УДК:621.396, 551.510.535
DOI: 10.62955/0135-3748-2026-472
ORCID: 0000-0001-7828-1090

ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРЯМЫХ УГЛОМЕСТНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ НА ПРОТОТИПЕ РАДАРА СЕКИРА

Федоров Р.Р.[1], Бернгардт О.И.[1], Орлов А.И.[1], Подлесный А.В.[1], Лавыгин И.А.[1], Поддельский А.И.[2]

[1]Институт солнечно-земной физики Сибирского отделения Российской академии наук, Иркутск, Россия, fedrr@iszf.irk.ru
[2]Институт космофизических исследований и распространения радиоволн Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, Россия

THE FIRST RESULTS OF DIRECT MEASUREMENTS OF ELEVATION ANGLE BY SECIRA RADAR PROTOTYPE

R.R. Fedorov[1], O.I. Berngardt[1], A.I. Orlov[1], A.V. Podlesnyi[1], I.A. Lavygin[1], A.I. Poddelsky[2]

[1]Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia, fedrr@iszf.irk.ru
[2]Institute of Cosmophysical Research and Radio Wave Propagation FEB RAS, Petropavlovsk-Kamchatsky, Russia

Аннотация. В работе изложена схема программно-аппаратной модернизации радара CUTLASS до прототипа радара нового поколения СЕКИРА. Представлен алгоритм детектирования сигналов, рассеянных на метеорных следах. На основе длительных наблюдений с октября 2025 г. по май 2026 г. продемонстрирована работоспособность дополнительного угломестного комплекса, разработанного в ИСЗФ СО РАН, и оценено качество угломестных наблюдений на радаре.

Ключевые слова: радиолокация, рассеяние на метеорных следах, интерферометрия.

Abstract. Paper describes software and hardware modifications from CUTLASS type radar to next generation SECIRA radar prototype. Meteor trail echo detection algorithm is described, workability of the new interferometric system is shown and quality of elevation angle measurements is estimated based on long-term observations (Oct 2025 - May 2026).

Keywords: radar, meteor trail echo, interferometric measurements.

ВВЕДЕНИЕ

Важной задачей современных геофизических исследований является диагностика ионосферных и магнитосферных эффектов во время геомагнитных возмущений. Для этой цели широко используются радары когерентного рассеяния сети SuperDARN, обладающие высокой дальностью работы (до 4500 тыс. км) и широким сектором обзора (до 1 млн кв. км). При этом важной задачей является географическая привязка наблюдаемых неоднородностей: радиоволны частот, на которых работают эти радары (8–20 МГц), испытывают существенную рефракцию в ионосфере, поэтому траектория распространения лучей отличается от прямолинейной и определение географического положения без учета рефракции по групповой задержке и азимуту приводит к большим ошибкам (до 1000 км). Для частичной компенсации эффектов рефракции используется угломестный прием сигнала: зная частоту зондирующего сигнала и угол места его прихода, можно рассчитать траекторию распространения радиоволны и тем самым точнее привязать наблюдения к их географическому положению.

На радарах этого типа азимут зондирования определяется схемой фазирования луча основной (приемо-передающей решетки), а для ведения угломестных измерений устанавливается интерферометрическая решетка, параллельная основной. В радарах сети SuperDARN интерференционная решетка, обычно состоящая из четырех антенн, отнесена от основной решетки на расстояние от 50 до 100 м. К сожалению, такое расположение интерферометрической решетки вызывает неопределенность в определении угла места (так называемая неопределенность 2^{π}). Эта неопределенность зависит от расстояния между антеннами, зондирующей частоты и азимута, на котором происходит излучение [Chisham, Freeman, 2013]. Проблема раскрытия этой неопределенности решается на подобных радарах различными способами — как программными, так и аппаратными. Одним из аппаратных способов является установка дополнительных антенн, обычно параллельных основной решетке.

В работе представлены первые результаты длительных наблюдений за углом места прихода радиоволны на радаре MAGW ИСЗФ СО РАН с раскрытием неопределенности угла места аппаратными методами и сравнения полученных углов места с результатами стандартных угломестных наблюдений на базовых (основной и интерферометрической) решетках радара, полученными программными методами.

