

Радиолокация и радионавигация

УДК 621.396.96

Оригинальная статья

<https://doi.org/10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35>

**Увеличение разрешающей способности по азимуту
путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки
оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов
с использованием коэффициентов авторегрессионной модели**

В. В. Владимиров ✉

Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, Россия

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Аннотация

Введение. Коротковолновые станции обнаружения воздушных объектов ионосферного типа имеют ряд ограниченных технических характеристик, одной из которых является низкая разрешающая способность по азимуту. Она выражается в отсутствии возможности раздельного наблюдения воздушных объектов в группе, расстояние между которыми менее 30 км (на дальности наблюдения 2000 км). Повысить рассматриваемую техническую характеристику возможно внесением изменений в размеры приемной антенной решетки (АР), но такие изменения приводят, как правило, к неоправданным инженерным и финансовым затратам. На практике при пространственно-временной обработке сигнала применяются известные методы сверхразрешения, использование которых, увеличивая разрешающую способность станции, приводит к снижению темпа выдачи результатов наблюдения оператору из-за возникшей вычислительной нагрузки. Необходим поиск компромисса между максимальным достижением показателя разрешающей способности и приемлемой нагрузкой на систему при обработке сигнала.

Цель работы. Анализ фазового распределения на раскрыве АР падающей волны, рассеянной объектами, а также азимутальных портретов этих объектов при выполнении пространственно-временной обработки сигналов после увеличения количества отсчетов комплексной апертурной характеристики функции раскрыва АР.

Материалы и методы. При построении фазовых распределений на раскрыве АР и азимутальных портретов наблюдаемых объектов использовалось компьютерное моделирование в среде MATLAB, которую применяют для широкого спектра инженерных и научных задач разной сложности.

Результаты. Показана возможность использования линейного предсказания для экстраполяции функции раскрыва АР в задаче увеличения разрешающей способности по азимуту коротковолновой станции обнаружения воздушных объектов. Выполнено моделирование. Проведен анализ полученных результатов на примере группового наблюдения воздушных объектов.

Заключение. Полученные результаты доказали актуальность применения предложенной пространственно-временной обработки для коротковолновых станций, имеющих приемные АР больших размеров. Предложенный метод увеличения разрешающей способности имеет меньшую вычислительную нагрузку, что также является большим преимуществом.

Ключевые слова: коротковолновая станция, ионосферное распространение, антенная решетка, фазовое распределение, разрешающая способность, азимутальный портрет целей, спектральное оценивание, метод Берга

Для цитирования: Владимиров В. В. Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрыва антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2022. Т. 25, № 1. С. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.12.2021; принята к публикации после рецензирования 24.01.2022; опубликована онлайн 28.02.2022



Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

Vladislav V. Vladimirov ✉

Mozhaisky MSA, St Petersburg, Russia

✉ v.vladimirov87@mail.ru

Abstract

Introduction. Short-wave stations for detecting airborne objects of the ionospheric type have a number of limited technical characteristics, one of which is their low azimuth resolution. This limitation is manifested in the impossibility to separately observe air objects in a group, the distance between which is less than 30 km (at an observation range of 2000 km). The technical characteristics under consideration can be improved by making changes to the dimensions of the receiving antenna array (AA); however, such changes lead, as a rule, to unjustified engineering and financial costs. In practice, space-time signal processing is carried out using conventional super-resolution methods, which, although increasing the resolution of the station, decrease the rate of delivery of observation results to the operator due to an additional computational load. It is necessary to find a compromise between the maximum possible resolution indicator and the acceptable load on the system during signal processing.

Aim. Analysis of the phase distribution of the incident wave scattered by objects at the AA aperture, as well as the azimuthal images of these objects when performing space-time signal processing after extrapolating the AA aperture function by evaluating linear prediction using the least-squares method using autoregressive model coefficients.

Materials and methods. Modelling of phase distributions at the AA aperture and azimuthal images of the observed objects was conducted in the MATLAB environment.

Results. It is shown that the problem of increasing the azimuth resolution of a short-wave station for detecting air objects can be successfully solved using linear prediction based on the least-squares method using autoregressive model coefficients for the extrapolation of the AA aperture function. The results obtained during modelling were analysed using the example of group observation of air objects.

