

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОМОДОВЫХ СИГНАЛОВ, РЕГИСТРИРУЕМЫХ НА РАДАРАХ СЕКИРА

METHOD FOR ESTIMATING PARAMETERS OF MULTI-MODE SIGNALS MEASURED AT SECIRA RADARS

О.И. Бернгардт 

Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, berng@iszf.irk.ru

O.I. Berngardt

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, berng@iszf.irk.ru

Аннотация. Представлен алгоритм оценки параметров сигналов когерентного рассеяния, основанный на параметрической оценке их спектров с использованием авторегрессионной модели ARMA (10, 10). Оценка включает авторегрессию по 10 членам ряда, скользящее среднее для остатков по 10 членам ряда и последующее фитирование полученных спектров суммой гауссовых функций. Алгоритм является развитием метода Бурга, предложенного ранее для анализа данных радаров SuperDARN, и отличается от него использованием более сложной регрессионной модели, учетом особенностей корреляционной функции и определением трех параметров для каждого найденного пика (моды): амплитуды, доплеровской скорости и спектральной ширины. Из сравнения следует, что наилучшую преемственность между параметрами многомодового сигнала, полученными новым и стандартным методами обработки сигналов, дает анализ моды, максимальной по интегральной мощности. Он показал, что новый и стандартный методы в случае одномодовых сигналов дают близкие значения доплеровской скорости. Использование предлагаемого в работе многомодового анализа увеличивает количество обнаруживаемых сигналов различных типов и может использоваться для расширения диагностических возможностей радаров СЕКИРА/SuperDARN, включая автоматическую классификацию каждой моды.

Ключевые слова: декаметровый радар, СЕКИРА, ионосфера, многомодовые сигналы.

Abstract. The paper presents the algorithm for evaluating parameters of coherent scattering signals, which is based on the assessment of their parametric spectra by the well-known autoregression ARMA(10,10) model. The assessment consists of autoregression over 10 sequence members, moving average over residuals for 10 sequence members, and subsequent fitting of the resulting spectra with the sum of gaussian functions. The algorithm is a development of Burg's method, previously proposed for the analysis of SuperDARN data. It differs from the method in the use of a more complex regression model, consideration of characteristics of the correlation function, and determination of three parameters for each peak (mode) — amplitude, Doppler velocity, and spectral width. Comparison shows that the best continuity between the parameters of multi-mode signals, obtained by new and standard signal processing methods, is provided by analysis of the mode with maximum integral power. The analysis has revealed that new and standard methods in the case of single-mode signals give close Doppler velocities. The multi-mode analysis presented in the paper increases the number of detected signals of various types, and can be employed to expand the diagnostic capabilities of SECIRA/SuperDARN radars, including automatic classification of each mode.

Keywords: decameter radar, SECIRA, ionosphere, multi-mode signals.

ВВЕДЕНИЕ

Радары когерентного рассеяния сетей SuperDARN [Greenwald et al., 1995; Chisham et al., 2007; Nishitani et al., 2019], CN-DARN [Zhang, 2024] и СЕКИРА [Berngardt et al., 2022] используют рассеянные сигналы для анализа процессов в ионосферной плазме: от крупномасштабных (по данным рассеяния от земной поверхности) до мелкомасштабных (по данным рассеяния на ионосферных неоднородностях) неоднородностей в средне- и высокоширотной ионосфере. При этом процесс обработки данных, используемых для анализа, обычно разбит на три этапа:

➤ регистрация квадратурных компонент рассеянного сигнала (IQ);

➤ построение по ним усредненных автокорреляционных функций принятого сигнала (АКФ) по измерениям на основной фазированной решетке радара и кросс-корреляционной функции (ККФ) между измерениями на основной и интерференционной фазированной решетках радара;

➤ финальная обработка АКФ (FITACF) для получения из них интерпретируемых геофизических параметров. Мощность рассеянного сигнала дает информацию о сечении рассеяния неоднородностей, усилении/ослаблении сигналов за счет фокусировок радиоволны в неоднородной ионосфере, ракурсной чувствительности рассеивающих неоднородностей, а также о поглощении радиоволны вдоль трассы распространения. Доплеровское смещение частоты

и спектральное уширение сигнала позволяют оценивать скорость неоднородностей вдоль луча зрения и время их жизни соответственно. Финальная обработка ККФ позволяет определить угол места прихода рассеянной радиоволны.

Интерпретация принятых сигналов обычно проводится после обработки автокорреляционных функций сигнала (далее КФ) алгоритмом FITACF [Ribeiro et al., 2013], извлекающей из КФ доплеровское смещение сигнала — скорость V_d и параметры формы КФ в двух моделях экспоненциального спада КФ со временем: линейной/экспоненциальной (linear, l) и квадратичной/гауссовой (squared, s). В результате обработанные данные обычно представляют из себя пять основных параметров: мощность сигнала в двух моделях (P_l, P_s), спектральное уширение сигналов в единицах скорости в двух моделях (W_l, W_s) и доплеровскую скорость неоднородностей вдоль луча зрения V_d . Алгоритм FITACF является базовым для дальнейшей интерпретации данных, постоянно совершенствуется, усложняется [Ribeiro et al., 2013; Ponomarenko et al., 2025] и многократно экспериментально проверяется [Koustov et al., 1997, 2009, 2019, 2020; Xu et al., 2008; Bahcivan et al., 2013; Ponomarenko et al., 2025].

Одним из известных примеров, не допускающих эффективную обработку принятых сигналов методом FITACF, является наблюдение многомодовых сигналов [Schiffler et al., 1997; Huber, Sofko, 2000; Shepherd et al., 2003; Danskin et al., 2004; Koustov et al., 2005] — сигналов, имеющих несколько пиков в спектре и не укладывающихся в модель FITACF. Для обработки таких сигналов могут использоваться различные методы, основанные на спектральной оценке сигнала преобразованием Фурье [Nguyen et al., 2014], методом MUSIC [Barthes et al., 1998] или параметрическим спектром Бурга [Schiffler et al., 1997]. Очевидно, что автоматический метод обработки сигналов когерентных радаров, адаптирующийся под экспериментальные наблюдения, должен учитывать существование многомодовых сигналов и иметь возможность определения параметров каждой моды.

Таким образом, пятипараметрическая модель, лежащая в основе FITACF, по-видимому, не обладает необходимой сложностью для полного описания экспериментальных данных. Наличие двух независимых моделей (экспоненциальной и гауссовой) для описания КФ несет в себе произвол их выбора и соответственно произвол интерпретации исследователем. Поэтому требуется как минимум еще одного дополнительного параметра, отвечающего за выбор адекватной модели.

Для устранения такого произвола в работе предложен новый многопараметрический метод обработки КФ принятых сигналов радаров когерентного рассеяния, расширяющий возможности алгоритма FITACF и являющийся усовершенствованием метода Бурга, предложенного в [Schiffler et al., 1997].

ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ СПЕКТРАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ СИГНАЛА

Форма корреляционной функции сигнала

На рис. 1, *a–г* показаны примеры форм КФ сигнала. Измеряемая радаром КФ получается только

для неотрицательных задержек, и на рисунке показана ее полная форма, симметрично (комплексно-сопряженно) продолженная влево. Такое продолжение связано с математической постановкой задачи и эргодической гипотезой, сводящей усреднение по сеансам зондирования к усреднению по ансамблю. Следует заметить, что КФ в нулевой точке в многоимпульсной последовательности включает в себя энергетику широкополосных шумов на входе приемника. Поэтому КФ в этой точке отличается по амплитуде от КФ на остальных задержках (см. панели *в, г*), содержит существенные ошибки и должна либо не использоваться при анализе, либо корректироваться до начала обработки.

Таким образом, КФ, которую модель должна аппроксимировать, может определяться двумя способами: отбросом нулевой задержки или ее аппроксимацией.

Первый способ (половина КФ) — определение модели по одной части измеренной радаром АКФ сигнала $R(\tau)$ (неважно, левой или правой) без учета нулевой задержки. В данном случае нами используется левая (комплексно сопряженная с измеренной) часть:

$$R_{\text{model}}(\tau) = \begin{cases} 0, \tau \geq 0 \\ R^*(-\tau), \tau < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Второй способ (доставление и интерполяция нулевой задержки) — использование симметрично-достоенной к КФ с аппроксимированным значением КФ на нулевой задержке:

$$R_{\text{model}}(\tau) = \begin{cases} R(\tau), \tau > 0 \\ |R(\Delta\tau)|, \tau = 0 \\ R^*(-\tau), \tau < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Из формулы очевидно, что такое значение КФ на нулевой задержке соответствует линейной аппроксимации амплитуды и фазы в нулевой точке по соседним значениям.

На панелях *a–г* показаны примеры КФ сигнала (двусторонних, достроенных исходя из комплексного сопряжения): действительная (черная линия) и мнимая (оранжевая линия) части. На панелях *в, г* видна выделенность нулевой задержки КФ, связанная с наличием широкополосных шумов в сигнале. Левая часть, комплексно сопряженная с правой, показана на панелях *a–г* сплошными линиями, оригинальные наблюдения радара — штрихпунктирными.

