандартные для радаров SuperDARN линейные ФАР — 16 антенн в приемно-передающей решетке и 4 антенны в приемной. Геометрия радара и его общий вид приведены на рис. 2.

С декабря 2012 г. радар работает в режиме регулярных наблюдений. На основе данных, полученных на радаре, проведены многочисленные эксперименты, в том числе долговременные: исследования магнитосферных ОНЧ-колебаний [Mager et al., 2015; Shelpanov et al., 2018], внутренних акустических волн [Oinats et al., 2016], уникальные наблюдения ионосферных эффектов, связанных с падением метеорита «Челябинск» [Berngardt et al., 2015b], первые регулярные наблюдения за уровнем коротковолновых шумов во время солнечных вспышек [Berngardt et al., 2018, 2019a]. Кроме того, проведены первые эксперименты по работе радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН в двухпозиционном режиме [Berngardt et al., 2015c], разработаны улучшенные зондирующие последовательности [Berngardt et al., 2015d] и получены радиолокационные уравнения для импульсных радаров этого типа [Berngardt et al., 2016], разработаны эффективные методы идентификации сигналов, рассеянных земной поверхностью [Lavygin et al., 2020].

Технологические недостатки радара ЕКВ и пути их устранения

Опыт долговременной эксплуатации радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН позволил выявить основные технологические недостатки, усложняющие использование радара для решения современных исследовательских задач.

Идентификация типов сигналов

Неоднородности, рассеяние на которых формирует принимаемый радаром сигнал, различны, поэтому одной из основных проблем при интерпретации данных является проблема различения сигналов, рассеянных, например, земной поверхностью и ионосферой. В настоящее время существует два основных подхода к идентификации таких сигналов: по спектральным характеристикам, полученным в результате усреднения [Blanchard et al., 2009; Ribeiro et al., 2011], и посредством анализа полной формы рассеянных сигналов до их усреднения [Lavygin et al., 2020]. Как показали эксперименты, анализ полной формы рассеянных сигналов более эффективен [Lavygin et al., 2020], но требует значительного увеличения частоты оцифровки принятых сигналов, что невозможно сделать на существующем оборудовании. Таким образом, важной технической проблемой, подлежащей решению, является замена аналоговой приемной части радара ЕКВ на цифровые приемники с высокой частотой оцифровки.

Пространственное, временное и спектральное разрешение

При изучении динамики и особенно скоростей ионосферных неоднородностей в коротковолновом диапазоне также возникают сложности. Характерные скорости неоднородностей в ионосфере существенно ниже скорости звука на ионосферных высотах и составляют порядка десятков и сотен метров в секунду, поэтому необходимо измерять доплеровские смещения с точностью не хуже единиц герц. Использование простых радиоимпульсов приводит к тому, что пространственное разрешение радара становится сравнимым с характерными масштабами ионосферных неоднородностей.

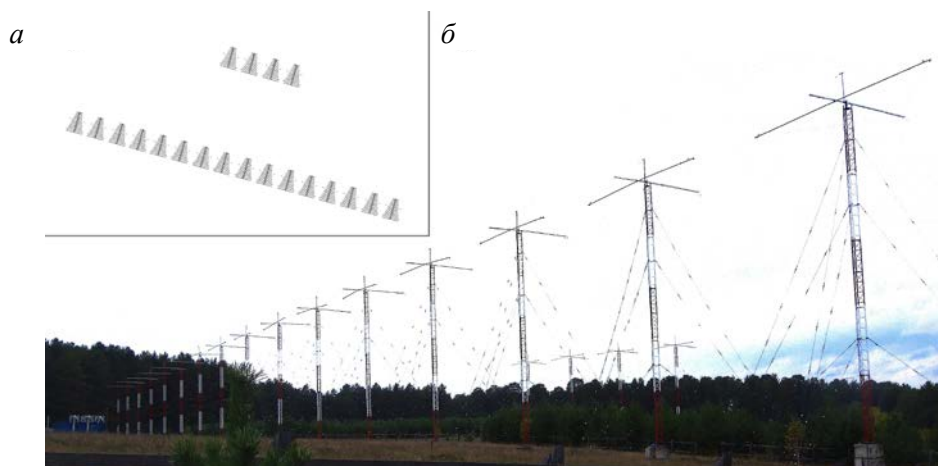


Рис. 2. Радар ЕКВ ИСЗФ СО РАН: а — схема фазированной антенной решетки; б — общий вид радара

Повышение пространственного разрешения без потери спектрального достигается использованием сложных сигналов со специально подобранными свойствами и методов обработки принятых сигналов, которые позволяют одновременно обеспечить высокое пространственное и спектральное разрешение. В основном применяются сложные сигналы, представляющие собой многоимпульсные последовательности [Farley, 1972]. В настоящее время при регулярных измерениях на радарх SuperDARN используются последовательности нескольких типов: стандартная 7-импульсная [Barthes et al., 1998], 8-импульсная katscan [Ribeiro et al., 2013], 13-импульсная [Greenwald et al., 2008]. Наиболее современные радары могут использовать аperiodические последовательности [Spaleta et al., 2008].

Как показал предварительный анализ, характерное время жизни ионосферных неоднородностей, вызывающих обратное рассеяние, не превышает 250 мс, тогда как время жизни неоднородностей, влияющих на форму сигналов, рассеянных земной поверхностью, обычно больше [Lavugin et al., 2020]. Основными характеристиками сигналов, используемых для получения геофизических данных, являются доплеровское смещение частоты и спектральная ширина сигнала. Точность определения этих параметров зависит от спектрального разрешения метода, не всегда достаточного при использовании существующих зондирующих последовательностей. Ситуацию можно улучшить, если применять последовательности, состоящие из большего числа импульсов. В частности, использование более длинных последовательностей на декаметровом радаре ЕКВ ИСЗФ СО РАН позволяет существенно улучшить спектральное разрешение метода [Berngardt et al., 2015d]. Несмотря на разработку и запуск в октябре 2014 г. на радаре ЕКВ новых 10-импульсных последовательностей [Berngardt et al., 2015d], обеспечивающих повышенное спектральное разрешение измерений, а также на разработку более сложных и длинных последовательностей на основе линеек Голомба, спектральное разрешение зачастую остается недостаточным либо требуется слишком большое время накопления сигналов. Таким образом, многие разработанные нами новые, более длительные зондирующие последовательности могут быть использованы только после модернизации приемопередающего оборудования радара.

Кроме того, значительное повышение потенциала радара (по мощности, дальности и пространственному разрешению) достигается использованием фазоманипулированных импульсов, но эта методика также не может быть реализована в настоящее время на оборудовании радара и требует его модернизации.

Учет характеристик ионосферы и пространственная привязка наблюдений

Вследствие особенностей частотного диапазона таких радаров существенное влияние на траекторию сигнала оказывает ионосферная рефракция, изменяющая траекторию распространения радиоволны и задержку принятого сигнала. Траектория распро-

странения радиоволны влияет на точность как идентификации типа рассеянного сигнала, так и определения параметров ионосферных неоднородностей — их скорости, высоты и географических координат. Определение параметров сигнала создает базу для решения важных практических задач, в том числе для применения когерентных радаров для мониторинга состояния ионосферы.

Основой учета характеристик ионосферы являются измерения высотно-широотно-долготного распределения электронной концентрации. Корректный учет позволяет как уточнить географическую привязку измерений, так и повысить точность определения спектральных параметров неоднородностей. В настоящее время основными подходами к решению такой задачи являются использование ионосферных моделей, корректируемых в реальном времени по данным различных инструментов [Larquier et al., 2013], и использование многочастотных наблюдений [Ponomarenko et al., 2009; Gillies et al., 2011]. Одним из возможных решений этой проблемы является применение самого радара для диагностики параметров фоновой ионосферы. Однако существующая аппаратура радара, ориентированная на излучение коротких импульсов, не позволяет использовать радар в режиме ионозонда с высокой скоростью перестройки частот. Для реализации такого режима необходима существенная аппаратная модернизация радара, включающая расширение частотного диапазона (5–25 МГц) и использование более сложных антенн, обеспечивающих функционирование радара в этом режиме, а также других передатчиков.