Conclusion. The proposed approach for extrapolation of the AA aperture function for short-wave stations with large receiving AAs proved its relevance. The method proposed for increasing the resolution is characterized by a lower computational load, thereby being promising for practical application.

Keywords: short-wave station, ionospheric propagation, antenna array, phase distribution, resolution, azimuth image of targets, spectral estimation, Burg's method

For citation: Vladimirov V. V. Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2022, vol. 25, no. 1, pp. 28–35. doi: 10.32603/1993-8985-2022-25-1-28-35

Conflict of interest. The author declares no conflicts of interest.

Submitted 22.12.2021; accepted 24.01.2022; published online 28.02.2022

Введение. При классическом подходе к пространственно-временной обработке сигнала разрешающая способность по азимуту определяется размерами приемной части антенной системы (апертурой антенны) [1–5]. При недостаточных ее размерах (слабой разрешающей способности) невозможно наблюдать раздельнодвигающиеся на небольшом расстоянии друг от друга объекты, что является острой проблемой для станций, работающих в декаметровом диапазоне. Разрешающая способность

по азимуту в таких станциях зачастую не превышает 0.8° , что на дальности наблюдения 2000 км выражается линейным расстоянием около 30 км.

Очевидным способом повышения разрешающей способности является увеличение размеров антенной системы. Однако это оказывается не всегда возможным. В декаметровых станциях антенные системы имеют значительные размеры и их увеличение влечет за собой большие финансовые затраты, инженерные расчеты и серьезные конструктивные сложности.

Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрытия антенной решетки оценением линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели

Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

Одним из путей решения данной проблемы является применение методов обработки сигнала, реализующих процедуры достижения сверхразрешения. Используя значительные вычислительные ресурсы для обработки сигнала указанными методами, зачастую удается добиться улучшения разрешающей способности. Примером таких методов могут служить авторегрессионные оценки спектральной плотности мощности (метод Юла–Уолкера, ковариационный метод, модифицированный ковариационный метод и т. д.), которые подробно рассмотрены в [6–13].

Отмеченные методы позволяют увеличить разрешающую способность, но ставят производителя перед компромиссом между достигаемой разрешающей способностью и степенью гладкости оценки, который определяется выбором порядка модели.

В последнее время приоритетным направлением является внедрение гиперзвуковых летательных аппаратов, наблюдение за которыми также влечет ряд жестких требований по времени выдачи результатов измерений [14–16]. Темп выдачи должен быть максимально быстрым (в режиме реального времени), а пространственно-временная обработка сигналов с использованием перечисленных методов имеет значительные временные затраты, появляющиеся из-за дополнительной вычислительной нагрузки.

Таким образом, разработчики вынуждены искать оригинальные решения, которые смогут обеспечить необходимую разрешающую способность станций, функционирующих в декаметровом диапазоне [2, 3], и тем самым расширить их функциональные возможности по сопровождению воздушных объектов, движущихся на больших скоростях и в группе.

Экстраполяция функции раскрыва антенной решетки (АР) оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели. В большинстве случаев оценивание спектра принимаемого сигнала выполняется с помощью процедур, использующих быстрое преобразование Фурье (БПФ). Данный подход имеет значительную эффективность в вычислительном отношении и обеспечивает получение удовлетворительных результатов при наблюдении объектов на достаточном отдалении друг от друга.

Однако, несмотря на указанное достоинство, имеется ряд серьезных ограничений. К ним относится ограничение разрешения, из-за которого не всегда получается разрешить спектральные линии сигналов от двух и более воздушных объек-

тов. Второе ограничение обусловлено неявной весовой обработкой входных данных, выражающейся в распределении энергии главного лепестка формируемого спектра в боковые лепестки, что приводит к наложению и искажению спектров сигналов от других объектов. Слабые сигналы могут быть незаметны в боковых лепестках спектров более сильных сигналов. Речь идет о спектральном оценивании без использования оконных функций, применение которых ослабляет утечку в боковые лепестки, но за счет снижения разрешающей способности [3, 4].

В последнее время вышло большое количество публикаций, посвященных процедурам спектрального оценивания, исследования в которых направлены на ослабление ограничений, присущих подходу на основе БПФ [6–9]. О сигнале, из которого берутся комплексные отсчеты, известна некоторая совокупность сведений, позволяющая сопоставить модель, которая является хорошей его аппроксимацией. В этом случае можно, как правило, получить более точную спектральную оценку, определяя параметры выбранной модели по результатам измерений.