Параметрическое спектральное оценивание сигнала

Из теоремы Винера—Хинчина следует, что методика обработки, сформулированная для КФ сигнала, может быть изложена и в терминах обработки его спектральной мощности. Исходя из используемых FITACF параметров, очевидно, что спектральное представление зачастую выгоднее, поскольку естественно для этих параметров. Извлекаемые из КФ параметры имеют ясную спектральную трактовку: мощность — значение интеграла под кривой спектральной мощности, доплеровское смещение сигнала — макси-

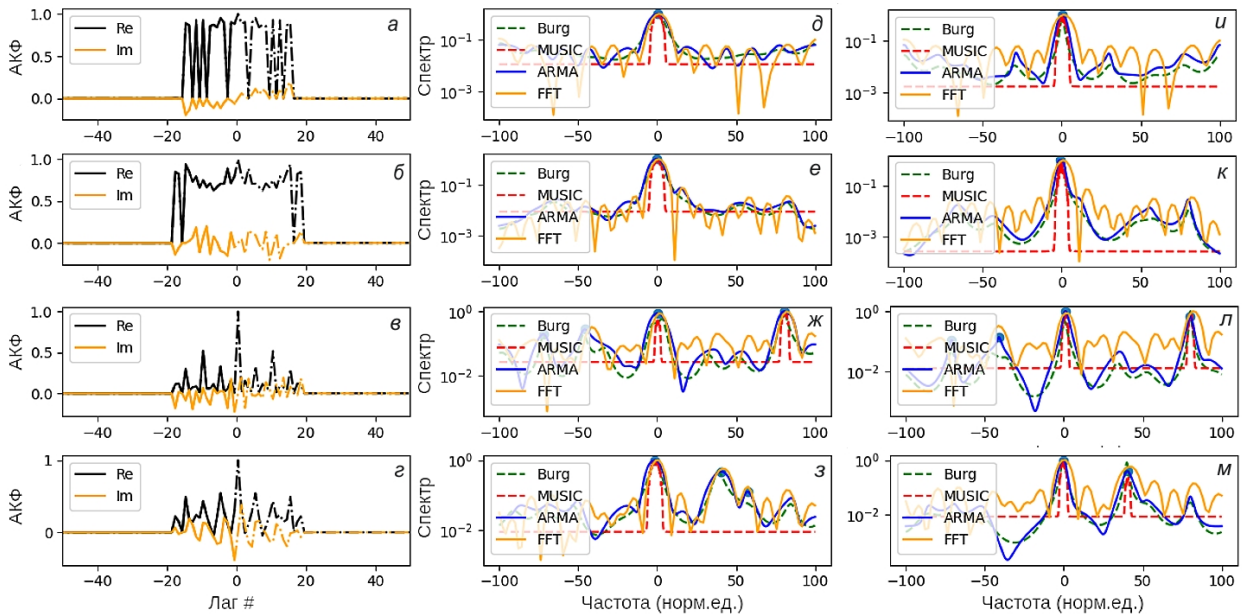


Рис. 1. Примеры КФ (а–г), их спектральных оценок по половине КФ (д–з) и по полной КФ с интерполированной нулевой задержкой (и–м). Спектральные оценки проводились с использованием FFT, параметрических спектральных оценок по алгоритмам Бурга (модель AR порядка 8), модели ARMA (порядка 10, 10) и модели MUSIC порядка 10 по данным радара ЕКВ 29.05.2025. Штрихпунктирная линия (а–г) — данные по измерениям радара, сплошная линия — данные, достроенные по комплексному сопряжению

мально вероятная или средняя частота в спектральной мощности сигнала, спектральная ширина — ширина спектрального пика.

Главными недостатками спектральной обработки является предельно малое количество значений КФ (для стандартного 7-импульсного зондирующего сигнала оно обычно меньше 20) и так называемые плохие лаги — точки, в которых КФ сигнала не может быть измерена из-за особенностей зондирующего сигнала. Поэтому стандартные спектральные оценки часто вызывают сложности. Тем не менее, существуют более сложные параметрические спектральные оценки, например предложенные в работах [Schiffler et al., 1997; Barthes et al., 1998], которые позволяют определить спектральные характеристики сигнала по сравнительно небольшому количеству точек.

На панелях д–з показаны фурье-спектры КФ (оранжевая линия) в соответствии с теоремой Винера—Хинчина, связанной со спектром принятого сигнала. Видно, что спектральная мощность часто имеет много пиков, особенно это характерно для ионосферных сигналов. Большая часть пиков — либо шумовые помехи, либо реально не существующие алиасы, связанные с конечностью области, где измеренная КФ не равна нулю. Это, в свою очередь, связано с конечностью зондирующей последовательности, составляющей от 7 до 16 импульсов (от 60 до 250 мс) [Berngardt et al., 2020]. Конечность зондирующей последовательности не дает возможности измерить КФ во всем диапазоне времен жизни неоднородностей и определить количество реальных пиков в спектре. Традиционно борьба с алиасами проводится выбором временного окна спектральной обработки (окна Блэкмена, Кайзера и другие), но они дополнительно расширяют пики в спектрах и поэтому малоэффективны в задаче разделения близких

пиков, возникающей на радарах [Schiffler et al., 1997; Huber, Sofko, 2000; Shepherd et al., 2003; Danskin et al., 2004; Koustov et al., 2005].

Для оценки числа пиков в спектре воспользуемся параметрической оценкой спектра через авторегрессионную модель ARMA [Cadzow, 1982], которая строит модель ряда по авторегрессии значений (AR часть модели) и по скользящим средним шумоподобных остатков (MA часть модели). Зная значения коэффициентов этой модели, можно построить параметрическую спектральную оценку КФ [Cadzow, 1982]. Эта модель является усовершенствованием спектральной оценки Бурга, построенной на основе только авторегрессионной модели AR.

Оценка по половине корреляционной функции

На панелях д–з показаны результаты обработки КФ сигнала, четырьмя методами: преобразованием Фурье и параметрическими оценками MUSIC, модели Бурга и модели, основанной на ARMA. Все методы применены к левой части КФ.

На панелях д–з показаны классический фурье-спектр (сплошная оранжевая линия) КФ (спектральная мощность) и параметрический спектр ARMA (10, 10) (сплошная синяя линия), построенный по этой КФ с параметрами (числом коэффициентов) авторегрессии (AR) и скользящего среднего (MA) 10 и 10 соответственно. Выбор такого числа коэффициентов регрессии связан со значимым количеством точек в измеренной КФ, не превышающим 20. Видно, что параметрический спектр более гладкий, чем фурье-спектр, и содержит меньше максимумов (алиасов). Окружности — все определенные автоматически локальные максимумы, амплитуды которых не превышают 0.1 амплитуды основного (максимального)

пика; зеленая и красная штриховые линии — соответственно результаты обработки алгоритмом Бурга для восьми мод сигнала, предложенного в [Schiffler et al., 1997] и 10-модовым методом MUSIC, предложенным в [Barthes et al., 1998]. Следует заметить, что в работе [Danskin et al., 2004] в качестве порога отсеечения слабых пиков для алгоритма Бурга используется -8 дБ, что близко к используемому нами порогу 0.1 .

Видно, что алгоритм Бурга менее точно описывает спектр сигнала, чем ARMA, игнорируя некоторые пики, особенно на многомодовых сигналах, что связано со случайным характером рассеяния и случайными ошибками в определении КФ, не описываемыми моделью AR, но учитываемыми моделью ARMA.

Видно также, что все методы определяют основной пик спектра примерно одинаково, отличия наблюдаются в положении дополнительных пиков и в ширине параметрических спектров: оценка Бурга делает их более узкими. Оценка ARMA делает их более широкими, но точнее описывающими спектральную ширину. Из сравнения рисунков видно, что метод MUSIC субъективно менее точен, чем алгоритмы Бурга или ARMA: он выделяет меньше пиков и сами пики имеют изрезанную структуру вблизи максимума.

Видно также, что число пиков небольшое и ожидаемо не превышает 10 , что связано в том числе и с числом коэффициентов регрессии.

Оценка по полной корреляционной функции с интерполированной нулевой точкой

На рис. 1 ($u-m$) показаны результаты обработки аналогичных КФ сигнала для полной КФ (левой и правой частей) с интерполированной нулевой точкой. Видно, что все методы определяют основной пик спектра примерно одинаково, отличия наблюдаются в положении дополнительных пиков и в их амплитудах. Амплитуды и спектральные ширины по обеим оценкам могут находиться в произвольных соотношениях, но, по-видимому, оценка Бурга дает их более узкими, чем оценка ARMA, что может быть связано с более низким порядком модели Бурга и ее большей простотой.

Видно, что метод MUSIC субъективно является менее точным, чем алгоритмы Бурга или ARMA, — хотя он и дает самые узкие пики, но уменьшает их обнаруженное число.