Калибровка угломестных наблюдений

Одним из основных методов уточнения траектории распространения радиосигнала является проведение угломестных наблюдений. Из-за длины волны, сравнимой с расстоянием от антенны до земной поверхности, температурных вариаций характеристик земной поверхности и динамики аналоговых частей приемопередающих трактов для проведения угломестных наблюдений фазовые характеристики антенных систем требуют регулярной калибровки [Chisham, 2018; Ponomarenko et al., 2018], желательна автоматическая. В настоящее время на радарх SuperDARN основными методами калибровки являются калибровка по положению сигнала, рассеянного земной поверхностью [Ponomarenko et al., 2015], сигнала, рассеянного E-слоем ионосферы [Ponomarenko et al., 2018], и сигнала, рассеянного на метеорных следах [Chisham, Freeman, 2013; Chisham, 2018; Berngardt et al., 2019b].

Тем не менее структура ФАР радара ЕКВ не позволяет проводить точных угломестных наблюдений: вследствие большого расстояния между основной и интерферометрической решетками появляется неопределенность $2\pi l$ в измерении фазы, существенно затрудняющая интерпретацию наблюдений. Очевидным решением является изменение формы ФАР с соответствующей модернизацией приемной аппаратуры и системы фазирования радара.

Реализация двухпозиционной схемы зондирования

В настоящее время радары системы SuperDARN работают в двухпозиционном режиме в узком смысле: каждый радар работает независимо, а определение ионосферных параметров проводится по обработанным данным сети радаров [Greenwald et al., 1995; Chisham et al., 2007; Nishitani et al., 2019]. Первые продолжительные наблюдения в двухпозиционном режиме в широком смысле на подобных радаров были проведены совместно радаром ЕКВ и радиотелескопом УТР2 (Украина) [Berngardt et al., 2015c]. В результате было показано, что существующая аппаратура и мощность позволяют работать в режиме, когда один радар используется в качестве передатчика для другого. Такой режим работы позволяет расширить области, в которых возможно определение ионосферных параметров, и получить дополнительные данные для уточнения характеристик ионосферных неоднородностей. Поэтому очевидно, что требуется модернизация аппаратуры, которая даст возможность всем радарам, входящим в российскую сеть, работать в синхронном режиме.

КОГЕРЕНТНЫЕ РАДАРЫ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

Проект радаров системы СЕКИРА (СЕТЬ Когерентных Ионосферных РАдаров) был разработан в ИСЗФ СО РАН для решения технических проблем, выявленных при эксплуатации радара ЕКВ ИСЗФ СО РАН, и существенного расширения потенциала сети российских когерентных декаметровых радаров, создаваемых в ходе реализации проекта «Национальный гелиогеофизический комплекс Российской академии наук» (НГК РАН). В основе радара лежат полностью цифровое формирование и прием сигналов, что является на сегодня основным подходом при создании новых радаров [Bristow, 2019].

В отличие от ФАР радаров ЕКВ и SuperDARN, ФАР радара системы СЕКИРА Т-образная и состоит из 16 передающих и 8 приемных антенн, расположенных в двух перпендикулярных линейных фазированных решетках. Расстояние между антеннами совпадает с расстояниями в ФАР радаров SuperDARN и составляет порядка 15 м. Геометрия расположения приемных антенн позволяет минимизировать проблемы, связанные с фазовой неопределенностью принятого сигнала, в том числе стабильно различать сигналы, приходящие с заднего лепестка диаграммы направленности. Таким образом, сектор обзора радара удваивается и принимает вид двух симметричных секторов с раскрытием порядка 50° каждый. Антенны (линейные размеры не более 15 м) должны быть широкополосными (5–25 МГц) и слабо влияющими друг на друга. Максимальная мощность излучения каждой антенны составляет 1 кВт.

Схема фазированной антенной решетки (ФАР) и блок-схема приема-передающей части радара приведены на рис. 3, а и б соответственно.

Поскольку приемная антенная решетка перпендикулярна передающей, определение угла места принятого сигнала является более сложной задачей,

чем при стандартной геометрии ФАР (две параллельные линейные антенные решетки) радаров SuperDARN. Эту задачу предполагается решать в цифровом виде, что требует использования 24 независимых синхронизированных приемников, реализованных в виде блока аналого-цифровых преобразователей (АЦП), и многоканальной системы цифровой обработки сигналов, реализующей прием радиосигналов на несущей частоте (с шириной полосы, превышающей частоту зондирующего сигнала). Блок защиты радиоприемных устройств (РПУ) осуществляет защиту приемного тракта как от влияния передатчиков, так и от неожиданных внешних помех типа грозовой активности. Блок многоканальных цифровых синтезаторов частот и цифро-аналоговых преобразователей (ЦАП) с произвольной установкой фазы осуществляют формирование сигналов для каждой излучающей антенны и тем самым формируют диаграмму направленности ФАР на передачу. Радиопередающие устройства (РПДУ) являются оконечными усилителями, обеспечивающими пиковую мощность сигнала до 700 Вт в импульсном режиме и до 300 Вт в непрерывном, а также необходимый контроль за уровнем сигнала и согласованностью антенн.

Для повышения уровня сигнала от системы ЦАП до РПДУ используются предварительные усилители. Блок управляющих сигналов обеспечивает синхронизацию режимов приема-передачи всего комплекса и формирует другие управляющие сигналы. Общее управление комплексом, обработка и хранение данных осуществляются центром обработки сигналов. Синхронизация работы радаров производится через навигационные спутники и интернет, точность абсолютной временной привязки составляет до 10 нс, что позволяет работать нескольким радарам СЕКИРА как единому целому и использовать излучаемые сигналы друг друга.

Непрерывный режим работы даст возможность использовать радар как самостоятельное средство диагностики фоновой ионосферы методом наклонного зондирования, в том числе в качестве излучающего и/или приемного комплекса для российской сети ЛЧМ-ионозондов [Ivanov et al., 2003] и излучающего комплекса для ЛЧМ-пеленгаторов [Vertogradov et al., 2013], что обеспечит значительное увеличение площади покрытия ионосферными наблюдениями и интеграцию с уже существующим в Российской Федерации оборудованием для ионосферных наблюдений.

Для отработки элементов радара СЕКИРА нами был создан радар MAGW, являющийся промежуточным звеном между радаром CUTLASS и СЕКИРА. В радаре одновременно используется оборудование типа CUTLASS и дополнительное аналого-цифровое оборудование, разработанное в ИСЗФ СО РАН. MAGW имеет ФАР, промежуточную по форме между ФАР радаров SuperDARN и СЕКИРА. Общий вид радара MAGW и форма его ФАР приведены на рис. 4.

В настоящее время радар MAGW находится в стадии тестовых испытаний и согласования запуска в режиме регулярных наблюдений. Сравнение характеристик радаров всех типов приведено в таблице.