В большинстве случаев подход к спектральному оцениванию выполняется в три этапа. Первый этап состоит в выборе модели исследуемого временного ряда. Второй этап состоит в оценивании параметров принятого сигнала с использованием имеющихся отсчетов данных. Третий этап состоит в получении спектральной оценки путем подстановки оценок параметров модели в расчетное выражение для спектральной плотности мощности (СПМ), соответствующее этой модели. Преимущество такого подхода заключается в том, что при хорошем соответствии выбранной модели наблюдаемым данным получаются более точные оценки СПМ с более высоким разрешением, чем при подходе на основе БПФ.

Платой за улучшение разрешающей способности применением оценивания СПМ является возрастание вычислительной сложности алгоритмов получения оценок (по сравнению с классическим применением БПФ). Основной интерес к методам параметрического спектрального оценивания связан с высокой разрешающей способностью, достигаемой при обработке последовательностей данных, содержащих ограниченное число отсчетов.

В данной статье представлены исследования, направленные на увеличение разрешающей способности по азимуту декаметровой станции путем увеличения функции раскрыва АР. Экстра-

поляция выполняется оцениванием линейного предсказания апертурной характеристики по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели, рассчитанных при спектральном оценивании имеющейся выборки функции раскрыва АР.

Расчет данных коэффициентов выполняется методом спектрального оценивания, который был предложен Джоном Бергом в 1967 г. на 37-й сессии Общества разведочной геофизики, состоявшейся в Оклахома-Сити, где он выступил с докладом на тему "Спектральный анализ по методу максимальной энтропии".

Предложенная пространственно-временная обработка оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов существенно отличается от выполнения классической обработки в обычных АР. Использование предложенной обработки позволяет получить высокую разрешающую способность по азимуту при приеме отраженного сигнала на АР стандартного размера.

При выполнении моделирования был рассмотрен сценарий с тремя воздушными объектами, движущимися на расстоянии $R_1 = 1889$ км, $R_2 = 1967$ км, $R_3 = 1976$ км до центрального элемента приемной антенной решетки и азимутом $\alpha_1 = 3.41^\circ$, $\alpha_2 = 5.56^\circ$ и $\alpha_3 = 5.77^\circ$ соответственно. Сложность данного сценария заключается в отсутствии возможности раздельного сопровождения объектов ввиду слабой разрешающей способности станции.

Передающая система излучает гармоническое колебание на несущей частоте $f_{\text{ц}} = 15$ МГц с шириной спектра $\Delta f_{\text{с}} = 20$ кГц.

Рассеянная электромагнитная волна объектами и подстилающей поверхностью после прохождения среды по трассе распространения поступает на вход приемной АР, которая имеет размер апертуры $A = 1300$ м.

В результате выполнения приема и доплеровской обработки принимаемого сигнала формируются комплексные амплитуды в виде зарегистрированного набора данных с шагом дискретизации, равным расстоянию между приемными элементами:

$$\dot{U}_a = A_i e^{jk r_i},$$

где A_i – амплитуда сигнала, принятого i -м элементом АР; k – волновое число; r_i – дальность от объекта до i -го элемента АР.

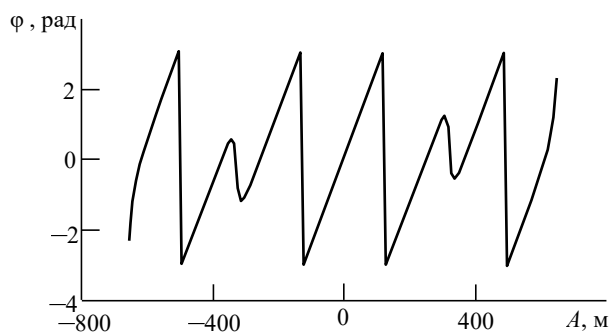


Рис. 1. Фазовый фронт волны на раскрыве антенной решетки
Fig. 1. The phase front of a wave at the antenna array aperture

Фазовый фронт падающей волны, рассеянной тремя моделируемыми объектами, на раскрыве АР будет иметь вид, представленный на рис. 1. Как видно, он представляет собой лишь небольшую часть сигнала, перехватываемую апертурой АР.