Сравнение качества определения положения пиков в сигнале алгоритмами Бурга и ARMA проводилось статистически: каждая КФ оценивалась методами Бурга и ARMA, для них находилось минимальное количество максимумов в параметрических спектрах, амплитуда которых превышает половину амплитуды основной компоненты. После этого проводилось попарное сравнение сумм амплитуд фурье-спектров $P_{i, \text{burg}}$ и $P_{i, \text{arma}}$ на частотах, полученных по методам Бурга и ARMA для каждой моды каждого спектра соответственно:

$$\begin{aligned} N &= \min(N_{\text{burg}}, N_{\text{arma}}), \\ P_{i, \text{arma}} &= S(M_{i, \text{arma}}), \\ P_{i, \text{burg}} &= S(M_{i, \text{burg}}). \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $N_{\text{burg}}, N_{\text{arma}}$ — число мод, определенное алгоритмами Бурга и ARMA; $M_{i, \text{burg}}, M_{i, \text{arma}}$ — положения максимумов, определенное этими алгоритмами; S — фурье-спектр АКФ (спектральная мощность).

Чем больше P , тем ближе пики, определяемые таким параметрическим спектром, находятся к реальному пику, определяемому по фурье-спектру. Попарное сравнение проводилось по одностороннему критерию Вилкоксона — таким образом проверялась гипотеза: медианно пики, определяемые ARMA, расположены ближе к максимумам фурье-спектра, чем пики, определяемые методом Бурга ($P_{i, \text{arma}} > P_{i, \text{burg}}$).

Было обработано >590 спектров, хорошо аппроксимированных моделью FITACF. Достигнутое значение p -value при проверке односторонней гипотезы составляло $1.2 \cdot 10^{-7}$ (при двухсторонней гипотезе $2.4 \cdot 10^{-7}$). Это говорит о том, что пики спектров ARMA по положению действительно ближе к реальным пикам в фурье-спектре, чем пики спектров Бурга. Это подтверждается и качественными соображениями — спектры Бурга соответствуют более простой модели ARMA (8, 0), которая имеет в 2.5 раза меньше регрессионных параметров, при этом проще, чем использованная нами модель ARMA (10, 10) [Cadzow, 1982].

Оценка спектральной ширины мод

Для окончательной реализации метода необходимо определять не только доплеровскую скорость, но также амплитуду и спектральную ширину каждой моды — все три основных параметра, получаемые алгоритмом FITACF. Как показал предварительный анализ, параметрические ARMA-спектры для корреляционных функций удовлетворительно аппроксимируются смесью гауссовых функций (Gaussian Mixture, GM). Гауссова функция определяется тремя параметрами: амплитудой (спектральная мощность), средним (доплеровская скорость) и среднеквадратичным отклонением (половина спектральной ширины). Таким образом, модель параметрического спектра $S(V)$ имеет вид

$$S(V) = \sum_{i=1}^N \frac{2A_i}{\sqrt{2\pi}W_{0i}} e^{-2\left(\frac{V-V_{0i}}{W_{0i}}\right)^2}. \quad (4)$$

Здесь A_i, V_{0i}, W_{0i} — амплитуда, скорость и спектральная ширина (в единицах скорости); N — количество спектральных мод сигнала. Видно, что амплитуда A_i каждой составляющей параметрического спектра имеет смысл полной мощности этой составляющей (интегральная спектральная мощность), а множитель при ней является соответствующей нормировкой.

Таким образом, процедура нахождения параметров параметрических спектров сводится к их аппроксимации смесью гауссовых функций $S(V)$ заданного количества N , определенного на этапе поиска числа максимумов. Задача нахождения этих параметров известна и решается методами оптимизации, например методом среднеквадратичного отклонения параметрического спектра от его модели. После фитирования при анализе данных производится упорядочение пиков по их энергетике ($A_i \geq A_{i+1}$).

При этом предполагается, что первые моды в основном соответствуют информативным сигналам, последние — шумовым.

В дальнейшем в работе использовалась модель ARMA по полной корреляционной функции с линейной аппроксимацией нулевой точки, поскольку она дает более узкие спектральные линии, эффективные при дальнейшем разделении мод, а также удовлетворительно аппроксимируется суммой гауссовых функций.

Алгоритм мы назвали ААМРАСФ (Arma Analysis of Multi-Peak ACF).

ОСОБЕННОСТИ МОДОВОЙ СТРУКТУРЫ В ПЕРИОД 29.05–02.06.2025

Многомодовые сигналы — события, регулярно наблюдаемые [Schiffler et al., 1997; Huber, Sofko, 2000; Danskin et al., 2004; Shepherd et al., 2003; Koustov et al., 2005] и легко определяемые с помощью параметрической спектральной оценки на основе модели ARMA, дающей три параметра на каждую моду: ее интегральную мощность, спектральное смещение и спектральную ширину. Рассмотрим, какими свойствами обладают сигналы с разным числом мод на примере наблюдений геомагнитной бури 29.05–02.06.2025 на радарх ЕКВ и МАГВ. Выбор периода связан с высокими скоростями неоднородностей, наблюдаемых во время геомагнитных возмущений. Это позволяет проверить работоспособность метода в широком диапазоне скоростей, спектральных ширин и геофизических условий и сравнить результаты с алгоритмом FITACF по аналогии с [Danskin et al., 2004], но для полного числа спектральных линий, а не только для двух.

Оценка максимального числа мод в сигнале

Важным для исследователя является интерпретация пиков в спектре сигнала. Известно, что в сигнале присутствуют шумы различной природы и так называемые плохие задержки (bad lags) корреляционной функции, на которых сигнал отсутствует из-за особенностей зондирующего сигнала [Ribeiro et al., 2013]. Хотя алгоритм, по-видимому, сравнительно устойчив к наличию плохих задержек, связанных с особенностями зондирующих сигналов, на которых корреляционная функция не может быть измерена и часто приравнивается к нулю (см. рис. 1), уровень шумов вносит свои искажения в число и характеристики пиков в спектре сигнала. Поэтому мы можем ожидать, что часть пиков в спектрах может быть связана с шумами и нам необходимо оценить число пиков, которые можно считать реальными сигналами. Используем два способа статистической оценки этого числа: по распределению доплеровских скоростей различных мод и по амплитуде различных мод. В обоих случаях можно предполагать, что моды самого высокого порядка (последнего, наименее энергетические) будут наименее значимыми (шумовыми).

На рис. 2 показано распределение доплеровских скоростей различных мод сигнала, наблюда-

емых на радарх ЕКВ и МАГВ в период 29.05–02.06.2025.

Можно считать (видно из рисунка), что в сигнале наблюдается не больше восьми мод, на более высоких модах распределение скоростей становится близким к равномерному (шумовому).

На рис. 3, а, б показано распределение амплитуд различных мод сигнала, наблюдаемых на радарх ЕКВ и МАГВ относительно моды с максимальной амплитудой. Приведены 50%-е и 95%-е доверительные интервалы наблюдения для каждой порядковой моды в сигнале. Метод интервалов показывает, что для 50%-го доверительного интервала количество мод составляет от 1 (МАГВ) до 3 (ЕКВ), для 95%-го — 1. Поэтому пороговой амплитудой, отделяющей шумовые сигналы от нешумовых, можно считать уровень ~0.5 амплитуды максимального пика, соответствующий верхней границе 95%-го доверительного интервала для шумовой 10-й моды. Таким образом, хотя мы и отсечем много существенных мод в сигнале, но не пропустим большую часть шумовых мод.

На рис. 3, в, г показано распределение наблюдаемых сигналов по числу мод в них. Из рисунка видно, что одномодовые сигналы преобладают на обоих радарх, причем на радаре ЕКВ число одномодовых сигналов составляет ~40 %, а на радаре МАГВ — ~30 %. Необходимо заметить, что при анализе рассматривается геомагнитно-возмущенный период 29.05–02.06.2025, в спокойные периоды вероятности наблюдения различного числа мод могут быть другими. В соответствии с [Danskin et al., 2004], двумодовые спектры регистрировались на радаре Hankasalmi SuperDARN методом Бурга в 35 % наблюдений, что говорит примерно о 65 % одномодовых сигналов. Это говорит об удовлетворительном соответствии полученных нами результатов с предыдущими наблюдениями.

Сравнение результатов ААМРАСФ и FITACF

Важно сравнение результатов, получаемых алгоритмами FITACF и ААМРАСФ. Очевидно, что для большинства случаев доплеровские скорости, получаемые новым методом, должны быть близки к результатам, получаемым FITACF, неоднократно проверенном [Koustov et al., 1997, 2009, 2019; Xu et al., 2008; Bahcivan et al., 2013; Koustov et al., 2020; Ponomarenko et al., 2025]. Очевидно также, что в случае одномодовых сигналов (когда мы наблюдаем лишь один мощный пик в спектре и под мощностью понимаем не интенсивность спектральной компоненты, а ее интегральную интенсивность по частоте), хорошо соответствующих модели FITACF, мы должны получить наилучшее соответствие. Для проверки двумя методами были обработаны данные радаров МАГВ и ЕКВ за период 29.05–02.06.2025 (рис. 4, 5).

На рис. 4, а, б показан сравнительный анализ скоростей только одномодовых сигналов — зависимость доплеровских скоростей, определяемых алгоритмами ААМРАСФ и FITACF. Видно, что скорости определяются обоими алгоритмами приблизительно одинаково. Среднеквадратичная ошибка растет с уменьшением скорости и составляет порядка 88 м/с на радаре ЕКВ и 56 м/с на радаре МАГВ.

