

УДК 621.396.96:004.932.2

DOI: [10.26102/2310-6018/2023.43.4.008](https://doi.org/10.26102/2310-6018/2023.43.4.008)

Моделирование процессов восстановления радиолокационных изображений

Т.В. Аветисян¹✉, М.В. Питолин², Ю.П. Преображенский³

¹Колледж Воронежского института высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

²Воронежский институт МВД, Воронеж, Российская Федерация

³Воронежский институт высоких технологий, Воронеж, Российская Федерация

Резюме. При получении изображений наземных или воздушных объектов в системах активной или пассивной локации на базе радиолокационных станций миллиметрового диапазона осуществляется последовательное сканирование зоны обзора. После прохождения тракта первичной обработки принятые сигналы переводятся в соответствующие радиоизображения. Повышение разрешающей способности радиолокационного изображения достигается на основе его алгоритмической обработки с привлечением оптимальных методов решения обратной задачи восстановления изображений. В работе объект рассматривается в виде множества независимых источников. Проведен анализ восстановления амплитуды и фазы таких источников. Приведена схема обработки информации в информационной системе. Определены условия, при которых возможно восстановление фазы в радиолокационном изображении. Представлен алгоритм восстановления изображения. В алгоритме корреляционный интеграл, в который входят два индекса, показывает, какая существует связь между энергетическими характеристиками локальных источников и их координатами. Показаны результаты восстановления нескольких источников с заданными исходными данными. Кроме того, представлены результаты, когда в корреляционном интеграле один индекс, в таком случае осуществляется восстановление изображения на одну из осей. Результаты работы могут быть использованы при восстановлении различных радиоизображений.

Ключевые слова: моделирование, восстановление изображений, рассеяние радиоволн, электродинамика, радиолокация.

Для цитирования: Аветисян Т.В., Питолин М.В., Преображенский Ю.П. Моделирование процессов восстановления радиолокационных изображений. *Моделирование, оптимизация и информационные технологии*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1399> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.008

Simulation of radar image recovery processes

T.V. Avetisyan¹✉, M.V. Pitolin², Yu.P. Preobrazhenskiy³

¹College of Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

²Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs, Voronezh, the Russian Federation

³Voronezh Institute of High Technologies, Voronezh, the Russian Federation

Abstract. When receiving images of ground or air objects in active or passive location systems based on millimeter-wave radar stations, sequential scanning of the viewing area is carried out. After passing the primary processing path, the received signals are translated into the corresponding radio images. An increase in the resolution of the radar image is achieved by means of its algorithmic processing with the involvement of optimal methods for solving the inverse problem of image restoration. In this paper, the object is considered as a set of independent sources. Restoration of the amplitude and phase of such sources is analyzed. The scheme of information processing in the information system is given. The conditions under which it is possible to restore the phase in the radar image are determined. An image

recovery algorithm is presented. In the algorithm, the correlation integral, which includes two indices, shows what relationship exists between the energy characteristics of local sources and their coordinates. The results of restoring several sources with the specified initial data are shown. In addition, the results are presented when there is one index in the correlation integral; in that case, the image is restored to one of the axes. The results of the research can be used in the restoration of various radio images.

Keywords: modeling, image restoration, radio wave scattering, electrodynamics, radar.

For citation: Avetisyan T.V., Pitolin M.V., Preobrazhenskiy Yu.P. Simulation of radar image recovery processes. *Modeling, Optimization and Information Technology*. 2023;11(4). URL: <https://moitvvt.ru/ru/journal/pdf?id=1399> DOI: 10.26102/2310-6018/2023.43.4.008 (In Russ.).

Введение

В настоящее время в нашей стране и за рубежом проводится большое число работ по постановке и решению обратных задач оптики, электродинамики и др. Прямая задача заключается в том, что исследуются процессы возбуждения или распространения излучения по заданным источникам или рассеивателям. Обратная задача состоит в том, что определяются характеристики источников или рассеивателей по данным регистрирующего излучения.

Искомые характеристики источников или рассеивателей, как показывает анализ, получаются из данных об интенсивности и фазе посредством соответствующего обратного соотношения с учетом имеющейся обратной априорной информации. Обратное соотношение или алгоритм обращения, конечно, основывается на соответствующей теории распространения и рассеяния электромагнитного излучения. Детекторы обеспечивают получение данных об интенсивности регистрируемых сигналов. Таким образом, следует получать необходимую информацию о фазе из распределения интенсивности сигнала.