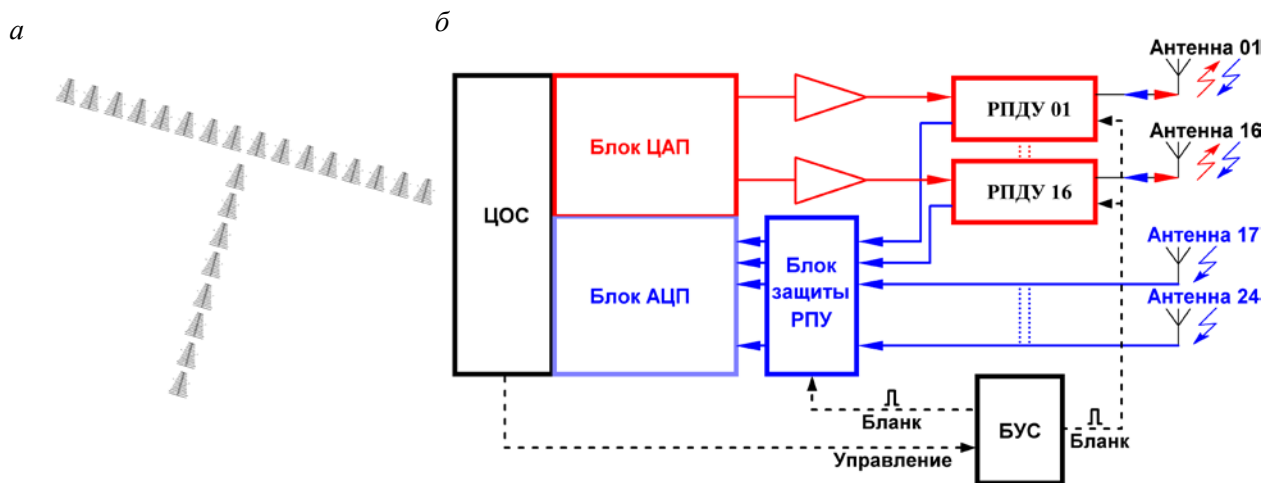


Рис. 3. Схема ФАР (а) и блок-схема радара системы СЕКИРА (б): РПУ — радиоприемное устройство; РПДУ — радиопередающее устройство; БУС — блок управляющих сигналов; блок ЦАП — блок цифро-аналоговых преобразователей; блок АЦП — блок аналого-цифровых преобразователей; ЦОС — центр обработки сигналов; синие линии — цепи приема сигналов, красные — цепи передачи сигналов, черные штриховые линии — цепи управляющих сигналов

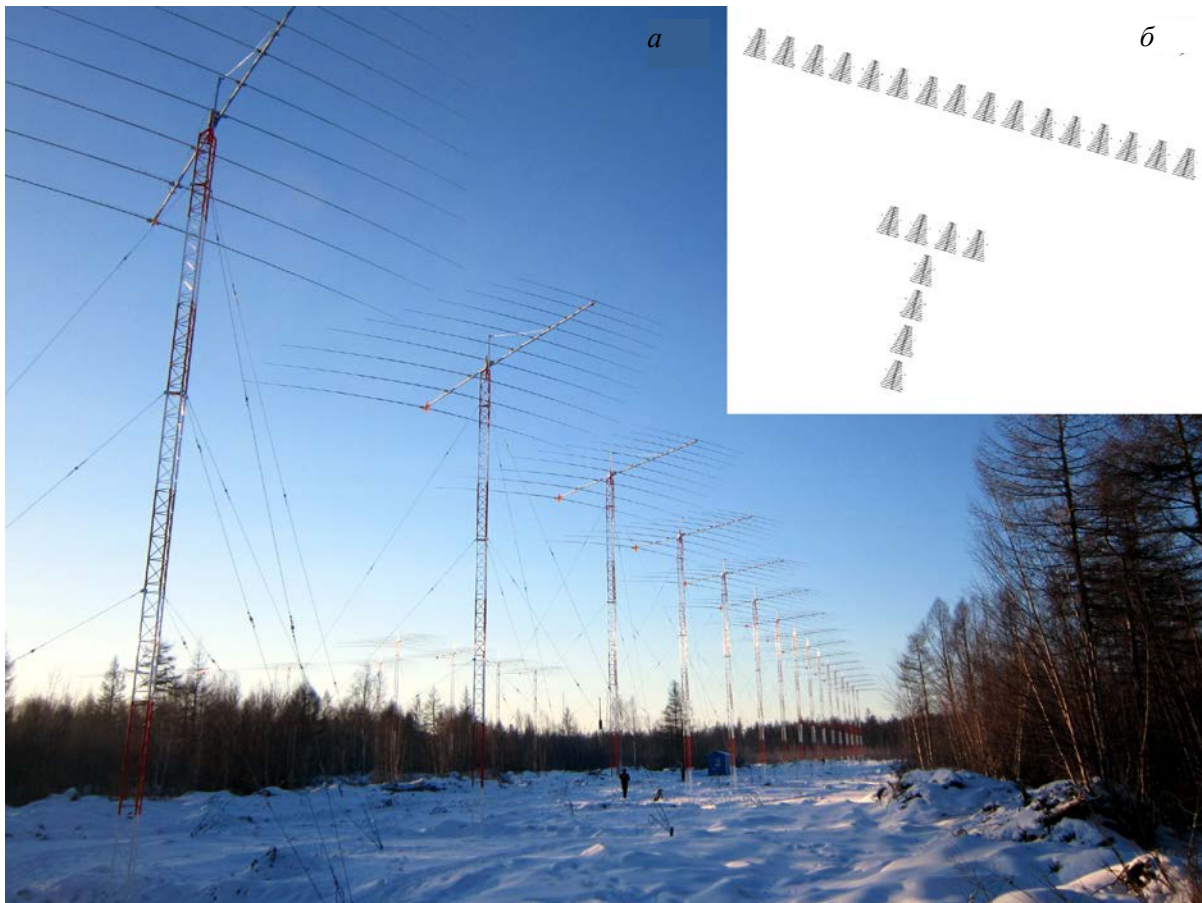


Рис. 4. Радар MAGW: а — общий вид ФАР; б — схема расположения антенн в ФАР

Сравнительные характеристики радаров, разработанных в ИСЗФ СО РАН

	ЕКВ	MAGW (СЕКИРА v.1)	СЕКИРА v. 2
Приемо-передающее оборудование	CUTLASS	CUTLASS + собственные приемники	собственная разработка
Фазированная антенная решетка	две параллельные ФАР (16+4 антенны)	две параллельные и одна перпендикулярная ФАР (16+4+4 антенны)	две перпендикулярные ФАР (16+8 антенн)
Система фазирования по азимуту на передачу	аналоговая	аналоговая	цифровая
Система фазирования по азимуту на прием	аналоговая	аналоговая на 20 антенн и цифровая на 4 антенны	цифровая на 24 антенны
Приемники	2 аналоговых	2 аналоговых и 4 цифровых	24 цифровых прямой оцифровки
Частотный диапазон	8–20 МГц	8–20 МГц	5–25 МГц
Точность абсолютной синхронизации	100 мкс	100 мкс	10 нс
Количество независимых частотных каналов	2	2	2
Количество независимых пространственных каналов на 1 частотный канал (излучение)	1	1	16
Количество независимых пространственных каналов на 1 частотный канал (прием)	2	6	24
Минимальный дискрет зондирующего импульса	100 мкс	100 мкс	10 мкс
Возможность внутримпульсной фазовой модуляции	нет	нет	есть
Работа непрерывными сигналами	нет	нет	есть
Средняя мощность излучения в импульсном режиме	600 Вт	600 Вт	600 Вт
Средняя мощность излучения в непрерывном режиме	–	–	300 Вт
Формат хранения данных	IQdat	IQdat	IQdat
Ширина луча ДН	3–6°	3–6°	3–12°
Эффективный сектор обзора по азимуту	50°	50° + 50° (задний лепесток)	50° + 50° (задний лепесток)
Неопределенность определения угла места	высокая	низкая	низкая
Степень готовности к работе	работает с 2012 г.	развернут, в процессе запуска	в процессе разработки

МАКЕТ РАДАРА СЕКИРА

Для оценки работоспособности радара системы СЕКИРА в рамках проекта НГК РАН было проведено макетирование его отдельных блоков.