С целью получения азимутального портрета наблюдаемых объектов, представляющего собой диаграмму обратного рассеяния (рис. 2), необходимо выполнить дискретное преобразование Фурье.

В результате формирования азимутального портрета можно сделать вывод о недостаточной разрешающей способности по азимуту, так как реальное количество целей известно. Несмотря на то что есть два явных максимума, провал между которыми составляет ниже уровня 0.707 (на основе критерия Рэлея), реальная фоновая сцена состоит из трех объектов, которые на данном портрете наблюдать раздельно невозможно. Разрешающая способность по азимуту определяется размером апертуры АР. Таким образом, проблема заключается в размере информации, перехватываемой апертурой АР, которая соответствует лишь части волнового фронта, заполняющего окружающее пространство.

Предположим, что апертура рассматриваемой АР имеет размер больше, чем $A = 1300$ м. Тогда

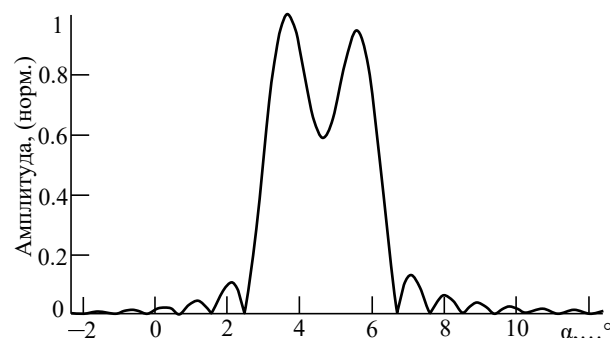


Рис. 2. Азимутальный портрет наблюдаемых объектов
Fig. 2. Azimuthal image of the objects under observation

очевидно, что не перехватываемое до этого АР излучение за пределами размера A сейчас будет приниматься апертурой большего размера и приведет к увеличению разрешающей способности за счет использования дополнительной информации, содержащейся в принятом волновом фронте.

Увеличить объем информации, содержащейся в принятом волновом фронте, предлагается за счет применения экстраполяции измеренных данных элементами АР классического размера.

Экстраполяция функции раскрытия АР выполняется с помощью линейного предсказания новых значений отсчетов комплексных амплитуд вперед и назад, а середина выборки остается заполненной исходными значениями, которые были получены ранее в результате приема и обработки радиолокационного сигнала.

Размер экстраполяции определяется коэффициентом k_3 , который определяет, во сколько раз будет увеличено количество измерений, принятых на апертуру АР стандартного размера.

Количество экстраполированных значений комплексных амплитуд рассчитывается по формуле

$$N_3 = N_A k_3 - N_A,$$

где N_A – количество имеющихся отсчетов сигнала; k_3 – коэффициент экстраполяции.

Далее было рассчитано количество отсчетов, которые заполнят начало N_3^b и конец N_3^f общей выборки:

$$N_3^f = N_3^b = \frac{N_3}{2}.$$

Помимо определения количества экстраполированных значений необходимо правильно их расположить относительно уже имеющихся, другими словами, определить индексы (места) заполнения в векторе экстраполированных значений комплексных амплитуд. Количество индексов соответствует количеству значений после экстраполяции $N_i = N_3$ и имеет значения от 1 до N_3 .

Так как исходная выборка \dot{U}_a располагается в центре вектора значений, индексы крайних отсчетов рассчитываются с использованием выражений для крайнего левого

$$N_i^b = \frac{N_3 - 1}{2} - \left\lfloor \frac{N_3 - 1}{2k_3} \right\rfloor + 1$$

и крайнего правого

$$N_i^f = \frac{N_3 - 1}{2} + \left\lceil \frac{N_3 - 1}{2k_3} \right\rceil + 1.$$

Индексы от N_i^b до N_i^f заполнены значениями исходной выборки \dot{U}_a и в процессе выполнения экстраполяции изменяться не будут.

Для расчета авторегрессионных параметров исходными данными являются комплексные амплитуды \dot{U}_a и выбранный порядок авторегрессионной модели p .

Выбору порядка авторегрессионной модели p (значению порядка фильтра) уделяется особое внимание. Именно выбором порядка модели можно получить сильно сглаженные спектральные оценки (при малом порядке) или, наоборот, увеличить вероятность появления ложных спектральных пиков (при большом порядке).