В данной работе рассматриваются особенности восстановления амплитуды и фазы при восстановлении независимых источников и рассматривается алгоритм восстановления радиоизображений.

Анализ подхода, связанного с восстановлением амплитуды и фазы

На Рисунке 1 приведена схема, показывающая связь между априорной информацией и информацией о фазе.

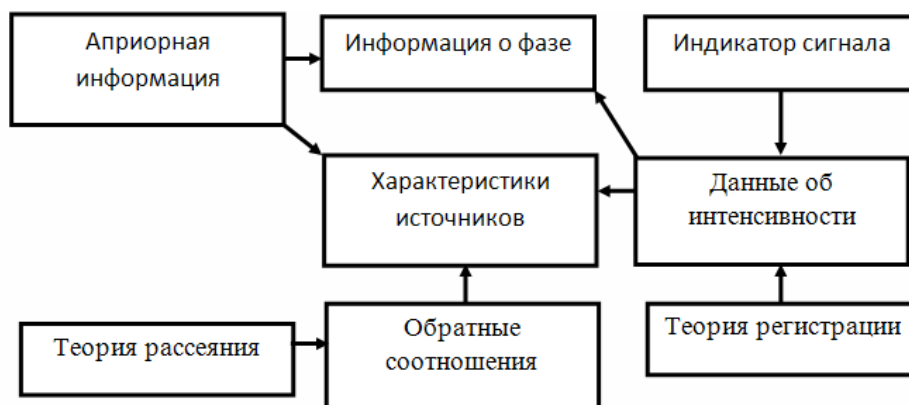


Рисунок 1 – Схема обработки информации в информационной системе
Figure 1 – Information processing scheme in the information system

Рассмотрим вопрос, связанный с тем, почему задача определения фазы является достаточно важной. Пусть имеем объект, который представляет собой пространственно-

временное распределение показателя преломления $n(r)$ (Рисунок 2). Для определения такого распределения будем использовать квазимонохроматическое, полностью когерентное излучение. Если задача восстановления фазы решена, то известна волновая функция в плоскости непосредственно за объектом, которую будем называть «плоскостью объекта».

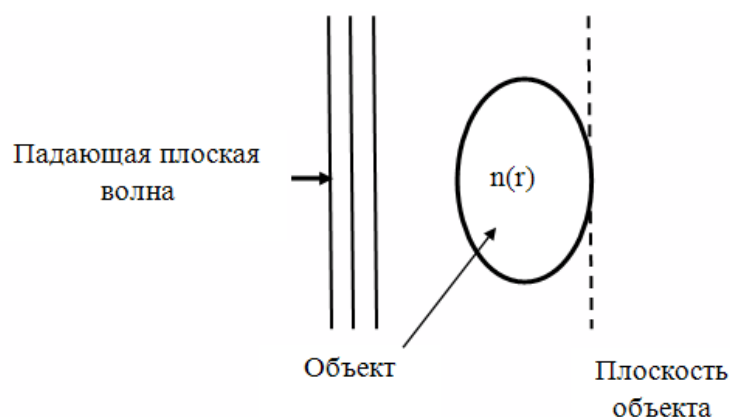


Рисунок 2–Иллюстрация расположения объекта
Figure 2– Illustration of object location

Пусть $n(r_0)$ обозначает волновую функцию в плоскости объекта, и пусть $\exp(ikr_0)$ обозначает невозмущенную падающую волновую функцию в этой плоскости, где r_0 – вектор плоскости объекта. Если ось z выбрать вдоль направления падения, то волновая функция

$$n(r_0) = \text{const} \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} n(r_0, z) dz. \quad (1)$$

Поэтому решение задачи восстановления фазы дает проекцию распределения показателя преломления на плоскость, перпендикулярную направлениям падения. И, облучая объект с разных направлений, получаем разные проекции функции $n(r)$. В конечном итоге, можно восстановить трехмерное распределение $n(r)$.

Общая схема процесса восстановления изображения приведена на Рисунке 3.