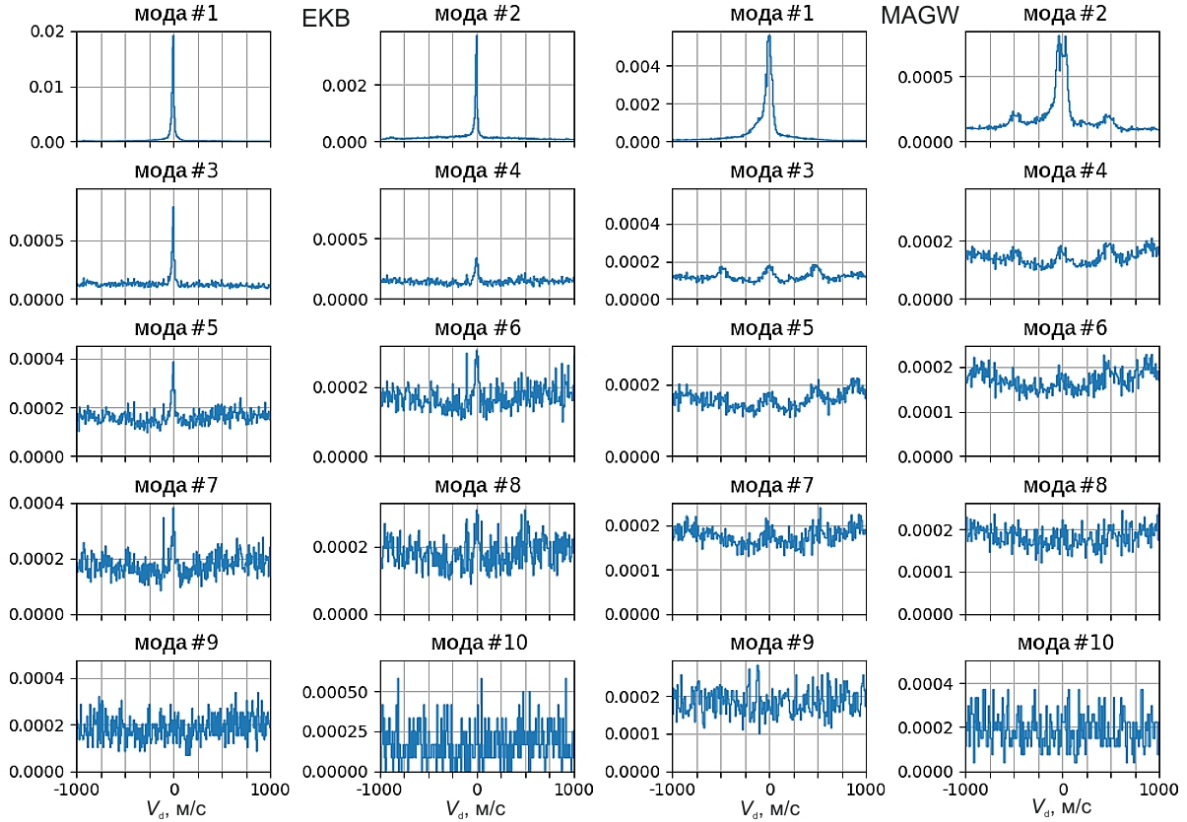


Рис. 2. Распределение доплеровских скоростей наблюдаемых ААМРАСФ-мод на радарах ЕКВ (слева) и MAGW (справа) в период 29.05–02.06.2025

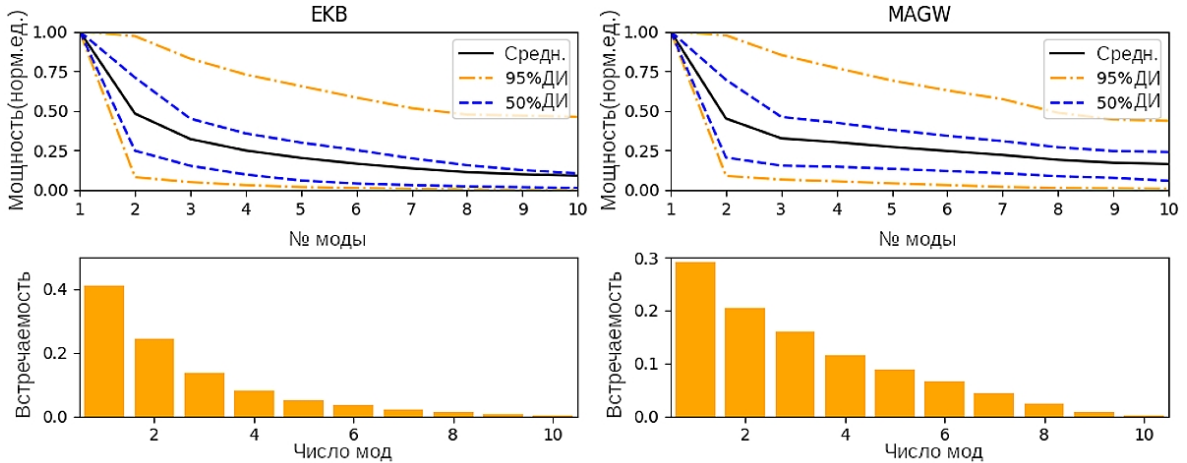


Рис. 3. Относительное соотношение амплитуд пиков на разных радарах (вверху). Сплошная линия — среднее значение; доверительные интервалы 50 % (штриховые линии) и 95 % (штрих-пунктирные). Внизу — распределение числа пиков с амплитудами выше 0.01 на радаре ЕКВ (слева) и MAGW (справа). Данные за период 29.05–02.06.2025

На панелях *в*, *г* приведен сравнительный анализ доплеровских скоростей, оцененных обоими алгоритмами для многомодовых сигналов, причем оценка параметров проводилась для максимальной моды сигнала:

$$\begin{aligned} V_{\max} &= V_{0j} : j = \arg \max (A_i), \\ W_{\max} &= W_{0j} : j = \arg \max (A_i). \end{aligned} \quad (5)$$

На панелях *д*, *е* приведен сравнительный анализ доплеровских скоростей, оцененных обоими алгоритмами, всех сигналов, причем оценка параметров проводилась усреднением по модам:

$$\begin{aligned} V_{\text{mean}} &= \sum A_i W_{0i} V_{0i} / \sum A_i W_{0i}, \\ W_{\text{mean}} &= \sqrt{\sum A_i W_{0i} ((V_{0i} - V_{\max})^2 + W_{0i}^2) / \sum A_i W_{0i}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Видно (*в–е*), что, хотя и существует определенное количество случаев, в которых скорости похожи, это количество меньше, чем для одномодовых сигналов. Основные проблемы возникают для сигналов, которые алгоритм FITACF определяет как низкоскоростные, но которые по факту состоят из нескольких мод.

На рис. 5, *а*, *б* показаны зависимости спектральных ширин, определяемых алгоритмами ААМРАСФ