В данной работе был выбран оптимальный размер авторегрессионной модели, равный половине дискретных отсчетов зарегистрированного сигнала:

$$p = \frac{N_A}{2}.$$

Формула представлена для случая поиска авторегрессионных параметров с целью последующего формирования спектральной плотности мощности (методом Берга), в случае экстраполяции оцениванием линейного предсказания количество N_A будет увеличиваться с каждой итерацией (рекурсия обновления порядка) и принимать значение

$$p = \frac{N_A + n - 1}{2},$$

где n принимает значения от 1 до $\frac{N_A k_3 - 1}{2} - \frac{N_A k_3 - 1}{2k_3}$.

Для расчета авторегрессионных параметров поиск ошибок линейного предсказания выполняется с рекурсии нулевого порядка

$$\dot{e}_0^f(N_A) = \dot{e}_0^b(N_A) = \dot{U}_a(N_A),$$

где \dot{e}_0^f и \dot{e}_0^b – ошибки линейного предсказания нулевого порядка вперед и назад.

Начальное значение параметра авторегрессионной модели $a_0 = 1$. Используя начальные значения a , а также ошибок линейного предсказания

$\dot{\mathbf{e}}_0^f$ и $\dot{\mathbf{e}}_0^b$, рассчитаем коэффициент, получивший название коэффициента отражения $\dot{\mathbf{K}}_p$, который определяется по значениям автокорреляции, соответствующей сдвигам от 0 до $p-1$:

$$\dot{\mathbf{K}}_p = \frac{-2\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A)\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1)}{\dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A)^2 + \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1)^2}.$$

В алгоритме Берга используется оценка коэффициента отражения, определяемая по методу наименьших квадратов. При каждом значении порядка p в нем минимизируется среднее арифметическое значение ошибок линейного предсказания вперед и назад.

Рекурсивное решение уравнений Юла–Уолкера [6] методом Левинсона [6] связывает авторегрессионные параметры порядка p с параметрами порядка $p-1$ соотношением

$$\dot{\mathbf{a}}_p = \dot{\mathbf{a}}_{p-1} + \dot{\mathbf{K}}_p \dot{\mathbf{a}}_{p-1}^*.$$

Каждую новую итерацию для расчетов очередных значений на интервале p коэффициента отражения и авторегрессионного параметра выполняется пересчет и обновление имеющихся значений ошибок линейного предсказания вперед $\dot{\mathbf{e}}_p^f$ и назад $\dot{\mathbf{e}}_p^b$, которые связывают ошибки предсказания порядка p с ошибками предсказания порядка $p-1$:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{e}}_p^f(N_A) &= \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A) + \dot{\mathbf{K}}_{p-1} \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1); \\ \dot{\mathbf{e}}_p^b(N_A) &= \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^b(N_A-1) + \dot{\mathbf{K}}_{p-1} \dot{\mathbf{e}}_{p-1}^f(N_A).\end{aligned}$$

Результатом выполненных расчетов является вектор комплексных значений авторегрессионных параметров $\dot{\mathbf{a}}_p$, соответствующий размерности $p+1$. На рис. 3 представлена зависимость авторе-

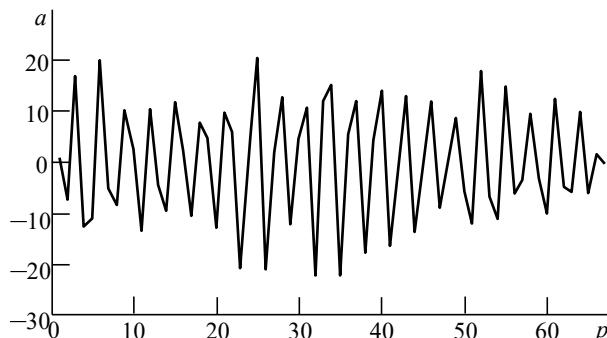


Рис. 3. Авторегрессионные параметры

Fig. 3. Autoregression parameters

Увеличение разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрытия антенной решетки оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели
Increased Azimuth Resolution by Extrapolating the Antenna Array Aperture Function by Least Squares Linear Prediction Estimation Using Autoregressive Model Coefficients