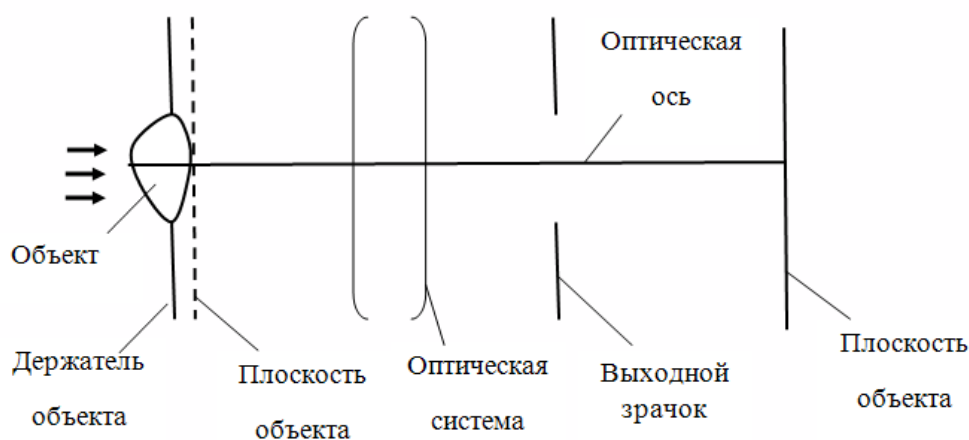


Рисунок 3 – Иллюстрация оптической системы
Figure 3 – Illustration of the optical system

Координаты определяются следующим образом: ось z выбираем вдоль направления оптической оси. Обозначаем через $r = (x_0, y_0)$ положение точки в плоскости объекта, которой присваивается координата z , равная нулю.

Плоскость объекта определяется как плоскость непосредственно за объектом, перпендикулярная оптической оси. Положение точки в выходном зрачке обозначено вектором $e = (\zeta, \eta)$, а положение точки в плоскости изображения описывается вектором $r_1 = (x_1, y_1)$. Далее $u_0(r_0)$ – волновая функция в плоскости объекта, и это функция, которую необходимо восстановить. Волновая функция в выходном зрачке

$$P(e) = \int_{\sigma_0} dr_0 u_0(r_0) \exp(2\pi i(\varphi(r_0, e) + r_0 \cdot e)), \quad (2)$$

где $\varphi(r_0, e)$ – абберационная функция в выходном зрачке, σ_0 – прозрачная часть плоскости объекта, которая рассматривается как продолжение объекта.

Соотношение между волновой функцией в плоскости изображения $u_i(r_i)$ и волновой функцией в выходном зрачке $P(e)$ есть преобразование Фурье

$$u_i(r_i) = \int_{\sigma} de P(e) \exp(-2\pi i r_i \cdot e) \quad (3)$$

где σ – апертура выходного зрачка.

Далее рассмотрим, как решается фазовая задача. Пусть протяженность выходного зрачка определяется ограничением $\alpha \leq \lambda \leq \beta$. Тогда (3) имеет вид

$$u(x) = \int_{\alpha}^{\beta} P(\zeta) \exp(-2\pi i x \zeta) d\zeta. \quad (4)$$

Из (4) мы можем легко вывести асимптотическое поведение $u(x)$ при $x \rightarrow \infty$

$$u(x) \sim -\frac{P(\alpha) \exp(-2\pi i x \alpha)}{2\pi i x} \cdot \left(\frac{P(\beta)}{P(\alpha)} \exp(-2\pi i x (\beta - \alpha)) - 1 \right). \quad (5)$$

Из (5) следует, что нули $u(x)$ имеют такое асимптотическое распределение

$$a_n \sim (\beta - \alpha)^{-1} (n + \gamma), \quad (6)$$

где n – целое число и γ определяется соотношением

$$P(\alpha)^{-1} P(\beta) = \exp(2\pi i \gamma) \quad (7)$$

при предположении, что $P(\alpha)^{-1} P(\beta) \neq 0$. При условии $\text{Im}(\gamma) > 0$ нули асимптотически лежат в верхней полуплоскости. Конечное число нулей a_1, a_2, \dots, a_n лежат в нижней полуплоскости. Строится функция

$$\omega(x) = u(x) \prod_{n=1}^N \frac{x - a_n^*}{x - a_n}. \quad (8)$$

Эта функция не имеет нулей в нижней полуплоскости. Рассматривается контурный интеграл

$$I(x, R) = (\pi i)^{-1} \int_C \frac{\ln(\omega(x')x' \exp(2\pi i a x'))}{x' - x} dx', \quad (9)$$