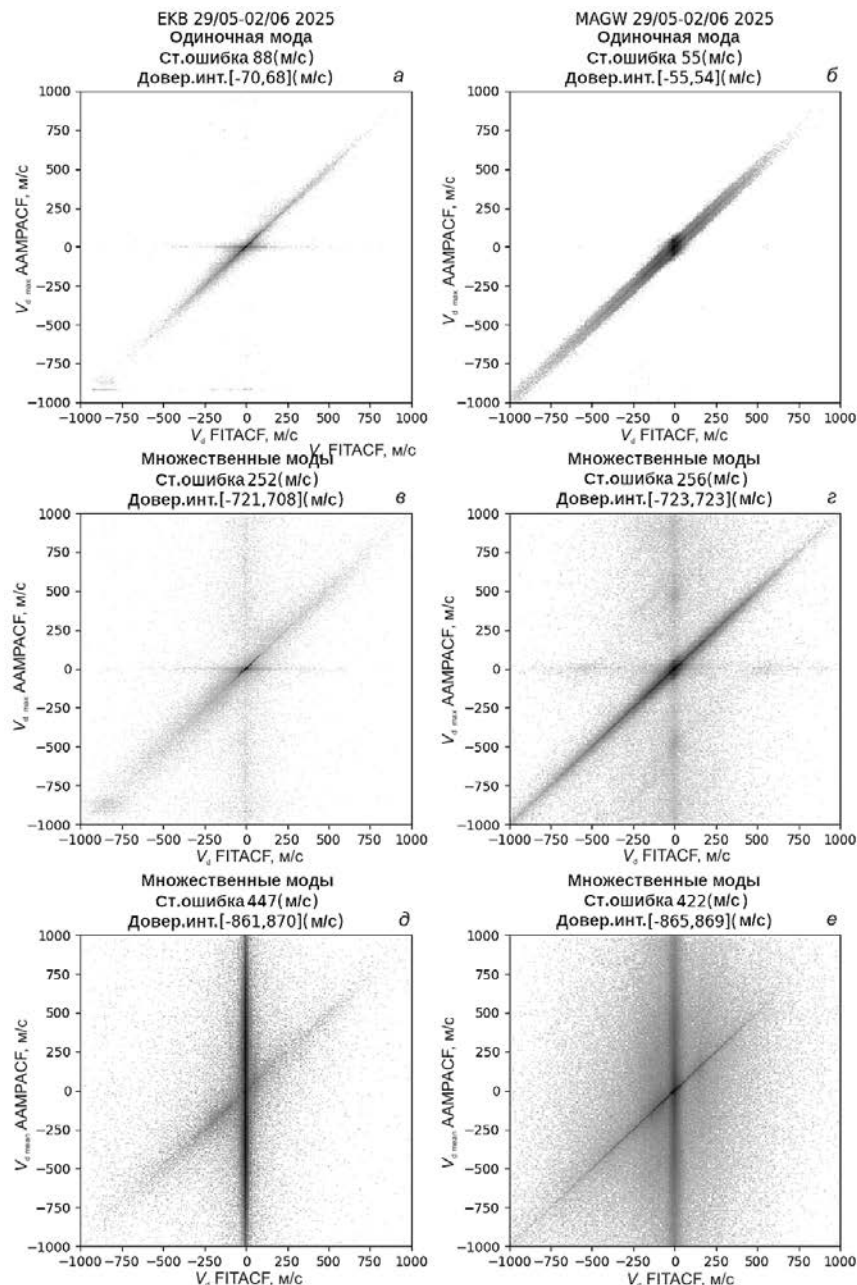


Рис. 4. Сравнение скоростей, полученных алгоритмами ААМРАСФ и FITACF в период 29/05-02/06/2025: одномодовые сигналы (а, б); многомодовые сигналы (в, з) по компоненте с максимальной амплитудой; средние скорости (д, е) по всему спектру с весом, равным спектральной амплитуде моды $A_i W_{0i}$

и FITACF. Видно некоторое сходство в спектральных ширинах, особенно на радаре MAGW, но относительные отличия намного сильнее, чем у оценок скорости.

На панелях в, з и д, е показаны спектральные ширины для случая поиска ширины максимальной моды и средней ширины спектра соответственно. Видно, что достаточно похожими спектральные ширины FITACF и ААМРАСФ назвать нельзя.

Таким образом, данные FITACF хорошо соответствуют данным ААМРАСФ по скорости в случае одномодовых спектров и приближенно — по спектральной ширине. В случае многомодовых спектров результаты существенно различаются. Можно сделать вывод о том, что использовать FITACF стоит

лишь для одномодовых сигналов, а многомодовые анализировать отдельно.

Из рисунков видно, что наиболее близко FITACF проводит оценку максимальной моды в спектре, оценивая не весь спектр сигнала, а только наиболее мощную его моду. Поэтому наилучшее соответствие ААМРАСФ и FITACF, по-видимому, достигается поиском моды с максимальной интегральной амплитудой и определению ее характеристик: скорости и спектральной ширины.

Следует заметить, что такая высокая корреляция при сравнении скоростей не отмечалась в работе [Danskin et al., 2004]. Это может быть связано с тем, что основной упор делался на анализ низкоскоростных событий. Аналогичный приведенному в [Danskin

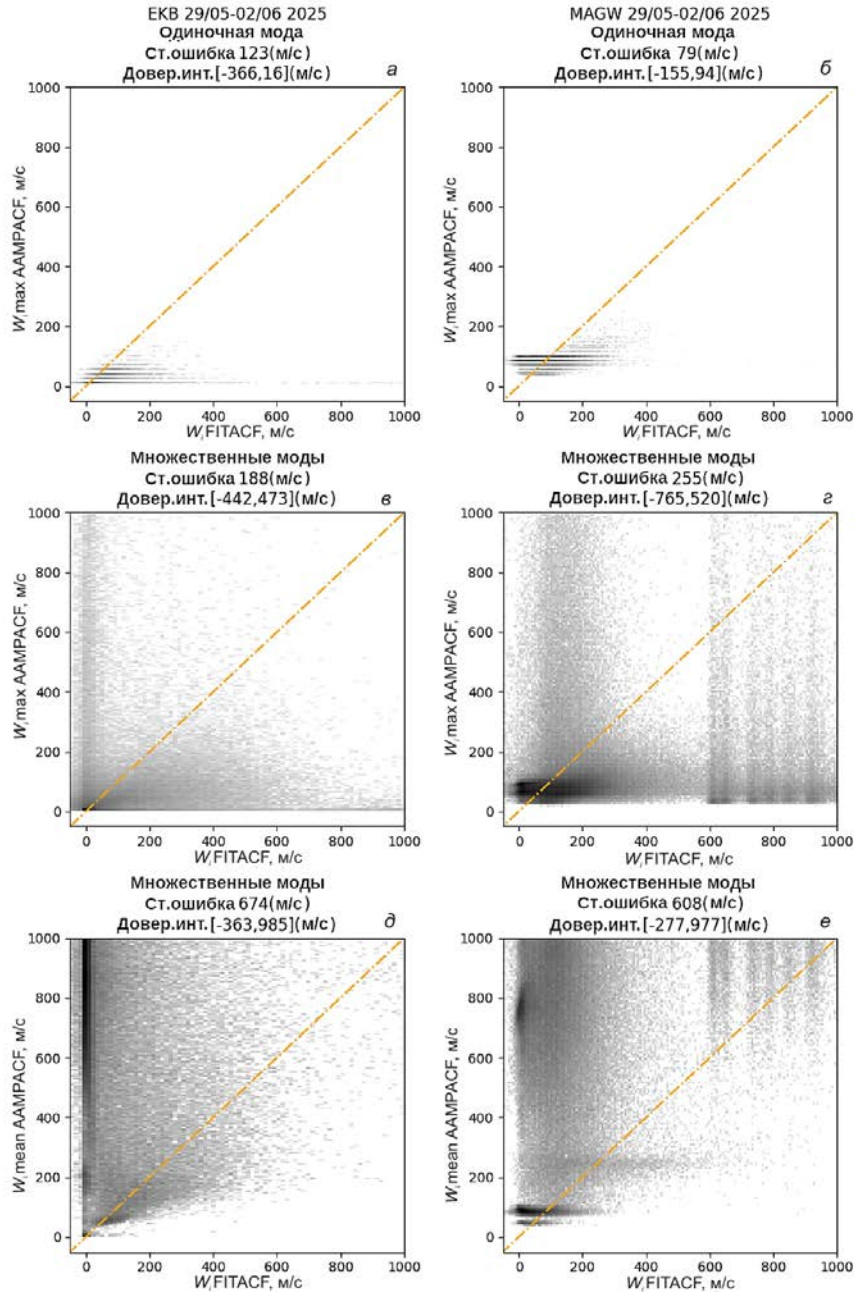


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для спектральных ширин

et al., 2004] эффект в области низких скоростей (когда скорости FITACF почти равны нулю, хотя параметрический спектр дает более высокие скорости) мы наблюдаем (см. рис. 4) по данным ААМРАСФ; это особенно хорошо видно для радара MAGW (случай одномодовых сигналов).

Очевидным недостатком метода ААМРАСФ является его вычислительная ресурсоемкость, особенно на этапе определения амплитуд и спектральных ширин, что также усложняет его практическое использование.

Описание алгоритма ААМРАСФ

Таким образом, итоговый алгоритм ААМРАСФ состоит из следующих этапов.

1. Достраивание левой части корреляционной функции принятого сигнала комплексным сопряже-

нием; аппроксимация нулевой задержки линейно по амплитуде и фазе.

2. Обработка полученной корреляционной функции алгоритмом ARMA с длиной регрессии 10 по AR и 10 по MA.

3. Построение параметрического спектра по полученным регрессионным коэффициентам, определение на нем положения V_{0i} локально максимальных значений с амплитудой >0.1 амплитуды максимального пика.

4. Построение модели гауссовой смеси (4) для найденного параметрического спектра, определение интегральных амплитуд A_i и спектральных ширин W_{0i} этих мод, используя метод наименьших квадратов.

5. Сортировка полученных значений по убыванию интегральной амплитуды A_i , чтобы оставить только пики с относительной амплитудой $A_i/A_0 > 0.5$.