Макетирование цифровой части радара

Цифровая часть радара является самой сложной и самой требовательной к вычислительным ресурсам. Макетирование цифровой части радара СЕКИРА выполнялось на основе аппаратного блока производства National Instruments. Использованное при этом шасси NI PXIe 1085 структурно состоит из Intel PC-совместимого компьютера и шины данных PXIe. Шина PXIe является ключевым элементом системы, объединяющей все цифровые блоки радара. Шина обеспечивает передачу данных между блоками со скоростью до 24 Гбит/с (до 8 Гбит/с между двумя блоками). Шина имеет 16 слотов для плат ПЛИС (программируемая логическая интегральная схема) и один слот для модуля распределения синхронизирующих сигналов и генерации тактового сигнала.

Ключевое отличие ПЛИС от процессоров и микроконтроллеров состоит в отсутствии заранее зало-

женной схемной логики. Данные устройства позволяют создавать высокопроизводительные аппаратные системы цифровой обработки сигналов. Общий вид цифрового ядра системы приведен на рис. 5.

Разработанное программное обеспечение радара состоит из трех основных частей — блока формирования и излучения сигналов, блока регистрации принятых сигналов и блока основной управляющей программы. Программирование модулей ядра осуществлялось путем построения логических блок-схем в специализированной графической среде программирования LabVIEW.

В результате макетирования и проведенного тестирования было показано, что разработанный программно-аппаратный макет цифровой части радара СЕКИРА позволяет функционально повторить радар CUTLASS. При этом радар может работать и с антенной решеткой радара MAGW (рис. 4, б), и с новой решеткой радара СЕКИРА (рис. 3, а). В макете задействовано порядка 2/3 аппаратных ресурсов (вентилей) плат приемников и 1/2 вентилей плат передатчиков. Существенный запас по ресурсам ПЛИС позволяет в дальнейшем реализовать и модернизировать остальные режимы работы радара.

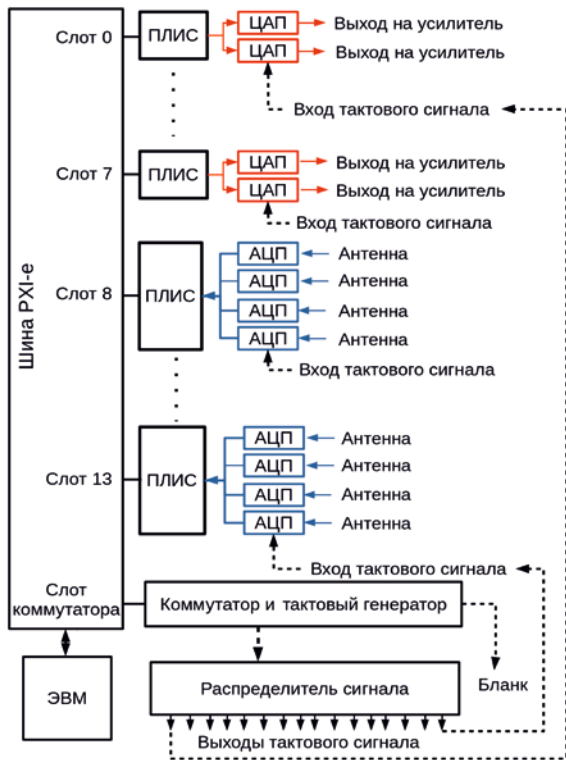


Рис. 5. Блок-схема цифровой части макета радара СЕКИРА. Синими линиями обозначены цепи приема сигналов, красными — цепи передачи сигналов, черными штрихами — цепи управляющих сигналов

Макетирование передатчиков радара

Макетирование передающей части радара проводилось на основе передатчиков (РПДУ), разработанных специально для ИСЗФ СО РАН Омским филиалом НПО Завод «Волна». Каждый передатчик состоит из выходного усилителя мощности, системы контроля состояния антенно-фидерных устройств и системы контроля и управления, заключенных в единый металлический блок-корпус. РПДУ может работать в импульсном и непрерывном режимах. Передатчик обеспечивает пиковую выходную мощность на антенно-фидерную систему до 700 Вт в импульсном режиме и среднюю выходную мощность ~200 Вт в непрерывном режиме. В передатчике реализована система оперативного контроля его температуры и состояния антенно-фидерной системы с передачей данных на управляющую ЭВМ.

Аналоговые цепи РПДУ обеспечивают полосу пропускания 1.5–30 МГц и имеют выходные фильтры на эту полосу частот. Зависимость мощности от частоты в двух режимах работы приведена на рис. 6.

Как показало макетирование, данные передатчики обладают удовлетворительными характеристиками и могут быть использованы в радарх системы СЕКИРА.

Макетирование антенн радара

Важной частью радара являются его антенные системы. Необходимость энергетической эффективности радара предполагает использование антенн, хо-

рошо согласованных на весь рабочий диапазон частот 5–25 МГц. Для обеспечения хорошо согласованной и эффективной (коэффициент стоячей волны (КСВ) <2.5 в рабочем диапазоне) работы антенной решетки антенны должны быть, с одной стороны, достаточно больших размеров, с другой стороны, слабо воздействующими на соседние антенны. Нами был создан макет антенны (омега-логопериодика), удовлетворяющей этим параметрам. Это логопериодическая антенна, диполи которой согнуты под углом ~60°. Такая геометрия антенны позволяет минимизировать влияние соседних антенн друг на друга даже при плотном расположении в ФАР. Общий вид антенны приведен на рис. 7, а. Макетирование антенны проводилось с использованием программы MMANA. На рис. 7, б показано поведение КСВ как функции частоты. Видно, что антенна энергетически эффективна и ее КСВ не превышает 2.5 в диапазоне рабочих частот радара. Макетирование показало, что антенная система на базе данной антенны может применяться в радарх системы СЕКИРА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Радары системы SuperDARN изначально разрабатывались с целью исследования конвекции в полярных областях. Однако их длительная эксплуатация позволила расширить диапазон геофизических задач, для решения которых они могут применяться, одновременно выявив проблемы, возникающие при подобном использовании радаров.

В работе сформулированы основные направления исследований на сети когерентных декаметровых радаров СЕКИРА, разрабатываемых в ИСЗФ СО РАН в рамках проекта НГК РАН. Изложены предпосылки к созданию отечественных радаров нового типа и приведен полный спектр предполагаемых геофизических задач и современных подходов к их решению. Описаны структура радаров СЕКИРА и используемые при их проектировании технические решения, продемонстрированы отличия новых радаров от радаров SuperDARN. Приведены результаты макетирования отдельных составляющих радара СЕКИРА, показывающие их пригодность к использованию в радарх нового поколения.

Радары системы СЕКИРА совместно с уже развернутыми ранее ИСЗФ СО РАН радарными (рис. 8) должны, во-первых, расширить возможности отечественных радаров по сравнению с радарными типа SuperDARN и, во-вторых, эффективно интегрироваться в существующие отечественные и международные сети геофизических инструментов. Планируется покрытие территории РФ секторами обзоров парных радаров, расположенных в Свердловской (ЕКВ, 56° N, 58° E), Иркутской (ИРК, 53° N, 105° E) и Магаданской (МАГ, 60° N, 150° E) областях и на севере Красноярского края (НОР, 69° N, 88° E).