где контур C состоит из интервала $[-R, R]$ действительной оси с полуокружностями бесконечно малого радиуса в нижней полуплоскости с центром в начале координат. Используя теорему Коши, имеем

$$\begin{aligned} \ln(\omega(x)x \exp(2\pi i a x)) &= \operatorname{Im}((2\pi i)^{-1} P(a)) - \\ &- (\pi i)^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln(\omega(x')x' \exp(2\pi i a x'))}{x' - x} dx', \end{aligned} \quad (10)$$

где p – главное значение функции по Коши. Приравнявая мнимые единицы в обеих частях (10) и используя соотношение (8), получим искомое соотношение

$$\begin{aligned} \varphi(x) &= \frac{1}{\pi} P \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\ln(x' u(x'))}{x' - x} dx' + 2 \sum_{n=1}^N \arg(x - a_n) + \\ &\arg P(a) - \frac{\pi}{2} - 2\pi a x \end{aligned}, \quad (11)$$

где $\varphi(x) = \arg u(x)$.

Такой подход является эффективным, если известно, что $u(x)$ имеет только действительные нули.

Таким образом, нахождение фазы из простого распределения интенсивности возможно, если известно, что или $\operatorname{Im} \gamma > 0$ или $\operatorname{Im} \gamma < 0$. То есть, согласно (7), соответственно $|P(a)^{-1} P(\beta)| > 1$ или $|P(a)^{-1} P(\beta)| < 1$. Однако, должно быть ясно, что процедура, описанная выше, является доказательством существования единственного решения фазовой задачи, и применять к практическим задачам ее достаточно сложно.

Далее рассмотрим задачу определения фазы для функции взаимной когерентности $A(r_1, t_1, r_2, t_2)$, определяемой средним значением по ансамблю [1]:

$$A(r_1, t_1, r_2, t_2) = \langle u(r_1, t_1) u^*(r_2, t_2) \rangle, \quad (12)$$

где $u(r, t)$ обозначает стохастическую комплексную амплитуду в точке r для момента времени t . Если поле стационарно во времени, то A зависит только от временной зависимости $t_2 - t_1 = t$ и (12) принимает вид

$$A(r_1, t_1, r_2, t_2) = A(r_1, r_2, t). \quad (13)$$

Если функция взаимной когерентности по интенсивности $W(r, r')$ зависит только от разности $r - r'$, то применим подход, предложенный в [2]. Рассмотрим распределение интенсивности в плоскости Фраунгофера. В этом случае плоскость Фраунгофера является задней фокальной плоскостью [2]. Так как комплексные амплитуды связаны между собой преобразованием Фурье, соответствующие степени когерентности связаны на основе формулы

$$\widehat{W}(e, e') = \iint W(r - r') \exp(2\pi i (r e - r' e')) dr dr', \quad (14)$$

где $\widehat{W}(e, e')$ – степень когерентности в плоскости Фраунгофера, $W(r-r')$ – степень когерентности, которую нужно определить. Рассматривая одно пространственное измерение и считая $\rho = \rho'$, получим из формулы (14) следствие

$$I(\rho) = \int_0^{2a} dx (2a-x) (W(-x)) \quad (15)$$

где $I(\rho)$ – интенсивность в точке ρ Фраунгоферовой плоскости. Предполагалось, что интервал $-a \leq x \leq a$, соответствующий апертуре шириной $2a$, расположен в центре оптической оси. Взяв преобразование Фурье от $I(\rho)$, а именно

$$\widehat{i}(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\rho) \exp(2i\rho x) d\rho \quad (16)$$

получим после вычислений

$$W(x) = \begin{cases} (2a-x)^{-1} \widehat{i}(-x), & 0 \leq x \leq 2a \\ (2a+x)^{-1} \widehat{i}(-x), & -2a \leq x \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

Алгоритм восстановления изображения

Рассмотрим алгоритм восстановления изображения нескольких независимых источников. Пусть имеем N источников рассеяния электромагнитной волны. Запишем выражение для суммарной мощности рассеяния [4-6]

$$b = \sum_i e_i^2 + \sum_{q=0}^{N-1} \sum_{p=q+1}^N e_q e_p \cos\left(\frac{4\pi \ell_{p,q}}{\lambda} \sin(\theta_{q,p} - \varphi)\right). \quad (18)$$

Здесь $\ell_{p,q} = \sqrt{(x_p - x_q)^2 + (y_p - y_q)^2}$ – расстояния между источниками,

$\theta_{p,q} = -\arctg\left(\frac{x_p - x_q}{y_p - y_q}\right)$, φ – угол наблюдения, λ – длина падающей электромагнитной

волны, e_p – амплитуда источников, N – число источников.