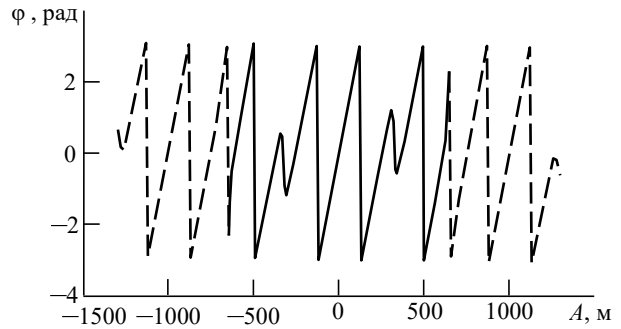


Рис. 4. Фазовый фронт на раскрытии антенной решетки до (сплошная линия) и после экстраполяции (штриховая линия)

Fig. 4. The phase front on at the antenna array aperture before (solid line) and after extrapolation (dashed line)

грессионных параметров от размера авторегрессионной модели.

На следующем шаге выполняется применение алгоритма с раздельным линейным предсказанием вперед за пределы имеющейся выборки $\dot{\mathbf{U}}_a$:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f) &= -\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f) + \\ &+ \dot{\mathbf{a}}_p(m+1)\dot{\mathbf{U}}_3(N_A + N_3^f - m)\end{aligned}$$

и назад

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b) &= -\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b) + \\ &+ \dot{\mathbf{a}}_p(m+1)\dot{\mathbf{U}}_3(N_A - N_3^b + m),\end{aligned}$$

где m определяет выбор авторегрессионного параметра и принимает значения от 1 до $p-1$.

На рис. 4 представлен результат выполнения предложенной обработки. Сплошная линия соответствует фазовому фронту падающей волны на раскрытии АР классического размера, который соответствует исходной выборке $\dot{\mathbf{U}}_a$. Штриховой линией представлено фазовое распределение, построенное с использованием данных $\dot{\mathbf{U}}_3$ после

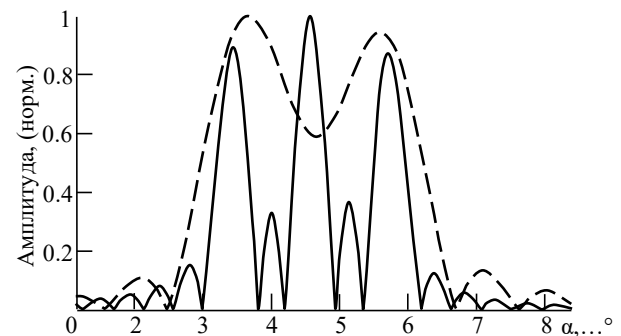


Рис. 5. Азимутальный портрет наблюдаемых объектов до (штриховая линия) и после экстраполяции (сплошная линия)

Fig. 5. Azimuthal image of the objects under observation prior to (dashed line) and following extrapolation (solid line)

выполнения экстраполяции. Результатом выполненных процедур явилось увеличение информации в 2 раза, что соответствует приему сигнала на АР, размером в 2 раза больше реальной.

После выполнения дискретного преобразования Фурье экстраполированной выборки данных \hat{U}_3 получен азимутальный портрет (рис. 5), представляющий собой диаграмму обратного рассеяния наблюдаемых объектов. Сплошной линией представлен результат применения предложенной обработки (экстраполяции функции раскрыва); штриховой линией – результат классической обработки.

Как видно, в результате применения предложенной пространственно-временной обработки сигнала появились явные провалы по уровню ниже 0.707. Это свидетельствует об увеличении разрешающей способности и появлении возможности наблюдения трех моделируемых объектов раздельно. Максимумы сформированных спектров

расположены на отметках, соответствующих азимутальному направлению расположения целей.

Выводы. Для реализации рассмотренного подхода требуются меньшие вычислительные затраты ресурсов станции, так как в данном методе решение сложных уравнений Юла–Уолкера реализовано с помощью рекуррентной процедуры (алгоритм Левинсона).

Применение предложенного в статье метода увеличения разрешающей способности по азимуту путем экстраполяции функции раскрыва АР оцениванием линейного предсказания по методу наименьших квадратов с использованием коэффициентов авторегрессионной модели позволило значительно повысить характеристики станции. Исходя из представленных результатов моделирования разрешающая способность по азимуту увеличилась в 2 раза, так как объем данных при выполнении пространственно-временной обработки соответствует объему данных, принятых на АР размера в 2 раза больше, чем истинная.