Развертывание радаров СЕКИРА позволит существенно повысить информативность фундаментальных и прикладных исследований ионосферных процессов над территорией Российской Федерации, включая высокие широты, в том числе благодаря интеграции сети радаров СЕКИРА с существующими

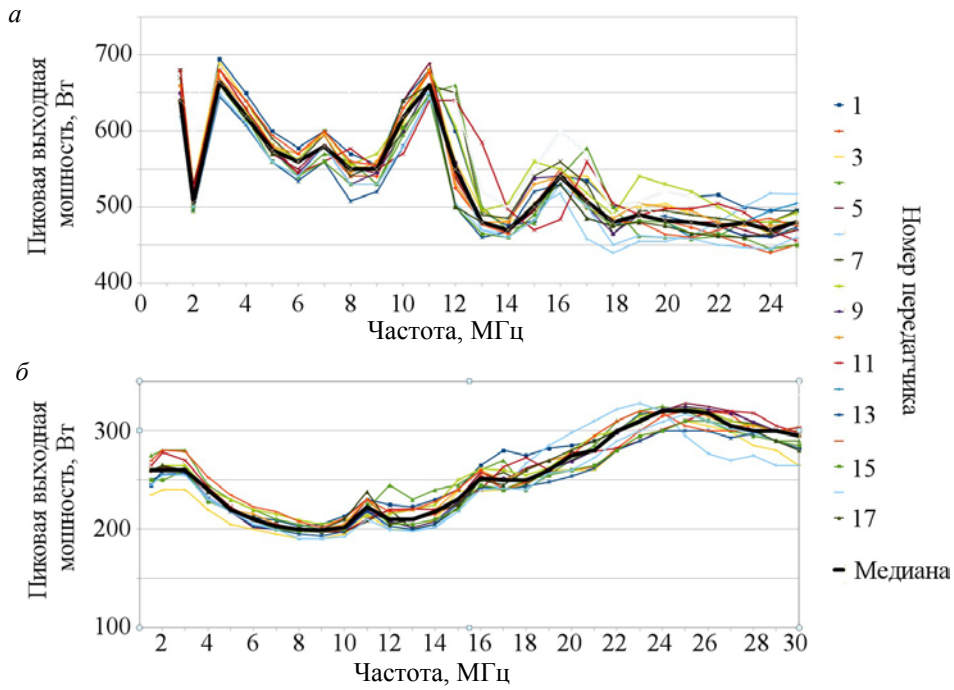


Рис. 6. Выходная мощность передатчиков в импульсном (а) и непрерывном (б) режимах излучения в зависимости от частоты

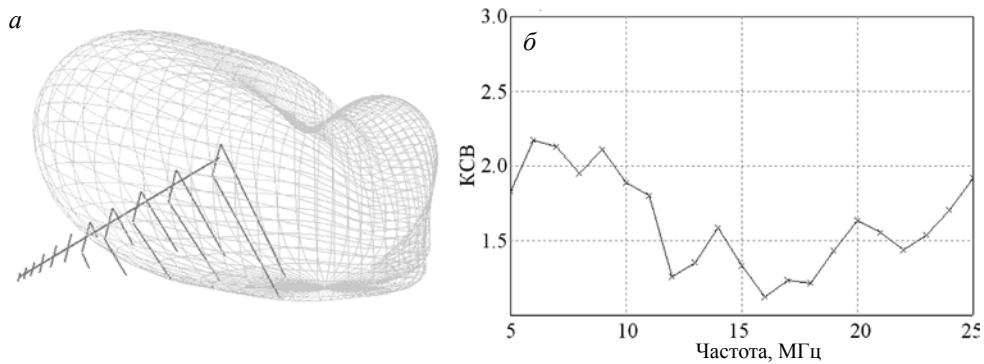


Рис. 7. Общий вид макета антенны и ее диаграмма направленности (а), а также ее КСВ как функция частоты (б)

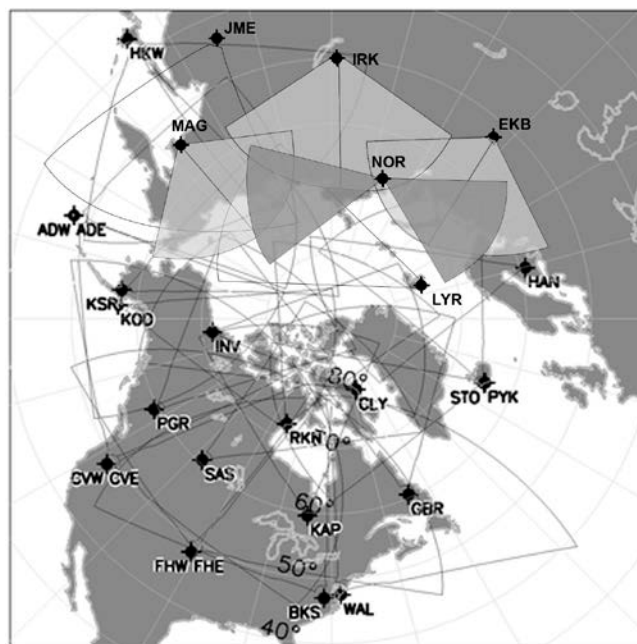


Рис. 8. Предполагаемые секторы обзоров уже развернутых и планируемых радаров системы СЕКИРА. Контурами показаны секторы обзоров радаров сети SuperDARN

российскими сетями инструментов для ионосферных, оптических, магнитных и метеорных наблюдений. Высокое временное разрешение радаров, широкий пространственный охват каждого инструмента, развитие новых методик зондирования и анализа данных позволят выйти на современный уровень исследований магнитосферно-ионосферно-атмосферно-литосферного взаимодействия и в реальном времени решать задачи как исследования возникающих при этом явлений, так и их эффективного прогноза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Arnold N.F., Cook P.A., Robinson T.R., Lester M., et al. Comparison of D-region Doppler drift winds measured by the SuperDARN Finland HF radar over an annual cycle using the Kiruna VHF meteor radar // *Annales Geophysicae*. 2003 V. 21, N 10. P. 2073–2082. DOI: [10.5194/angeo-21-2073-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-2073-2003).

Barthes L., Andre D.A., Cerisier J.-C., Villain J.-P. Separation of multiple echoes using a high-resolution spectral analysis for SuperDARN HF radars // *Radio Sci.* 1998. V. 33, N 4. P. 1005–1017. DOI: [10.1029/98rs00714](https://doi.org/10.1029/98rs00714).

Berngardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: First results // *Earth, Planets and Space*. 2015a. V. 67, N 1. P. 143. DOI: [10.1186/s40623-015-0302-3](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0302-3).

Berngardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynina A.A., et al. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of “Chelyabinsk” meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015b. V. 120, N 12. P. 10,754–10,771. DOI: [10.1002/2015JA021549](https://doi.org/10.1002/2015JA021549).

Berngardt O.I., Kutelev K.A., Kurkin V.I., et al. Bistatic sounding of high-latitude ionospheric irregularities using a Decameter EKB Radar and an UTR-2 Radio Telescope: First results // *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2015c. V. 58, N 6. P. 390–408. DOI: [10.1007/s11141-015-9614-1](https://doi.org/10.1007/s11141-015-9614-1).

Berngardt O.I., Voronov A.L., Grkovich K.V. Optimal signals of Golomb ruler class for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and experiment // *Radio Sci.* 2015d. V. 50, N 6. P. 486–500. DOI: [10.1002/2014RS005589](https://doi.org/10.1002/2014RS005589).

Berngardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations // *Radio Sci.* 2016 V. 51, N 10. P. 1703–1724. DOI: [10.1002/2016rs006081](https://doi.org/10.1002/2016rs006081).

Berngardt O.I., Ruohoniemi J.M., Nishitani N., et al. Attenuation of decameter wavelength sky noise during X-ray solar flares in 2013–2017 based on the observations of mid-latitude HF radars // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 173. P. 1–13. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.03.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.022).

Berngardt O.I., Ruohoniemi J.M., St-Maurice J.-P., et al. Global diagnostics of ionospheric absorption during X-ray solar flares based on 8- to 20-MHz noise measured by over-the-horizon radars // *Space Weather*. 2019a. V. 17, N 6. P. 907–924. DOI: [10.1029/2018SW002130](https://doi.org/10.1029/2018SW002130).