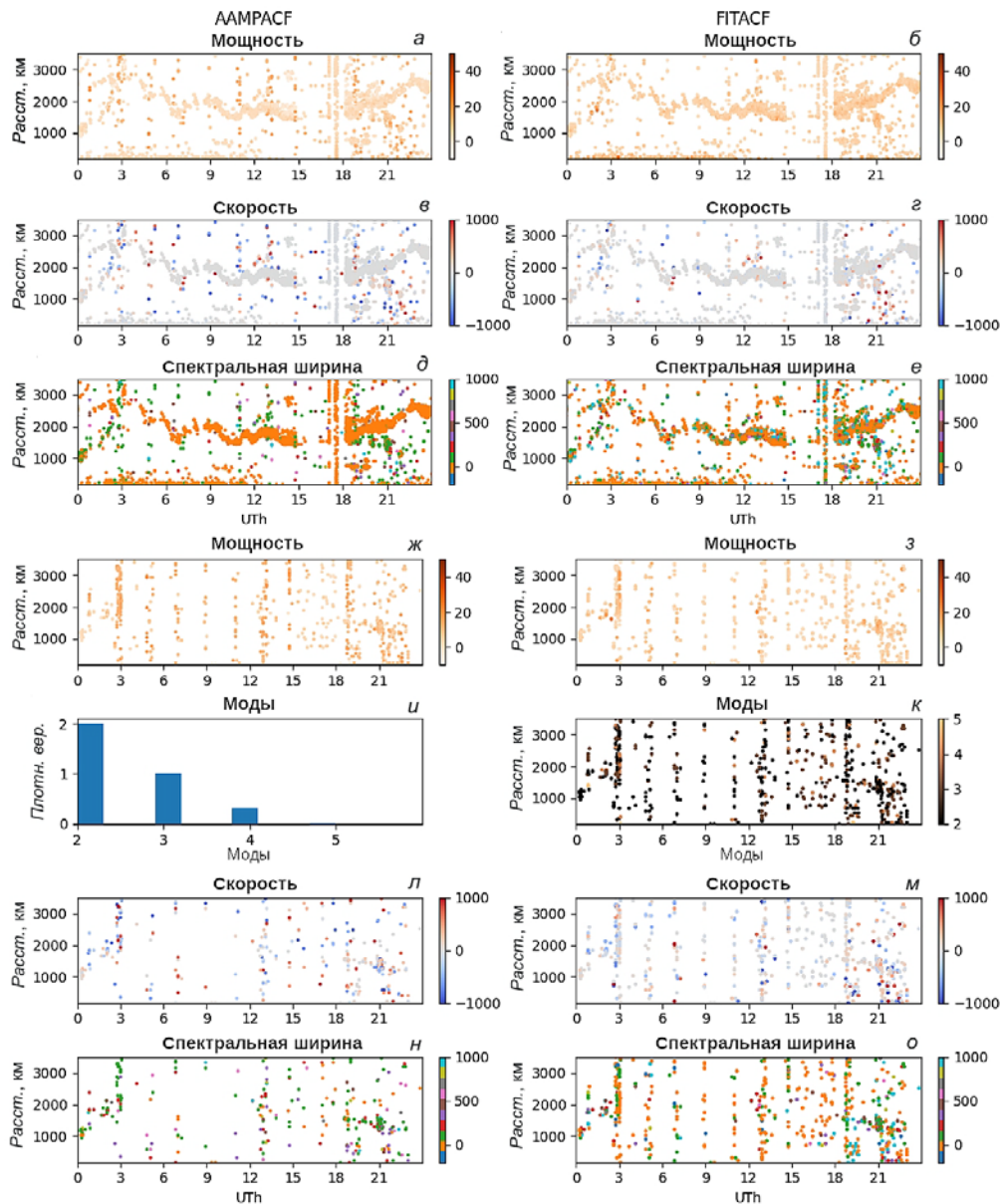


Рис. 6. Параметры одномодовых сигналов 31.05.2025 на радаре ЕКВ (частоты 11 МГц), луч 3, канал 1: а–е — одномодовые сигналы; ж–о — многомодовые сигналы. Слева — параметры, получаемые ААМРАСF, справа — FИTACF

При сравнении с FИTACF исключаются пики с очень высокими скоростями $|V_{0i}| > 1000$ м/с и используются только параметры моды с максимальной интегральной амплитудой A_i .

ОБСУЖДЕНИЕ

На рис. 6, 7 показаны пространственно-временные особенности модового состава по данным наблюдений радаров ЕКВ и MAGW. Видна уже наблюдаемая ранее преобладание (см. рис. 6, 7, а–е, представляющие только одномодовые сигналы) между характеристиками, определяемыми ААМРАСF и FИTACF в случае одномодовых сигналов.

На рис. 6, 7, ж–о, представляющих только многомодовые сигналы, видно (особенно из данных радара MAGW), что области с мультимодовой структурой могут занимать большие пространственные области. Это может быть связано, например, с тем, что на фоне высоких пространственных градиентов

параметров можно наблюдать несколько сигналов различных типов в области, засвечиваемой одним зондирующим импульсом (протяженностью порядка 45 км) [Schiffler et al., 1997]. На радаре ЕКВ также наблюдаются небольшие пространственно-локализованные области с многомодовой структурой, связанные обычно с ионосферным рассеянием (область 21 УТ на рис. 6, ж–о). Таким образом, наблюдаемые многомодовые спектры регулярны и могут занимать большие пространственно-временные области, что соответствует более ранним результатам, полученным методом Бурга [Schiffler et al., 1997; Huber, Sofko, 2000; Danskin et al., 2004].

Приведенный в работе анализ показал, что FИTACF и ААМРАСF в случае одномодовых сигналов дают очень похожие значения доплеровской скорости, но существенно отличающиеся спектральные ширины. FИTACF и ААМРАСF в случае многомодовых сигналов сложно сравнивать. Хорошее качество

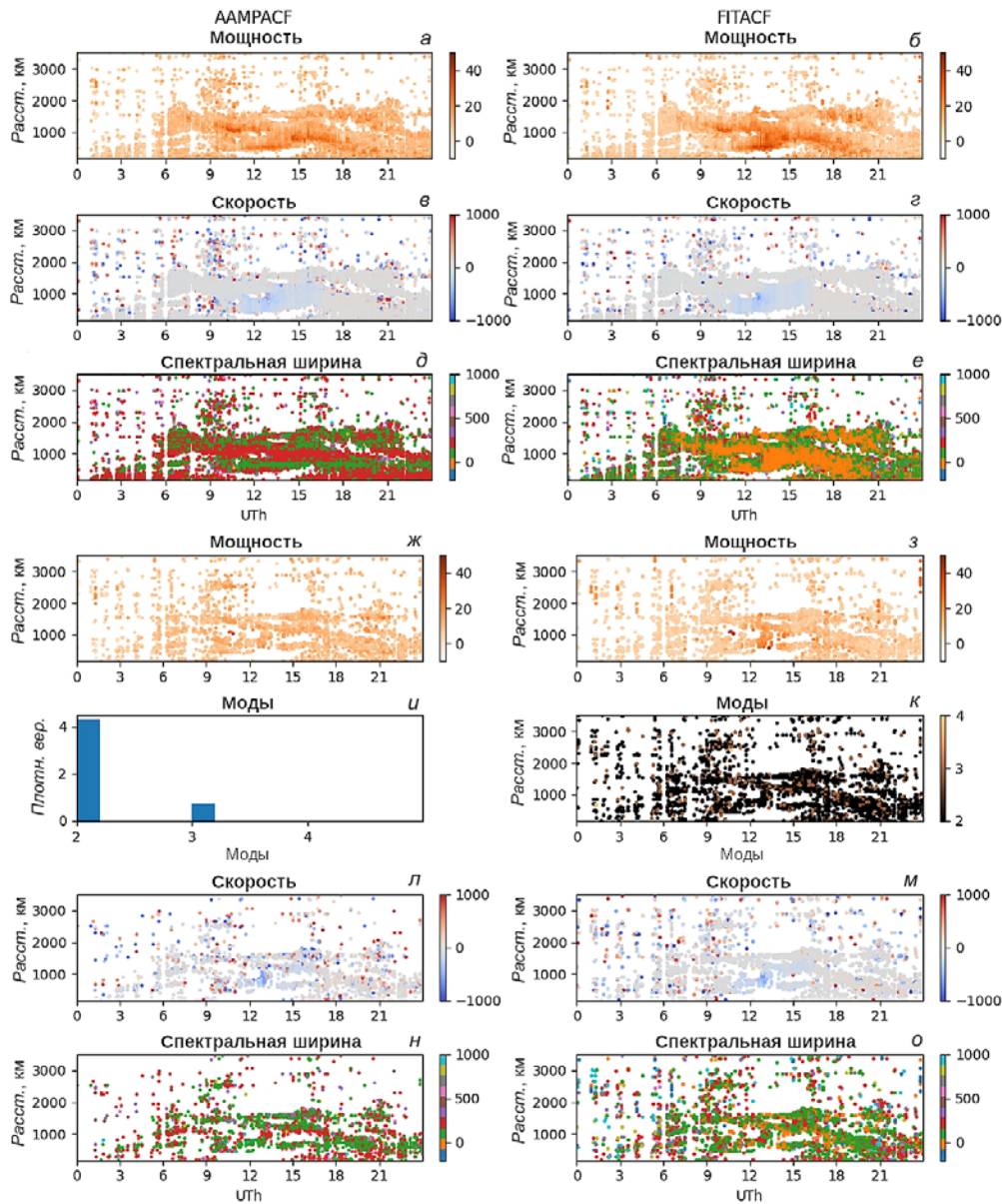


Рис. 7. Параметры многомодовых сигналов 31.05.2025 на радаре MAGW (частоты 8МГц), луч 3, канал 1: а-е — одномодовые сигналы; ж-о — многомодовые сигналы. Слева — параметры получаемые ААМРАСF, справа — FITACF

сравнения получается, если сравнивать с FITACF параметры только самой мощной спектральной моды.

Это говорит о том, что алгоритм FITACF в большей части случаев оценивает многомодовый сигнал как одномодовый с измененной спектральной шириной, а в алгоритме ААМРАСF эти моды могут быть разделены. В случае, когда необходим качественный анализ или наблюдаются одномодовые сигналы, можно использовать алгоритм FITACF. Для более детального анализа, особенно в случае наблюдения многомодовых сигналов, имеет смысл использовать ААМРАСF. Другим достоинством ААМРАСF является положительность всех определяемых им спектральных ширин вне зависимости от сложности сигнала.