МОДЕРНИЗАЦИЯ СТАНДАРТНОЙ АППАРАТУРЫ РАДАРА CUTLASS

Радар MAGW ИСЗФ СО РАН — это прототип радара нового поколения российской сети когерентных радаров СЕКИРА [Бернгардт и др., 2020], являющийся программно-аппаратной модернизацией стандартного радара CUTLASS [Lester et al., 2004] сети SuperDARN. На радаре установлена дополнительная приемная решетка из четырех антенн, расположенная перпендикулярно основной решетке с эквидистантным расположением

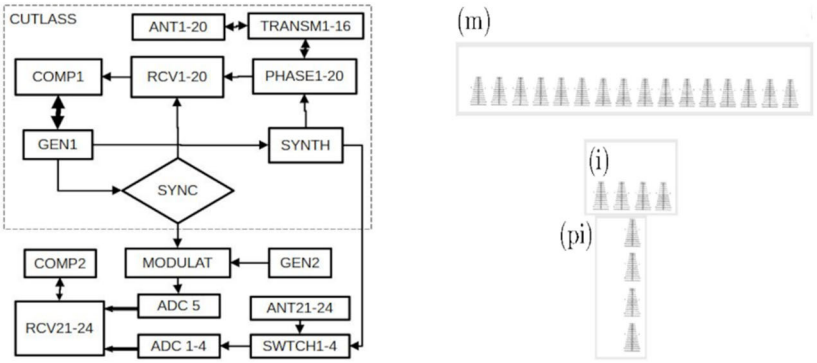

Рис. 1. Блок-схема подключения новой аппаратной части (слева) и схема антенной решетки радара MAGW (справа): (m) — основная приемо-передающая решетка, (i) — стандартная интерферометрическая приемная решетка, (pi) — новая дополнительная решетка СЕКИРА

антенн (15.25 м), и программно-аппаратное обеспечение для синхронизации этой антенной решетки с основным (стандартным) оборудованием радара и цифрового приема с раздельной записью сигнала каждой из новых антенн (рис. 1). Геометрия дополнительной решетки позволяет расположить антенны достаточно близко друг к другу и исключить неопределенность угла места аппаратно, хотя и усложняет определение углов места тем, что формирование диаграммы направленности должно происходить в цифровом виде.

Для регистрации сигналов с новой антенной решетки был использован цифровой приемник собственной разработки [Kurkin et al., 2024]. Четыре канала приемника использовались для записи сигнала с антенн, один канал — для записи импульса синхронизации от стандартной аппаратуры радара CUTLASS. Приемник оснащен комплектом защитных ключей и предусилителей собственной разработки [Kurkin et al., 2024] для изоляции платы АЦП от антенного тракта в моменты излучения зондирующих импульсных сигналов и в случае грозовых разрядов. Регистрация квадратурных компонент принятого сигнала ведется на частоте оцифровки 10 кГц. Система регистрации работает только с одним частотным каналом радара на частоте порядка 8 МГц. В таком виде радар MAGW представляет собой прототип радара СЕКИРА нового поколения.

ПОИСК ПАРАМЕТРОВ МЕТЕОРНОГО РАССЕЯНИЯ НА ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКЕ

Одним из способов проверки работоспособности радара является сравнение получаемых углов места со стандартными наблюдениями. Стандартные методы определения угла места, используемые на радарах SuperDARN и аналогичных, заключаются в проведении специальных (калибровочных) экспериментов по определению разницы фаз между основной и интерференционной решетками, необходимых для компенсации особенностей распространения сигнала в двух аналогово-цифровых трактах. После калибровки можно проводить фазоразностные угломерные наблюдения. Калибровка радара может проводиться различными методами [Chisham, Freeman, 2013; Berngardt et al., 2020], одним из наиболее точных является, по-видимому, калибровка по рассеянию на метеорных следах.

При использовании дополнительной решетки радара MAGW проблема калибровки стоит менее остро, поскольку используется цифровая приемная система с цифровыми приемниками прямой оцифровки, которая одинаково работает для всех антенн новой решетки. Рассмотрим задачу детектирования и определения пространственных характеристик (дальность, азимут, угол места) сигналов обратного рассеяния на метеорных следах, что позволит сравнить стандартный метод угломестных наблюдений и угломестные наблюдения на дополнительной решетке.