Berngardt O.I., Fedorov R.R., Ponomarenko P., Grkovich K.V. Interferometric calibration and the first elevation observations at EKB ISTP SB RAS radar at 10–12 MHz // *arXiv e-prints*. 2019b. [arXiv: 1912.05788 \[physics.geo-ph\]](https://arxiv.org/abs/1912.05788).

Blanchard G.T., Sundeen S., Baker K.B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics // *Radio Sci.* 2009. V. 44, N 5, RS5012. DOI: [10.1029/2009rs004141](https://doi.org/10.1029/2009rs004141).

Bland E.C., Heino E., Kosch M.J., Partamies N. SuperDARN radar-derived HF radio attenuation during the September 2017 solar proton events // *Space Weather*. 2018. V. 16, iss. 10. P. 1455–1469. DOI: [10.1029/2018sw001916](https://doi.org/10.1029/2018sw001916).

Bristow W.A. Application of RADAR imaging analysis to SuperDARN observations // *Radio Sci.* 2019. V. 54, N 7. P. 692–703. DOI: [10.1029/2019rs006851](https://doi.org/10.1029/2019rs006851).

Chakraborty S., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Nishitani N. Characterization of short-wave fadeout seen in daytime SuperDARN ground scatter observations // *Radio Sci.* 2018. V. 53, N 4. P. 472–484. DOI: [10.1002/2017RS006488](https://doi.org/10.1002/2017RS006488).

Chelpanov M.A., Mager O.V., Mager P.N., et al. Properties of frequency distribution of Pc5-range pulsations observed with the Ekaterinburg decameter radar in the nightside ionosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018. V. 167. P. 177–183. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.002).

Chisham G. Calibrating SuperDARN interferometers using meteor backscatter // *Radio Sci.* 2018. V. 53, N 6. P. 761–774. DOI: [10.1029/2017RS006492](https://doi.org/10.1029/2017RS006492).

Chisham G., Freeman M.P. A reassessment of SuperDARN meteor echoes from the upper mesosphere and lower thermosphere // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013. V. 102. P. 207–221. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.018).

Chisham G., Lester M., Milan S.E., et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions // *Surv. Geophys.* 2007. N 28. P. 33–109. DOI: [10.1007/s10712-007-9017-8](https://doi.org/10.1007/s10712-007-9017-8).

Chizurumoke M.M., Yeoman T.K., Wright D.M., et al. A ray tracing simulation of HF ionospheric radar performance at African equatorial latitudes // *Radio Sci.* 2020. V. 55, N 2, e2019RS006936. DOI: [10.1029/2019rs006936](https://doi.org/10.1029/2019rs006936).

Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements // *Radio Sci.* 1972. V. 7, N 6. P. 661–666. DOI: [10.1029/rs007i006p00661](https://doi.org/10.1029/rs007i006p00661).

Gillies R.G., Hussey G.C., Sofko G.J., et al. Improvement of HF coherent radar line-of-sight velocities by estimating the refractive index in the scattering volume using radar frequency shifting // *J. Geophys. Res.* 2011. V. 116, A01302. DOI: [10.1029/2010JA016043](https://doi.org/10.1029/2010JA016043).

Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., et al. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection // *Space Sci. Rev.* 1995 V. 71. P. 761–796. DOI: [10.1007/BF00751350](https://doi.org/10.1007/BF00751350).

Greenwald R.A., Oksavik K., Barnes R., et al. First radar measurements of ionospheric electric fields at sub-second temporal resolution // *Geophys. Res. Lett.* 2008. V. 35, N 3, L03111. DOI: [10.1029/2007gl032164](https://doi.org/10.1029/2007gl032164).

Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., et al. Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research // *Radiophys. and Quant. Electron.* 2003. V. 46, N 11. P. 821–851. DOI: [10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c](https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c).

Larquier S. de, Ponomarenko P., Ribeiro A.J., et al. On the spatial distribution of decameter-scale subauroral ionospheric irregularities observed by SuperDARN radars // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013. V. 118, N 8. P. 5244–5254. DOI: [10.1002/jgra.50475](https://doi.org/10.1002/jgra.50475).

Lavygin I.A., Lebedev V.P., Grkovich K.V., Berngardt O.I. Identifying ground scatter and ionospheric scatter signals by using their fine structure at Ekaterinburg Decameter Coherent Radar // *IET Radar, Sonar & Navigation*. 2020. V. 14, N 1. P. 167–176. DOI: [10.1049/iet-rsn.2019.0192](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0192).

Lester M., Chapman P., Cowley S.W.H., et al. Stereo CUTLASS – A new capability for the SuperDARN HF radars // *Ann. Geophysicae*. 2004. V. 22, N 2. P. 459–473. DOI: [10.5194/angeo-22-459-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-459-2004).

Mager P.N., Berngardt O.I., Klimushkin D.Yu., et al. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015. V. 130–131. P. 112–126. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.05.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.017).

Mager O.V., Chelpanov M.A., Mager P.N., et al. Conjugate ionosphere-magnetosphere observations of a sub-Alfvénic compressional intermediate-*m* wave: A case study using EKB radar and Van Allen probes // *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019. V. 124, N 5. P. 3276–3290. DOI: [10.1029/2019JA026541](https://doi.org/10.1029/2019JA026541).

Nishitani N., Ruohoniemi J.M., Lester M., et al. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars // *Progress in Earth and Planet. Sci.* 2019. V. 6, N 1. P. 27. DOI: [10.1186/s40645-019-0270-5](https://doi.org/10.1186/s40645-019-0270-5).

Oinats A., Nishitani N., Ponomarenko P., et al. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data // *Earth, Planets and Space.* 2016. V. 68, N 1. P. 8. DOI: [10.1186/s40623-016-0390-8](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0390-8).

Ponomarenko P.V., St-Maurice J.-P., Waters C.L., et al. Refractive index effects on the scatter volume location and Doppler velocity estimates of ionospheric HF backscatter echoes // *Ann. Geophys.* 2009. V. 27. P. 4207–4219. DOI: [10.5194/angeo-27-4207-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-4207-2009).

Ponomarenko P., Nishitani N., Oinats A.V., et al. Application of ground scatter returns for calibration of HF interferometry data // *Earth, Planets and Space.* 2015. V. 67, N 1. P. 138. DOI: [10.1186/s40623-015-0310-3](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0310-3).

Ponomarenko P.V., St-Maurice J.-P., McWilliams K.A. Calibrating HF radar elevation angle measurements using E layer backscatter echoes // *Radio Sci.* 2018. V. 53, N 11. P. 1438–1449. DOI: [10.1029/2018rs006638](https://doi.org/10.1029/2018rs006638).

Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., et al. A new approach for identifying ionospheric backscatter in midlatitude SuperDARN HF radar observations // *Radio Sci.* 2011. V. 46, RS4011. DOI: [10.1029/2011RS004676](https://doi.org/10.1029/2011RS004676).

Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Ponomarenko P.V., et al. A comparison of SuperDARN ACF fitting methods // *Radio Sci.* 2013. V. 48, N 3. P. 274–282. DOI: [10.1002/rds.20031](https://doi.org/10.1002/rds.20031).

Robinson T.R., McCreath I.W., van Eyken A.P., Wright D.M., Thornhill J.D., Thomas E.C., Lester M., Dhillon R.S., Yeoman T.K. First observations of SPEAR-induced artificial backscatter from CUTLASS and the EISCAT Svalbard radars // *Ann. Geophys.* 2006. V. 24, iss. 1. P. 291–309. DOI: [10.5194/angeo-24-291-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-291-2006).

RST – Radar Software Toolkit. 2019. URL: <https://github.com/SuperDARN/rst> (дата обращения 20 ноября 2019 г.).

Spaleta J., Bristow W.A., Parris R.T., Balaji M., Watari S. Enhanced Line of Sight Velocity Analysis Using an Aperiodic Pulse Sequence on the Kodiak and King Salmon Radars // *SuperDARN 2008 Workshop.* 02–06 June 2008, Newcastle, Australia. 2008. URL: <http://www.tiger.latrobe.edu.au/superdarn2008/procCD/presentations/1070.pdf> (дата обращения 20 ноября 2019 г.).