С физической точки зрения анализ многомодовых сигналов может применяться в трех случаях. Первый случай (например, при исследовании каспа [Schiffler et al., 1997]) — когда внутри анализируе-

мого объема (порядка 45 км по дальности) присутствуют области с различными доплеровскими скоростями, что позволяет изучать конвекцию с повышенным пространственным разрешением, превышающим пространственное разрешение отдельного импульса [Huber, Sofko, 2000]. Второй случай [Danskin et al., 2004] — анализ спектров, составленных из неустойчивостей двух типов: например, Фарлея — Бунемана и градиентно-дрейфовых. Третий случай — одновременное наблюдение нескольких мод сигналов, распространяющихся по различным траекториям, но приходящих с одинаковой задержкой.

Очевидно, для интерпретации многомодовых сигналов нужно использовать методы классификации, устойчивые к изменению спектральной ширины. Применение к этой задаче стандартного алгоритма классификации сигналов как ионосферных и рассеянных от земной поверхности [Popomarenko et al., 2007] невозможно, поскольку спектральные ширины, опреде-

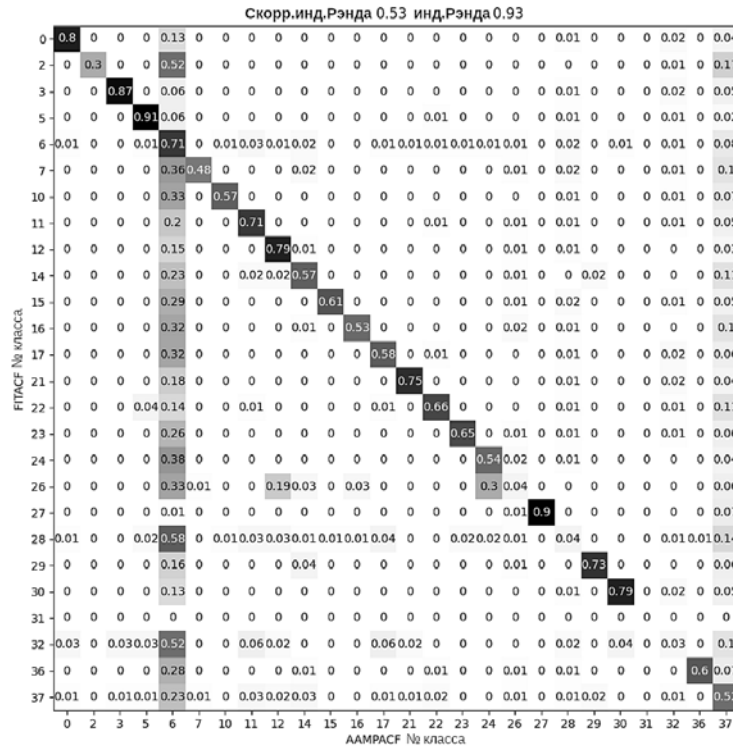


Рис. 8. Матрица ошибок для классификации сигналов, обработанных алгоритмами FITACF и AAMPACF в период 29.05–02.06.2025. Диагональ соответствует идентичной классификации одного и того же сигнала (его моды), обработанного двумя алгоритмами

ляемые двумя методами, существенно различаются. Одним из потенциальных методов такой классификации может быть алгоритм [Berngardt, Lavygin, 2026], основанный на трассировке лучей, требующий точных измерений угла места прихода сигналов и слабо зависящий от спектральной ширины.

Возможная интерпретация номеров классов, используемых ниже, с физической точки зрения показана в [Berngardt, Lavygin, 2026]. Предполагая, что все моды сигнала приходят с одного угла места, можно получить матрицу ошибок, показанную на рис. 8.

Видно, что большая часть мод определяется по-хожим образом по данным FITACF и AAMPACF, что связано с адекватным вычислением скоростей обоими алгоритмами в одномодовом случае и со сравнительно небольшим количеством многомодовых сигналов. Основные отличия AAMPACF приходятся на плохо определяемые классы № 6 (слишком высокие скорости или спектральные ширины) и № 37 (разные варианты классификатора по-разному идентифицируют класс). Появление класса № 6 легко объяснимо: в спектрах присутствуют высокочастотные моды, и после выделения их алгоритмом AAMPACF они классифицируются как класс № 6 и игнорируются алгоритмом FITACF. Появление класса № 37 связано, по-видимому, со сложными видами рассеяния, не учитывавшимися ранее при обучении классификатора (классификатор обучался на FITACF данных радаров SuperDARN и СЕКИРА). Поэтому они неуверенно классифицируются и относятся алгоритмом к классу № 37.

На рис. 9, а показано распределение сигналов по модам, обработанных алгоритмами AAMPACF

и FITACF. Видно, что основные новые наблюдения соответствуют классам № 6 (плохо интерпретируемый класс) и № 37 (неуверенно интерпретируемый класс) в рамках классификатора [Berngardt, Lavygin, 2026]. Доля новых сигналов для остальных классов составляет порядка 5–10 %.

На панели б показано распределение сигналов, которые интерпретируются после AAMPACF не так, как после FITACF. Видно, что сигналы, интерпретируемые после FITACF как класс № 6 (плохо интерпретируемый класс), при использовании AAMPACF в 20 % случаев могут интерпретироваться по-другому. Лидерами по возможности иной интерпретации являются также классы №№ 26, 28, 32 и 37 (все являются неуверенно определяемыми классами в рамках классификатора [Berngardt, Lavygin, 2026]), что указывает на значительную долю плохо классифицируемых сигналов, которые обработкой по алгоритму AAMPACF можно интерпретировать по-другому.

Статистика рис. 9, в подтверждает указанную тенденцию: использование AAMPACF в основном увеличивает количество детектируемых сигналов, причисляемых к различным типам рассеяния (за счет того, что может обнаруживать в сигнале несколько мод), и существенно увеличивает количество сигналов в плохо определяемых классах — в частности, в классах №№ 6, 26, 28, 31, 32 и 37, внося в них, по-видимому, шумовые сигналы. Уменьшение числа сигналов при классификации данных AAMPACF наблюдается только в классе 32 (см. рис. 9, а), характеризуемом слишком большими высотами рассеяния [Berngardt, Lavygin, 2025]. Часть этих сигналов интерпретируется по-другому, в основном как имеющих слишком высокие скорости (класс № 6).

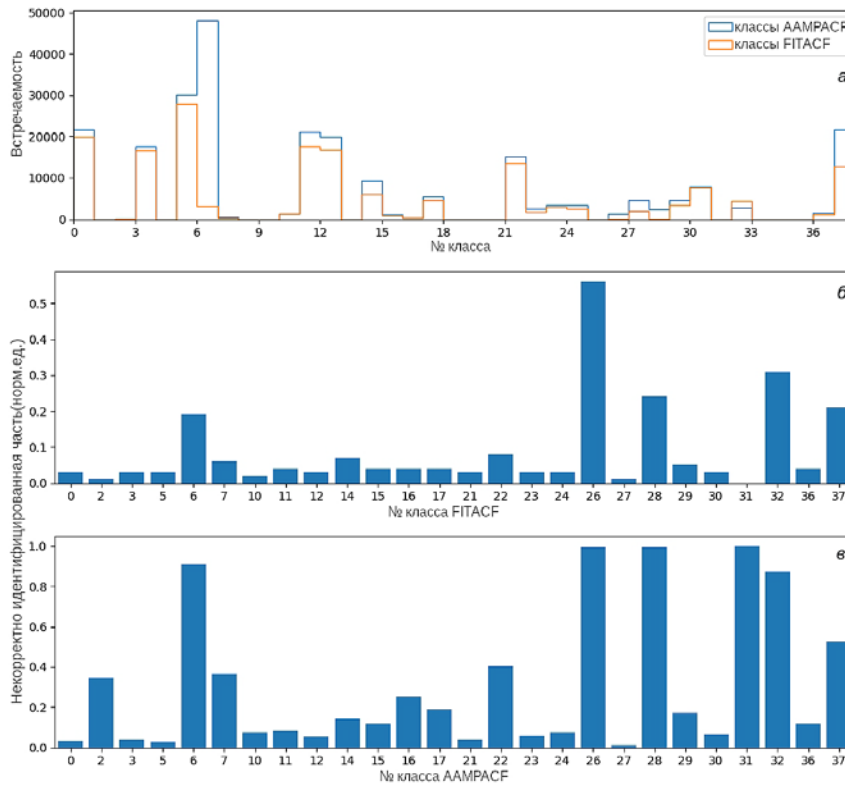


Рис. 9. Доля сигналов различных типов (а) по классификации результатов ФИТАСФ и ААМРАСФ [Bergardt, Lavygin, 2026]; б — доля сигналов, которые классифицируются после обработки ААМРАСФ иначе, чем после обработки ФИТАСФ; в — доля сигналов, которые классифицируются после обработки ФИТАСФ иначе, чем после обработки ААМРАСФ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлен алгоритм оценки параметров сигналов когерентного рассеяния ААМРАСФ (Arma Analysis of Multi Peak ACFs), основанный на параметрической оценке их спектров моделью ARMA с последующим фитированием полученных спектров суммой гауссовых функций. Каждый спектр описывается амплитудой, доплеровской скоростью и спектральной шириной. Алгоритм является развитием метода, предложенного в [Schiffler et al., 1997], и отличается от него использованием более сложной регрессионной модели ARMA, учетом особенностей корреляционной функции и определением трех параметров для каждого найденного пика (моды): амплитуды, скорости и спектральной ширины.