Список литературы

1. Акимов В. Ф., Калинин Ю. К. Введение в проектирование ионосферных загоризонтных радиолокаторов / под ред. С. Ф. Боева. М.: Техносфера, 2017. 492 с.
2. Фабрицио Джузеппе А. Высокочастотный загоризонтный радар: основополагающие принципы, обработка сигналов и практическое применение / пер. с англ. М.: Техносфера, 2018. 936 с.
3. Справочник по радиолокации: в 2 кн. Кн. 2 / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под ред. В. С. Вербы. М.: Техносфера, 2015. 680 с.
4. Skobelev S. P. Phased array antennas with optimized element patterns. London: Artech house, 2011. 261 p.
5. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. New York: John Wiley & Sons, 2012. 823 p.
6. Lagovsky B. A. Superresolution: Simultaneous Orthogonalization of Function Systems Describing the Received Signal and its Source // PIERS Proc. Moscow, Russia, 18–21 Aug., 2012. M.: The Electromagnetics Academy, 2012. P. 993–996.
7. Головкин Т. М. Сравнительный анализ алгоритмов сверхразрешения // LVII Междунар. науч. чтения (памяти В. А. Стеклова): сб. ст. Междунар. науч.-практ. конф. Москва, 16 окт. 2019. М.: ЕФИР, 2019. С. 32–37.
8. Тюленев С. В., Нечаев Ю. Б. Сравнительный анализ методов сверхразрешения в антенных решетках // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVII Междунар. научн.-практ. конф. Воронеж, 9–10 февр. 2017. С. 456–461.
9. Манохин Г. О., Гельцер А. А., Рогожников Е. В. Увеличение разрешающей способности радиолокационной системы за счет параметрических методов обработки сигналов // Вестн. СИБГУТИ. 2015. Т. 29, № 1. С. 15–23.

10. Лаговский Б. А. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками // Антенны. 2013. Т. 193, № 6. С. 9–16.
11. Чистяков В. А. Сравнительный анализ разрешающей способности методов сверхразрешения MVDR и MUSIC // Молодой ученый. 2020. Т. 306, № 16. С. 165–168.
12. Результаты обработки сигналов радиолокатора сопровождения методами цифрового спектрального анализа со сверхразрешением групповой цели по дальности и скорости / Д. С. Григорян, С. А. Климов, Д. Г. Митрофанов, А. Г. Прохоркин // Радиотехника. 2013. № 9. С. 25–38.
13. Djurovic I., Zhang Y. Accurate Parameter Estimation of Over-the-Horizon Radar Signals Using RANSAC and MUSIC Algorithms // Progress in Electromagnetics Research. M., 2018. Vol. 67. P. 85–93. doi:10.2528/PIERM18022004
14. Семенов С. С. Гиперзвуковые ударные системы нового поколения с использованием управляемых авиационных бомб. URL: <https://topwar.ru/25460-giperzvukovye-udarnye-sistemy-novogo-pokoleniya-s-ispolzovaniem-upravlyaemyh-aviacionnyh-bomb.html> (дата обращения 20.11.2021).
15. Анцупов О. И., Ищук П. Л., Косяк И. В. Гиперзвуковые летательные аппараты: реальна ли опасность // Воздушно-космическая сфера. 2016. № 2. С. 96–105.
16. Li G.-H., Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle // J. of Astronautics. 2015. Vol. 36, iss. 4. P. 397–403. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.04.005

Информация об авторе

Владимиров Владислав Владимирович – соискатель ученой степени кандидата технических наук, научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии имени А. Ф. Можайского (Санкт-Петербург). Автор 28 научных работ. Сфера научных интересов – пространственно-временная обработка сигналов, радиолокация.