Vertogradov G.G., Uryadov V.P., Vertogradova E.G., et al. Chirp ionosonde–radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation // *Radiophys. and Quant. Electron.* 2013. V. 56, N 5. P. 259–275. DOI: [10.1007/s11141-013-9431-3](https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3).

URL: vt.superdam.org (дата обращения 20 ноября 2019 г.).

REFERENCES

Arnold N.F., Cook P.A., Robinson T.R., Lester M., Chapman P.J., Mitchell N. Comparison of D-region Doppler drift winds measured by the SuperDARN Finland HF radar over an annual cycle using the Kiruna VHF meteor radar. *Annales Geophysicae.* 2003, vol. 21, no. 10, pp. 2073–2082. DOI: [10.5194/angeo-21-2073-2003](https://doi.org/10.5194/angeo-21-2073-2003).

Barthes L., Andre D.A., Cerisier J.-C., Villain J.-P. Separation of multiple echoes using a high-resolution spectral

analysis for SuperDARN HF radars. *Radio Sci.* 1998, vol. 33, no. 4, pp. 1005–1017. DOI: [10.1029/98rs00714](https://doi.org/10.1029/98rs00714).

Bergardt O.I., Zolotukhina N.A., Oinats A.V. Observations of field-aligned ionospheric irregularities during quiet and disturbed conditions with EKB radar: First results. *Earth, Planets and Space.* 2015a, vol. 67, no. 1, p. 143. DOI: [10.1186/s40623-015-0302-3](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0302-3).

Bergardt O.I., Perevalova N.P., Dobrynya A.A., Kutel'ev K.A., Shestakov N.V., Bakhtiarov V.F., Kusonsky O.A., Zagretdinov R.V., Zherebtsov G.A. Toward the azimuthal characteristics of ionospheric and seismic effects of “Chelyabinsk” meteorite fall according to the data from coherent radar, GPS, and seismic networks. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2015b, vol. 120, no. 12, pp. 10,754–10,771. DOI: [10.1002/2015JA021549](https://doi.org/10.1002/2015JA021549).

Bergardt O.I., Kutelev K.A., Kurkin V.I., Grkovich K.V., Yampolsky Yu.M., Kashcheyev A.S., Kashcheyev S.B., Galushko V.G., Grigorieva S.A. и Kusonsky O.A. Bistatic sounding of high-latitude ionospheric irregularities using a Decameter EKB Radar and an UTR-2 Radio Telescope: First results. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2015c, vol. 58, no. 6, pp. 390–408. DOI: [10.1007/s11141-015-9614-1](https://doi.org/10.1007/s11141-015-9614-1).

Bergardt O.I., Voronov A.L., Grkovich K.V. Optimal signals of Golomb ruler class for spectral measurements at EKB SuperDARN radar: Theory and experiment. *Radio Sci.* 2015d, vol. 50, no. 6, pp. 486–500. DOI: [10.1002/2014RS005589](https://doi.org/10.1002/2014RS005589).

Bergardt O.I., Kutelev K.A., Potekhin A.P. SuperDARN scalar radar equations. *Radio Sci.* 2016, vol. 51, no. 10, pp. 1703–1724. DOI: [10.1002/2016rs006081](https://doi.org/10.1002/2016rs006081).

Bergardt O.I., Ruohoniemi J.M., Nishitani N., Shepherd S.G., Bristow W.A., Miller E.S. Attenuation of decameter wavelength sky noise during X-ray solar flares in 2013–2017 based on the observations of midlatitude HF radars. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 173, pp. 1–13. DOI: [10.1016/j.jastp.2018.03.022](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2018.03.022).

Bergardt O.I., Ruohoniemi J.M., St-Maurice J.-P., Marchaudon A., Kosch M.J., Yukimatu A.S., Nishitani N., Shepherd S.G., Marcucci M.F., Hu H., Nagatsuma T., Lester M. Global diagnostics of ionospheric absorption during X-ray solar flares based on 8- to 20-MHz noise measured by over-the-horizon radars. *Space Weather.* 2019a, vol. 17, no. 6, pp. 907–924. DOI: [10.1029/2018SW002130](https://doi.org/10.1029/2018SW002130).

Bergardt O.I., Fedorov R.R., Ponomarenko P., Grkovich K.V. Interferometric calibration and the first elevation observations at EKB ISTP SB RAS radar at 10–12 MHz. *arXiv e-prints.* 2019b. [arXiv: 1912.05788](https://arxiv.org/abs/1912.05788) [physics.geo-ph].

Blanchard G.T., Sundeen S., Baker K.B. Probabilistic identification of high-frequency radar backscatter from the ground and ionosphere based on spectral characteristics. *Radio Sci.* 2009, vol. 44, no. 5, RS5012. DOI: [10.1029/2009rs004141](https://doi.org/10.1029/2009rs004141).

Bland E.C., Heino E., Kosch M.J., Partamies N. SuperDARN radar-derived HF radio attenuation during the September 2017 solar proton events. *Space Weather.* 2018, vol. 16, iss. 10, pp. 1455–1469. DOI: [10.1029/2018sw001916](https://doi.org/10.1029/2018sw001916).

Bristow W.A. Application of RADAR imaging analysis to SuperDARN observations. *Radio Sci.* 2019, vol. 54, no. 7, pp. 692–703. DOI: [10.1029/2019rs006851](https://doi.org/10.1029/2019rs006851).

Chakraborty S., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Nishitani N. Characterization of short-wave fadeout seen in daytime SuperDARN ground scatter observations. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, no. 4, pp. 472–484. DOI: [10.1002/2017RS006488](https://doi.org/10.1002/2017RS006488).

Chelpanov M.A., Mager O.V., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Bergardt O.I. Properties of frequency distribution of Pc5-range pulsations observed with the Ekaterinburg decameter radar in the nightside ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2018, vol. 167, pp. 177–183. DOI: [10.1016/j.jastp.2017.12.002](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2017.12.002).

Chisham G. Calibrating SuperDARN interferometers using meteor backscatter. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, no. 6, pp. 761–774. DOI: [10.1029/2017RS006492](https://doi.org/10.1029/2017RS006492).

Chisham G., Freeman M.P. A reassessment of SuperDARN meteor echoes from the upper mesosphere and lower thermo-

sphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 102, pp. 207–221. DOI: [10.1016/j.jastp.2013.05.018](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.05.018).

Chisham G., Lester M., Milan S.E., Freeman M.P., Bristow W.A., McWilliams K.A., Ruohoniemi J.M., et al. A decade of the Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN): scientific achievements, new techniques and future directions. *Surv. Geophys.* 2007, no. 28, pp. 33–109. DOI: [10.1007/s10712-007-9017-8](https://doi.org/10.1007/s10712-007-9017-8).

Chizurumoke M.M., Yeoman T.K., Wright D.M., Milan S.E., James M.K. A ray tracing simulation of HF ionospheric radar performance at African equatorial latitudes. *Radio Sci.* 2020, vol. 55, no. 2, e2019RS006936. DOI: [10.1029/2019rs006936](https://doi.org/10.1029/2019rs006936).

Farley D.T. Multiple-pulse incoherent-scatter correlation function measurements. *Radio Sci.* 1972, vol. 7, no. 6, pp. 661–666. DOI: [10.1029/rs007i006p00661](https://doi.org/10.1029/rs007i006p00661).

Gillies R.G., Hussey G.C., Sofko G.J., Ponomarenko P.V., McWilliams K.A. Improvement of HF coherent radar line-of-sight velocities by estimating the refractive index in the scattering volume using radar frequency shifting. *J. Geophys. Res.* 2011, vol. 116, A01302. DOI: [10.1029/2010JA016043](https://doi.org/10.1029/2010JA016043).