При построении корреляционного интеграла используются различные весовые окна [3, 7]. В нашем случае использовалось весовое окно Кайзера-Бесселя [3]:

$$O(\varphi) = \begin{cases} \frac{I_0\left(2\pi \sqrt{1 - \left(\frac{2\varphi}{\Delta\varphi_1}\right)^2}\right)}{I_0(2\pi)}, & |\varphi| < \frac{\Delta\varphi_1}{2} \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (19)$$

где $\Delta\varphi_1 = \Delta\varphi / N$.

Пусть L – наибольшее расстояние (назовем его база) между источниками. Определяем далее корреляционный интеграл таким образом

$$q_{p,t} = \int b(\varphi) O(\varphi) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \ell \cos_i \cdot \varphi + \psi_p\right) d\varphi. \quad (20)$$

Здесь $\ell \cos_i = L \cdot \frac{t}{T}$, $0 \leq t \leq T$. Задаем $L=7$, $T=100$.

Этот корреляционный интеграл (20) будет определять связь между энергетическими характеристиками (18) локальных источников и их координатами. Например, можно рассматривать координаты x и y в декартовой или ℓ и θ – базы и углы [8-10]. При вычислении корреляционного интеграла мы восстанавливаем положения источников. Путем построения уровней постоянных значений функции q в координатах r и t .

На Рисунке 4 приведены результаты восстановления 4 источников со следующими исходными данными

$$x = [1405], \quad y = [0137], \quad \ell = [51107]. \tag{21}$$

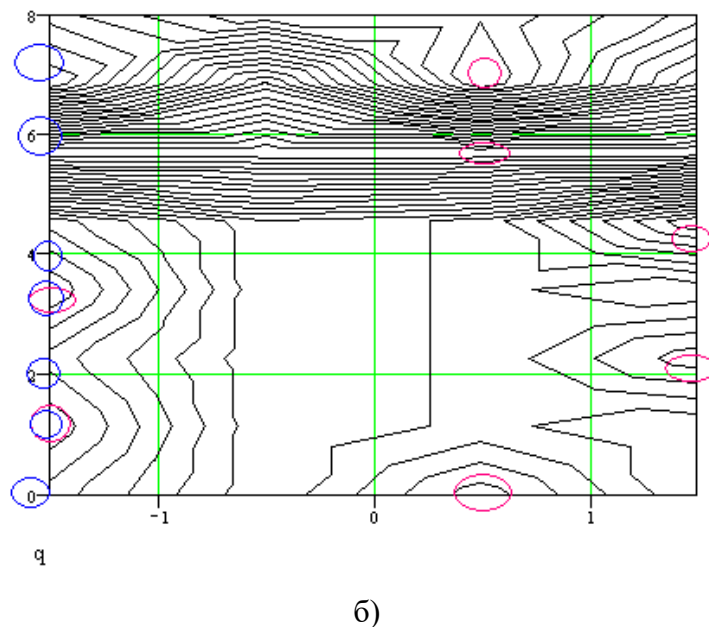
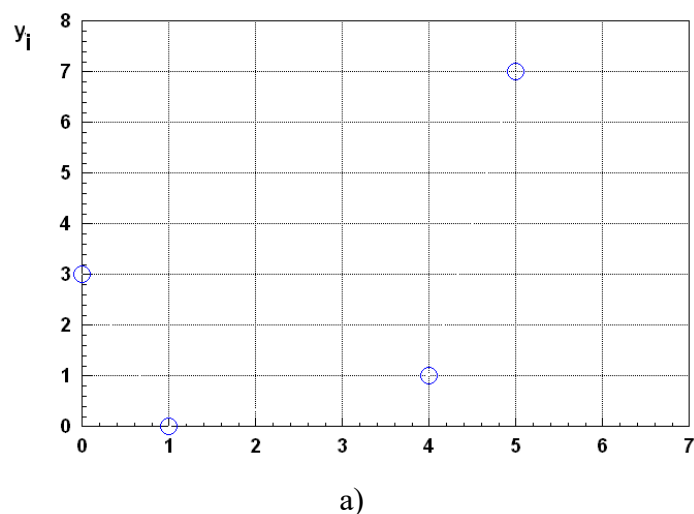


Рисунок 4 – а) расположение независимых источников переотражения электромагнитной волны, б) радиолокационное изображение для восстановленных источников
 Figure 4 – a) location of independent sources of electromagnetic wave re-reflection, b) radar image for reconstructed sources

Красным кружком обозначен максимум корреляционного интеграла, синим кружком обозначена проекция восстановленной базы.