Адрес: Военно-космическая академия имени А. Ф. Можайского, 42-й отдел (научно-исследовательский), ул. Генерала Хрулева, д. 16, Санкт-Петербург, 197348, Россия

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2984-9692>

References

1. Akimov V. F., Kalinin Ju. K. *Vvedenie v proektirovanie ionosfernykh zagorizontnykh radiolokatorov* [Introduction to Design of Ionospheric Over-the-Horizon Radars]. Moscow, *Tekhnosfera*, 2017, 492 p. (In Russ.)
2. Fabrizio G. A. High Frequency Over the Horizon Radar: Fundamental Principles, Signal Processing and Practical Applications. New York, McGraw-Hill, 2013, 944 p.
3. Skolnik M. I. Radar Handbook. Third Edition. New York, McGraw-Hill, 2008, 1352 p.
4. Skobelev S. P. Phased Array Antennas with Optimized Element Patterns. London, Artech house, 2011, 261 p.
5. Stutzman W. L., Thiele G. A. Antenna Theory and Design. New York, John Wiley & Sons, 2012, 823 p.
6. Lagovsky B. A. Superresolution: Simultaneous Orthogonalization of Function Systems Describing the Received Signal and its Source. PIERS Proc. Moscow, Russia, 18–21 August, 2012. Moscow, The Electromagnetics Academy, pp. 993–996.
7. Golovko T. M. *Sravnitel'nyi analiz algoritmov sverkhrazresheniya* [Comparative Analysis of Algorithms of Superresolution]. LVII Intern. Sci. readings (V. A. Steklov's memory). Collection of articles of the Intern. Scientific and Practical Conf. 2019. pp 32–37. (In Russ.)
8. Tjulenev S. V., Nechaev Ju. B. *Sravnitel'nyi analiz metodov sverkhrazresheniya v antennoykh reshetkakh* [The Comparative Analysis of Methods of Superresolution in Antenna Array]. Informatics: problems, methodology, technologies. Materials XVII of the Intern. scientific and practical conf. Voronezh, February 9–10, 2017, pp. 456–461. (In Russ.)
9. Manokhin G. O., Geltser A. A., Rogozhnikov E. V. Resolution Gain of the Radar System via Parametric Signal Processing Techniques. Vestnik SibGUTI. 2015, no. 1(29), pp. 15–23. (In Russ.)
10. Lagovsky B. A. Superresolution, Based on Aperture Synthesis with Smart Antennas. Antennas. 2013, no. 6 (193), pp. 9–16. (In Russ.)
11. Chistjakov V. A. *Sravnitel'nyi analiz razreshayushchei sposobnosti metodov sverkhrazresheniya MVDR i MUSIC* [Comparative Analysis of Resolution of Methods of Superresolution MVDR and MUSIC]. Young scientist. 2020, vol. 306, no. 16, pp. 165–168. (In Russ.)
12. Grigorjan D. S., Klimov S. A., Mitrofanov D. G., Prohorkin A. G. The Tracing Radar Signal Processing with Multiple Target Range and Doppler Superresolution. J. Radioengineering. 2013, no. 9, pp. 25–38. (In Russ.)
13. Djurovic I., Zhang Y. Accurate Parameter Estimation of Over-the-Horizon Radar Signals Using RANSAC and MUSIC Algorithm. Progress in Electromagnetics Research. M., 2018, vol. 67, pp. 85–93. doi: 10.2528/PIERM18022004
14. Semjonov S. S. The Hypersonic Shock Systems of New Generation of Use of the Managed Aerial Bombs. Available at: <https://topwar.ru/25460-giperzvukovye-udarnye-sistemy-novogo-pokoleniya-s-ispolzovaniem-upravlyaemyh-aviacionnyh-bomb.html> (accessed 20.11.2021).
15. Ancupov O. I., Ishhuk P. L., Kosjak I. V. Hypersonic Aircraft: is the Danger Real. Aerospace Sphere Journal. 2016, no. 2, pp. 96–105. (In Russ.)
16. Li G.-H., Zhang H.-B., Tang G.-J. Typical Trajectory Characteristics of Hypersonic Gliding Vehicle. J. of Astronautics. 2015, vol. 36, iss. 4, pp. 397–403. doi: 10.3873/j.issn.1000-1328.2015.04.005

Information about the author

Vladislav V. Vladimirov, applicant for the degree of Cand. Sci. (Eng.), researcher of the military institute of Mozhaisky MSA, Saint Petersburg. The author of 28 scientific publications. Area of expertise: spatial-temporal signal processing, radar.

Address: Mozhaisky MSA, 42 department (research), 16, General Khrulev St., St Petersburg, 197348 Russia

E-mail: v.vladimirov87@mail.ru

<https://orcid.org/0000-0003-2984-9692>