Приведенный в работе анализ показал, что ФИТАСФ и ААМРАСФ в случае одномодовых сигналов дают очень похожие значения доплеровской скорости, ФИТАСФ дает часто отличающиеся спектральные ширины по сравнению с ААМРАСФ, хотя в среднем они несколько похожи.

ФИТАСФ и ААМРАСФ в случае многомодовых сигналов сложно сравнивать, и результат зависит от способа обработки пиков ААМРАСФ. Сравнение показало, что наилучшую приемственность в параметрах с ФИТАСФ дает анализ максимальной по интегральной спектральной мощности моды. Это приводит к возможности анализа и интерпретации каждой моды как физически объяснимого рассеяния, а также к возможности использования алгоритма ААМРАСФ как эффективной замены алгоритму ФИТАСФ.

Многомодовый анализ ААМРАСФ увеличивает количество обнаруживаемых сигналов различных типов и может использоваться для расширения диагностических возможностей радаров СЕКИРА/SuperDARN.

К достоинствам модели можно отнести физическую корректность каждой моды: по определению каждая мода имеет положительные спектральные ширины и достаточно точное соответствие доплеровских скоростей хорошо верифицированным результатам ФИТАСФ в случае одномодовых сигналов.

К недостаткам модели можно отнести ее вычислительную ресурсоемкость, особенно при определении амплитуды и спектральной ширины моды, хотя современные компьютеры с учетом простоты распараллеливания задачи способны обрабатывать данные радаров СЕКИРА/SuperDARN в режиме реального времени.

Программа реализована на языках Си и Python для параллельной обработки АКФ сигнала, представленных в стандартном для радаров СЕКИРА/SuperDARN файловом формате RAWACF, и сохраняющая результаты в формате СВОР — одном из современных бережливых к ресурсам и самоописываемых форматов обмена типизированными данными. Для работы с файлами радаров используется библиотека RSTLite [https://github.com/vtsuperdarn/RSTLite]. В настоящее время программа на компьютере с 32-поточковым процессором, тактовой частотой 2.2 ГГц и оперативной памятью 16 Гб за сутки обрабатывает 8 суток данных с исходными автокорреляционными функциями.

Код программы доступен по адресу [https://github.com/berng/AAMPACF].

Результаты получены с использованием оборудования ЦКП «Ангара» ИСЗФ СО РАН, [<https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/>]. Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки в части поддержки функционирования радаров ЕКВ и MAGW, исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-22-00436, [<https://rscf.ru/project/24-22-00436/>].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Bahcivan H., Nicolls M.J., Perry G. Comparison of SuperDARN irregularity drift measurements and F-region ion velocities from the resolute bay ISR. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2013, vol. 105-106, pp. 325–331. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2013.02.002>.
- Barthes L., André R., 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, iss. 4, pp. 1005–1017. <https://doi.org/10.1029/98RS00714>.
- Berngardt O., Lavygin I. Self-learning signal classifier for HF coherent scatter radars. *Adv. Space Res.* 2026, vol. 77, iss.3, pp. 3527–3548. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2025.11.074>.
- Berngardt O.I., Grkovich K.V., Fedorov R.R. Synthesis of symmetric sounding sequences for Ekaterinburg coherent decimeter radar. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2020, vol. 62, iss. 11, pp. 721–733. <https://doi.org/10.1007/s11141-020-10018-y>.
- Berngardt O.I., Kusonsky O.A., Poddelsky A.I., Oinats A.V. Self-trained artificial neural network for physical classification of ionospheric radar data. *Adv. Space Res.* 2022, vol. 70, iss. 10, pp. 2905–2919. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2022.07.054>.
- Cadzow J.A. Spectral estimation: An overdetermined rational model equation approach. *Proc. IEEE.* 1982, vol. 70, iss. 9, pp. 907–939. <https://doi.org/10.1109/PROC.1982.12424>.
- 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, iss. 28, pp. 33–109. <https://doi.org/10.1007/s10712-007-9017-8>.
- Danskin D.W., Koustov A.V., Makarevitch R.A., Lester M. Observations of double-peaked E region coherent spectra with the CUTLASS Finland HF radar. *Radio Sci.* 2004, vol. 39, iss. 2, p. RS2006. <https://doi.org/10.1029/2003RS002932>.
- 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, vol. 71, pp. 761–796. <https://doi.org/10.1007/BF00751350>.
- Huber M., Sofko G.J. Small-scale vortices in the high-latitude F region. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2000, vol. 105, iss. A9, pp. 20885–20897. <https://doi.org/10.1029/1999JA000417>.
- Koustov A.V., Koehler J.A., Sofko G.J. et al. Relationship of the SAPPHERE-North merged velocity and the plasma convection velocity derived from simultaneous SuperDARN radar measurements. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 1997, vol. 102, iss. A2, pp. 2495–2501. <https://doi.org/10.1029/96JA03351>.
- Koustov A.V., Danskin D.W., Makarevitch R.A., Gorin J.D. On the relationship between the velocity of E-region HF echoes and ExB plasma drift. *Ann. Geophys.* 2005, vol. 23, iss. 2, pp. 371–378. <https://doi.org/10.5194/angeo-23-371-2005>.
- Koustov A.V., St.-Maurice J.-P., Sofko G.J., et al. Three-way validation of the Rankin Inlet PolarDARN radar velocity measurements. *Radio Sci.* 2009, vol. 44, iss. 4, p. RS4003. <https://doi.org/10.1029/2008RS004045>.
- Koustov A.V., Lavoie D.B., Kouznetsov A.F., et al. A comparison of cross-track ion drift measured by the swarm satellites and plasma convection velocity measured by SuperDARN. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2019, vol. 124, iss. 6, pp. 4710–4724. <https://doi.org/10.1029/2018JA026245>.
- Koustov A.V., Luciuk M.R., Gillies R.G., et al. Velocity of SuperDARN echoes at intermediate radar ranges. *Radio Sci.* 2020, vol. 55, iss. 11, p. e2020RS007142.
- Nguyen T.T., Devlin J.C., Elton D.M., et al. A comparison of FFT-based techniques for Doppler velocity estimation in SuperDARN radars. In: *2014 International Symposium on Information Theory and its Applications*, pp. 75–79.
- 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 Planetary Science.* 2019, vol. 6, iss. 1. <https://doi.org/10.1186/s40645-019-0270-5>.
- Ponomarenko P.V., Waters C.L., Menk F.W. Factors determining spectral width of HF echoes from high latitudes. *Ann. Geophys.* 2007, vol. 25, iss. 3, pp. 675–687. <https://doi.org/10.5194/angeo-25-675-2007>.
- Ponomarenko P., Ghalamkarian Nejad M., Koustov A.V. Application of SuperDARN interferometry for improved estimates of Doppler velocity and echo geolocation. *Radio Sci.* 2025, vol. 60, iss. 1, pp. e2024RS008084. <https://doi.org/10.1029/2024RS008084>.
- Ribeiro A.J., Ruohoniemi J.M., Ponomarenko P.V., et al. A comparison of SuperDARN ACF fitting methods. *Radio Sci.* 2013, vol. 48, iss. 3, pp. 274–282. <https://doi.org/10.1002/rds.20031>.
- Schiffler A., Sofko G., Newell P.T., Greenwald R. Mapping the outer LLBL with SuperDARN double-peaked spectra. *Geophys. Res. Lett.* 1997, vol. 24, iss. 24, pp. 3149–3152. <https://doi.org/10.1029/97GL53304>.
- Shepherd S.G., Ruohoniemi J.M., Greenwald R.A. Direct measurements of the ionospheric convection variability near the cusp/throat. *Geophys. Res. Lett.* 2003, vol. 30, iss. 21, p. 2109. <https://doi.org/10.1029/2003GL017668>.
- Xu L., Koustov A.V., Xu J.S., et al. A 2-D comparison of ionospheric convection derived from SuperDARN and DMSP measurements. *Adv. Space Res.* 2008, vol. 42, iss. 7, pp. 1259–1266. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2007.06.044>.
- Zhang J., Lan A., Yan J., et al. Development of the Chinese Dual Auroral Radar Network and preliminary results. *Space Weather.* 2024, vol. 22, iss. 10, p. e2024SW004131. <https://doi.org/10.1029/2024SW004131>.
- URL: <https://github.com/vtsuperdarn/RSTLite> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
- URL: <https://github.com/berng/AAMPACF> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
- URL: <https://rscf.ru/project/24-22-00436/> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).
- URL: <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/3056/> (дата обращения 12 декабря 2025 г.).

Как цитировать эту статью:

Бернгардт О.И. Метод определения параметров многомодовых сигналов, регистрируемых на радарх СЕКИРА. *Солнечно-земная физика.* 2026, т. 12, № 2, с. 84–96. <https://doi.org/10.12737/szf-122202609>.