Выше нами рассмотрен подход, в котором функция, показывающая корреляционную зависимость, определяется на основе двух индексов. Представляет интерес рассмотреть подход, в котором эта функция будет зависеть только от одного индекса, то есть, понизить размерность решаемой нами задачи. Это может быть сделано с использованием интеграла Фурье [2]:

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega) \exp(-j\omega t) d\omega. \quad (22)$$

Тогда вычисляем реальные и мнимые составляющие корреляционного интеграла с окном Кайзера-Бесселя:

$$c1_t = \int b(\varphi) O(\varphi) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \ell \cos_t \varphi\right) d\varphi, \quad s1_t = \int b(\varphi) O(\varphi) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \ell \cos_t \varphi\right) d\varphi \quad (23)$$

и без окна Кайзера-Бесселя

$$c2_t = \int b(\varphi) \cos\left(\frac{4\pi}{\lambda} \ell \cos_t \varphi\right) d\varphi, \quad s2_t = \int b(\varphi) \sin\left(\frac{4\pi}{\lambda} \ell \cos_t \varphi\right) d\varphi. \quad (24)$$

Выражение (23) соответствует расчетам с окном Кайзера-Бесселя, (24) соответствует расчетам без окна.

На Рисунке 5 показано восстановление проекций изображения на одну из осей. Видно, что применение окна позволяет получить более ярко выраженные максимумы функции корреляции.

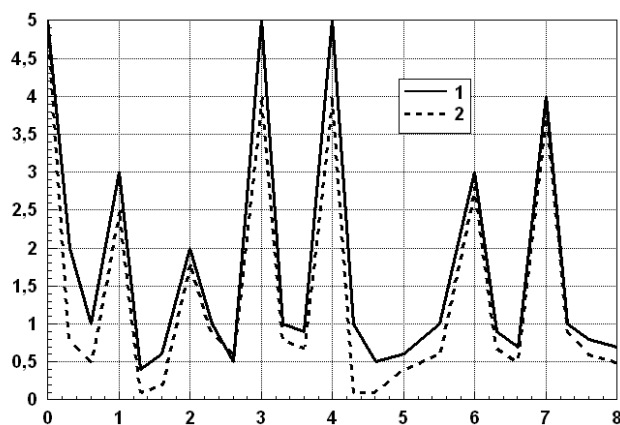


Рисунок 5 – Восстановление проекций баз для радиолокационного изображения, кривая 1 – с окном Кайзера-Бесселя, кривая 2 – без окна Кайзера-Бесселя

Figure 5 – Restoration of base projections for radar images, curve 1 – with a Kaiser-Bessel window, curve 2 – without a Kaiser-Bessel window

Заключение

Проведен анализ подхода, позволяющего восстанавливать амплитуду и фазу при построении радиолокационного изображения. Показано, что на основе корреляционного анализа возможно восстановление нескольких независимых источников при их наблюдении. Результаты могут быть полезны при проектировании объектов с заданными параметрами излучений в соответствующих условиях наблюдения.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Суворов А.О. Спектральный анализ сигнала, отраженного аэродинамической целью. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления*. 2018;25:74–89.
2. Одиноченко Н.М., Какаев В.В., Алуев С.В. Использование алгоритмов быстрого преобразования Фурье и адаптивного взвешивания при обработке радиолокационных сигналов. *Информационно-управляющие системы*. 2011;6:16–18.
3. Ершов Г.А., Переломов В.Н., Мясников С.А. и др. *Методы обработки сигналов в когерентно-импульсных радиолокационных станциях*. М.: НИЦ АРТ; 2016. 200 с.
4. Паршуткин А.В., Левин Д.В., Галандзовский А.В. Имитационная модель обработки радиолокационной информации в сети радиолокационных станций в условиях сигналоподобных помех. *Информационно-управляющие системы*. 2019;6:22–31.
5. Козлов С.В., Ву Тхань Ха. Оценивание угловых координат в обзорных радиолокационных станциях с подсистемами пространственной компенсации помех. *Доклады Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники*. 2019;122(4):48–56.
6. Достовалова А.М. Моделирование локально-однородных радиолокационных изображений при использовании различных статистических критериев. *Математическое моделирование и численные методы*. 2021;32(4):103–120.
7. Лоскутникова А.В., Чалова Е.Г. Фрактальная обработка радиолокационных изображений. *Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР*. 2022;1-2:190–192.
8. Гаврилов Д.А., Леконцев Д.А. Расчет характеристик обнаружения объектов на радиолокационном изображении. *СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК*. 2020;75(1):59–61.
9. Шибарова И.Г. Обнаружение объектов на радиолокационных изображениях. *СПбНТОРЭС: труды ежегодной НТК*. 2019;74(1):74–77.
10. Kostrov V.V., Grinchenko N.N., Vyugina A.A., Baranova S.N. Parallel computations in problems of reconstruction of distorted images in spatial-spectral form. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2023;35(2):157–168.