Ранее было показано, что метеорное рассеяние, регистрируемое радарами этого типа, сосредоточено в диапазоне дальностей 180–270 км, поэтому в данной работе ограничимся этим диапазоном дальностей. Для детектирования сигналов, рассеянных на метеорных следах, мы использовали алгоритм детектирования underdense метеорных следов [Fedorov, Berngardt, 2021], дополнительно упрощенный. Поскольку излучающая антенная решетка линейна, то в первом приближении волновой вектор излучаемого сигнала лежит в поверхности конуса, вершина которого находится в фазовом центре антенной решетки, высота совпадает с прямой, соединяющей фазовые центры антенн, а угол при вершине определяется азимутом выбранного луча. Азимут α и угол места принимаемого рассеянного сигнала β связаны друг с другом и разницей фаз в решетке СЕКИРы соотношениями

$$\alpha = atan\left(\frac{2\pi b\, sin(\alpha_0)}{\Delta\phi\lambda}\right), \quad \beta = acos\left(\frac{sin(\alpha_0)}{sin(\alpha)}\right), \tag{1}$$

где α_0 — азимут луча зрения радара в горизонтальной плоскости (задается системой фазирования радара); b — шаг установки антенн в решетке СЕКИРы (15.25 м); Δϕ — измеренная разница фаз между антеннами интерферометра; λ — рабочая длина волны. При больших углах места азимут начинает приближаться к высоте конуса, эффективная база интерферометра

СЕКИРА уменьшается и увеличивается влияние ошибок. Поэтому мы отбрасываем при анализе сигналы с углом места более 56° (расчетный угол места для сигнала с дальности 180 км с высоты 150 км в приближениях прямолинейного распространения и сферической Земли).

Алгоритм детектирования и определения пространственных параметров метеорного эха состоит из двух этапов:

Этап 1. Очистка и подготовка сигналов:

1. Очистка сигналов от сигналов, связанных с межимпульсной интерференцией (одновременный прием сигналов от разных зондирующих импульсов с разных дальностей) согласно [Yukimatu, Tsutsumi, 2002]. Это позволяет увеличить количество анализируемых сигналов и увеличить качество их аппроксимации.

2. Для сигналов с дальностей 180–270 км для каждого импульса каждой последовательности на каждой антенне СЕКИРы в отдельности вычисляется модуль принятого сигнала.

3. Отбрасываются сигналы с нулевыми значениями модуля, связанные с бланкированием приемников ключами на время излучения зондирующих сигналов.

4. Среди оставшихся точек находим значение верхнего (Q1) квартиля по амплитуде — это пороговое значение.

5. Для каждой дальности по отдельности выбираем длительные (более 10 импульсов подряд) участки, на которых модуль сигнала превышает пороговое значение (допускаются пропуски до двух импульсов подряд). Каждый такой участок в дальнейшем считаем событием — наблюдением сигнала, рассеянного на отдельном метеорном следе, отражающем его динамику.

Этап 2. Определение угловых параметров события:

6. Для каждого события последовательным перебором подбирается разница фаз Δφ (π; –π) (с шагом 0.0125 рад) между антеннами максимизацией амплитуды $r(\Delta\varphi)$ сфазированного сигнала:

$$r(\Delta\varphi) = \sum\sum\left(A_{pn}2\left(cos\left(2\left(\varphi_{pn} - n\Delta\varphi\right)\right) + sin\left(2\left(\varphi_{pn} - n\Delta\varphi\right)\right)\right)\right) \rightarrow max, \quad (2)$$

где p — номер импульса в событии, n — номер антенны, A_{pn} и φ_{pn} — измеренные амплитуда и фаза p-го импульса в событии на антенне n.

7. Для полученной разницы фаз вычисляются азимут и угол места рассеянного сигнала по формуле (1).

НАБЛЮДЕНИЯ

Для сравнения двух методик определения углов места были обработаны результаты наблюдений метеорного эха с октября 2025 г. по май 2026 г. на дополнительной антенной решетке. Сигналы детектированы и обработаны приведенным выше алгоритмом. Проведено их сравнение с результатами наблюдений метеорного рассеяния, детектируемыми на стандартных антенных решетках за тот же период наблюдений согласно часто используемым признакам — радиолокационные дальности до 350 км, продольные скорости (связанные с нейтральным ветром, под действием которого дрейфует метеорный след) до 50 м/с.

На рис. 2, *A* представлено распределение высот рассеяния для этого эха, рассчитанное в приближении прямолинейного распространения и сферической Земли. Из рисунка видно, что оба распределения имеют похожую форму в области высот до 150 км, а в области больших высот различаются. Это может быть связано с определением метеорного эха по стандартной методике, которая анализирует усредненные характеристики, а потому может включать в рассмотрение и другие типы рассеянных сигналов. Пик распределения по обеим методикам находится на высоте 100–110 км, что согласуется с ожидаемым положением пика сгорания метеоров для выбранной рабочей частоты [Thomas et al, 1988]. На рис. 2, *B* показаны распределения углов места для этих же наборов данных. Из рисунка видно, что новый интерферометр позволяет эффективно разделять сигналы в переднем и заднем лепестках ДН, что по данным FitACF без дополнительных предположений сделать очень сложно [Бернгардт, Федоров, 2026].