Greenwald R.A., Baker K.B., Dudeney J.R., Pinnock M., Jones T.B., Thomas E.C., Villain J.-P., Cerisier J.-C., et al. DARN/SuperDARN: A global view of the dynamics of high-latitude convection. *Space Sci. Rev.* 1995, vol. 71, pp. 761–796. DOI: [10.1007/BF00751350](https://doi.org/10.1007/BF00751350).

Greenwald R.A., Oksavik K., Barnes R., Ruohoniemi J.M., Baker J., Talaat E.R. First radar measurements of ionospheric electric fields at sub-second temporal resolution. *Geophys. Res. Lett.* 2008, vol. 35, no. 3, L03111. DOI: [10.1029/2007gl032164](https://doi.org/10.1029/2007gl032164).

Ivanov V.A., Kurkin V.I., Nosov V.E., Uryadov V.P., Shumaev V.V. Chirp ionosonde and its application in the ionospheric research. *Radiophys. and Quant. Electron.* 2003, vol. 46, no. 11, pp. 821–851. DOI: [10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c](https://doi.org/10.1023/B:RAQE.0000028576.51983.9c).

Larquier S. de, Ponomarenko P., Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Sterne K.T., Lester M. On the spatial distribution of decameter-scale subauroral ionospheric irregularities observed by SuperDARN radars. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2013, vol. 118, no. 8, pp. 5244–5254. DOI: [10.1002/jgra.50475](https://doi.org/10.1002/jgra.50475).

Lavygin I.A., Lebedev V.P., Grkovich K.V., Berngardt O.I. Identifying ground scatter and ionospheric scatter signals by using their fine structure at Ekaterinburg Decameter Coherent Radar. *IET Radar, Sonar & Navigation.* 2020, vol. 14, no. 1, pp. 167–176. DOI: [10.1049/iet-rsn.2019.0192](https://doi.org/10.1049/iet-rsn.2019.0192).

Lester M., Chapman P., Cowley S.W.H., Crooks S., Davies J., Hamadyk P., McWilliams K., Milan S.E., et al. Stereo CUTLASS – A new capability for the SuperDARN HF radars. *Ann. Geophysicae.* 2004, vol. 22, no. 2, pp. 459–473. DOI: [10.5194/angeo-22-459-2004](https://doi.org/10.5194/angeo-22-459-2004).

Mager P.N., Berngardt O.I., Klimushkin D.Yu., Zolotukhina N.A., Mager O.V. First results of the high-resolution multibeam ULF wave experiment at the Ekaterinburg SuperDARN radar: Ionospheric signatures of coupled poloidal Alfvén and drift-compressional modes. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2015, vol. 130–131, pp. 112–126. DOI: [10.1016/j.jastp.2015.05.017](https://doi.org/10.1016/j.jastp.2015.05.017).

Mager O.V., Chelpanov M.A., Mager P.N., Klimushkin D.Yu., Berngardt O.I. Conjugate ionosphere-magnetosphere observations of a sub-Alfvénic compressional intermediate-*m* wave: A case study using EKB radar and Van Allen probes. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, no. 5, pp. 3276–3290. DOI: [10.1029/2019JA026541](https://doi.org/10.1029/2019JA026541).

Nishitani N., Ruohoniemi J.M., Lester M., Baker J.B.H., Koustov A.V., Shepherd S.G., Chisham G., Hori T., et al. Review of the accomplishments of mid-latitude Super Dual Auroral Radar Network (SuperDARN) HF radars. *Progress in Earth and Planet. Sci.* 2019, vol. 6, no. 1, p. 27. DOI: [10.1186/s40645-019-0270-5](https://doi.org/10.1186/s40645-019-0270-5).

Oinats A., Nishitani N., Ponomarenko P., Berngardt O., Ratovsky K. Statistical characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances revealed from the Hokkaido East and Ekaterinburg HF radar data. *Earth, Planets and Space.* 2016, vol. 68, no. 1, p. 8. DOI: [10.1186/s40623-016-0390-8](https://doi.org/10.1186/s40623-016-0390-8).

Ponomarenko P.V., St-Maurice J.-P., Waters C.L., Gillies R.G., Koustov A.V. Refractive index effects on the scatter volume location and Doppler velocity estimates of ionospheric HF backscatter echoes. *Ann. Geophys.* 2009, vol. 27, pp. 4207–4219. DOI: [10.5194/angeo-27-4207-2009](https://doi.org/10.5194/angeo-27-4207-2009).

Ponomarenko P., Nishitani N., Oinats A.V., Tsuya T., St-Maurice J.-P. Application of ground scatter returns for calibration of HF interferometry data. *Earth, Planets and Space.* 2015, vol. 67, no. 1, p. 138. DOI: [10.1186/s40623-015-0310-3](https://doi.org/10.1186/s40623-015-0310-3).

Ponomarenko P.V., St-Maurice J.-P., McWilliams K.A. Calibrating HF radar elevation angle measurements using E layer backscatter echoes. *Radio Sci.* 2018, vol. 53, no. 11, pp. 1438–1449. DOI: [10.1029/2018rs006638](https://doi.org/10.1029/2018rs006638).

Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Baker J.B.H., Clausen S., de Larquier S., Greenwald R.A. A new approach for identifying ionospheric backscatter in midlatitude SuperDARN HF radar observations. *Radio Sci.* 2011, vol. 46, RS4011. DOI: [10.1029/2011RS004676](https://doi.org/10.1029/2011RS004676).

Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Ponomarenko P.V., Clausen L.B.N., Baker J.B.H., Greenwald R.A., Oksavik K., de Larquier S. A comparison of SuperDARN ACF fitting methods. *Radio Sci.* 2013, vol. 48, no. 3, pp. 274–282. DOI: [10.1002/rds.20031](https://doi.org/10.1002/rds.20031).

Robinson T.R., McCreary I.W., van Eyken A.P., Wright D.M., Thornhill J.D., Thomas E.C., Lester M., Dhillon R.S., Yeoman T.K. First observations of SPEAR-induced artificial backscatter from CUTLASS and the EISCAT Svalbard radars. *Ann. Geophys.* 2006, vol. 24, iss. 1, pp. 291–309. DOI: [10.5194/angeo-24-291-2006](https://doi.org/10.5194/angeo-24-291-2006).

RST – Radar Software Toolkit. 2019. URL: <https://github.com/SuperDARN/rst>. (accessed November 20, 2019).

Spaleta J., Bristow W.A., Parriss R.T., Balaji M., Watari S. Enhanced line of sight velocity analysis using an aperiodic pulse sequence on the Kodiak and King Salmon Radars. *SuperDARN 2008 Workshop.* 02–06 June 2008, Newcastle, Australia. 2008. URL: <http://www.tiger.latrobe.edu.au/superdarn2008/procCD/presentations/1070.pdf> (accessed November 20, 2019).

Vertogradov G.G., Uryadov V.P., Vertogradova E.G., Vertogradov V.G., Kubatko S.V. Chirp ionosonde–radiodirection finder as a new tool for studying the ionosphere and radio-wave propagation. *Radiophys. and Quant. Electron.* 2013, vol. 56, no. 5, pp. 259–275. DOI: [10.1007/s11141-013-9431-3](https://doi.org/10.1007/s11141-013-9431-3).

URL: vt.superdarn.org (accessed November 20, 2019).

Как цитировать эту статью

О.И. Бернгардт, В.И. Куркин, Д.С. Кушнарев, Гркович К.В., Федоров Р.Р., Орлов А.И., Харченко В.В., Жеребцов Г.А. Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН. *Солнечно-земная физика.* 2019. Т. 6, № 2. С. 77–90. DOI: [10.12737/szf-62202006](https://doi.org/10.12737/szf-62202006).