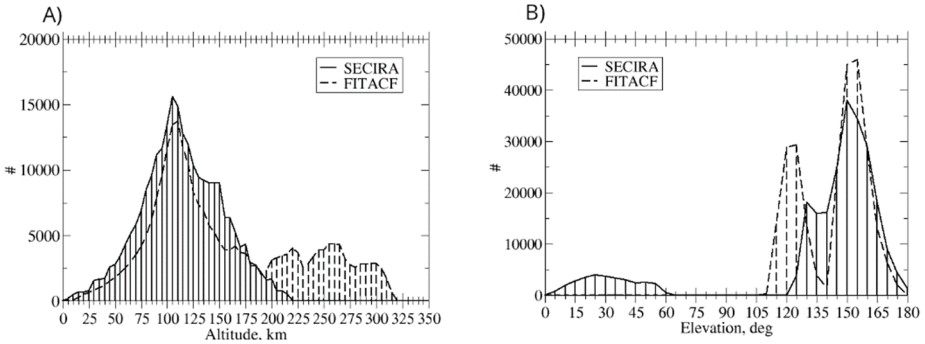

Рис. 2. A — распределения высот рассеяния эха на дальностях 180–270 км по данным наблюдений на дополнительной решетке предложенным алгоритмом и на стандартных решетках грубым алгоритмом детектирования по данным, обработанным FitACF с калибровкой по метеорам; B — распределения углов места эха для тех же данных, область 0–60° соответствует заднему лепестку ДН, 120–180° — переднему лепестку ДН

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложена схема программно-аппаратной модернизации радара CUTLASS до прототипа радара СЕКИРА нового поколения. Изложен алгоритм детектирования сигналов, рассеянных на метеорных следах, на основе длительных наблюдений с октября 2025 г. по май 2026 г. продемонстрирована работоспособность дополнительного угломестного комплекса, разработанного в ИСЗФ СО РАН. На основе анализа сигналов, рассеянных на метеорных следах, проведено сравнение угломестных наблюдений на стандартных решетках и на дополнительной решетке. Показано, что качество калибровки радара стандартными методами составляет 5° по углу места, а распределение высот метеоров близки (с точностью 5 км). Продемонстрирована возможность непосредственного разделения сигналов, приходящих с переднего и заднего лепестков диаграммы направленности радара.

В настоящее время модернизированный радар MAGW ИСЗФ СО РАН находится в постоянной эксплуатации.

Результаты работы получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН [https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/]. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Chisham G., Freeman M.P. A reassessment of SuperDARN meteor echoes from the upper mesosphere and lower thermosphere // J. Armos. and Terr. Phys. 2013. V. 102. P. 207–221.

Бернгардт О.И., Куркин В.И., Кушнарев Д.С. и др. Декаметровые радары ИСЗФ СО РАН // Солнечно-земная физика. 2020. Т. 6, № 2. С. 79–92.

Lester M., Chapman P.J., Cowley S.W.H., et al. Stereo CUTLASS – A new capability for the SuperDARN HF radars // Ann. Geophys. 2004. V. 22. P. 459–473.

Kurkin V., Medvedeva I., Podlesnyi A. Effect of sudden stratosphere warming on characteristics of medium-scale traveling ionospheric disturbances in the Asian region of Russia// Adv. Space Res. 2024. V. 73, iss. 7. P. 3613–3623. DOI:10.1016/j.asr.2023.09.020.

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 // Polar Sci. 2020. V. 28, 6.

Fedorov R.R., Berngardt O.I. Monitoring observations of meteor echo at the EKB ISTP SB RAS radar: algorithms, validation, statistics // Solar-Terrestrial Phys. 2021. V. 7, iss. 1. P. 47–58.

Yukimatu A.S., Tsutsumi M. A new SuperDARN meteor wind measurement: Raw time series analysis method and its application to mesopause region dynamics // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29, N 20, 1981. DOI: 10.1029/2002GL015210.

Thomas R.M., Whitham P.S., Elford W.G. Response of high frequency radar to meteor backscatter // J. Armos. and Terr. Phys. 1988, V. SO, N 8. P. 703–724.

Бернгардт О.И., Федоров Р.Р., Сигналы, рассеянные в главном и заднем лепестках диаграммы направленности антенн радаров когерентного рассеяния ИСЗФ СО РАН // Radiophysics and Quantum Electronics. 2025. V. 4. P. 320–335.