REFERENCES

1. Suvorov A.O. Spectral analysis of the signal reflected by an aerodynamic target. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informacionnye tekhnologii, sistemy upravleniya*. = *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Electrical engineering, information technology, control systems*. 2018;25:74–89. (In Russ.).
2. Odinenko N.M., Kakaev V.V., Aluev S.V. The use of fast Fourier transforms and adaptive weighting algorithms in radar signal processing. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*. 2011;6:16–18. (In Russ.).
3. Ershov G.A., Perelomov V.N., Myasnikov S.A. et al. *Methods of signal processing in coherent pulse radar stations*. Moscow, SIC ART; 2016. 200 p. (In Russ.).
4. Parshutkin A.V., Levin D.V., Galandzovsky A.V. Simulation model of radar information processing in a network of radar stations in conditions of signal-like interference. *Informacionno-upravlyayushchie sistemy = Information and control systems*. 2019;6:22–31. (In Russ.).

5. Kozlov S.V., Wu Thanh Ha. Estimation of angular coordinates in survey radar stations with subsystems of spatial interference compensation. *Doklady Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta informatiki i radioelektroniki = Reports of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics*. 2019;122(4):48–56. (In Russ.).
6. Dostovalova A.M. Modeling of locally homogeneous radar images using various statistical criteria. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody = Mathematical modeling and numerical methods*. 2021;32(4):103–120. (In Russ.).
7. Loskutnikova A.V., Chalova E.G. Fractal processing of radar images. *Sbornik izbrannykh statej nauchnoj sessii TUSUR = Collection of selected articles of the scientific session TUSUR*. 2022;1-2:190–192. (In Russ.).
8. Gavrilov D.A., Lekontsev D.A. Calculation of object detection characteristics on the radar image. *SPbNTORES: trudy ezhegodnoj NTK = SPbNTORES: Proceedings of the annual STC*. 2020;75(1):59–61. (In Russ.).
9. Shibarova I.G. Detection of objects on radar images. *SPbNTORES: trudy ezhegodnoj NTK = SPbNTORES: Proceedings of the annual STC*. 2019;74(1):74–77. (In Russ.).
10. Kostrov B.V., Grinchenko N.N., Vyugina A.A., Baranova S.N. Parallel computations in problems of reconstruction of distorted images in spatial-spectral form. *Proceedings of the Institute for System Programming of the RAS*. 2023;35(2):157–168.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Аветисян Татьяна Владимировна, Tatiana V. Avetisyan, Lecturer, College of преподаватель, Колледж Воронежского Voronezh Institute of High Technologies, института высоких технологий, Воронеж, Voronezh, the Russian Federation. Российская Федерация.

e-mail: vtatyana_avetisyan@mail.ru

ORCID: [0000-0003-3559-6070](https://orcid.org/0000-0003-3559-6070)

Питолин Михаил Владимирович, Mikhail V. Pitolin, Candidate of Technical кандидат технических наук, доцент, Sciences, Associate Professor, Воронежского института МВД, Воронеж, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs, Российская Федерация. Voronezh, the Russian Federation.

e-mail: pmv_m@mail.ru

Преображенский Юрий Петрович, Yuri P. Preobrazhenskiy, Candidate of кандидат технических наук, доцент, Technical Sciences, Associate Professor, Воронежский институт высоких технологий, Voronezh Institute of High Technologies, Воронеж, Российская Федерация. Voronezh, the Russian Federation.

e-mail: petrovich@vvt.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2023; одобрена после рецензирования 12.09.2023; принята к публикации 26.10.2023.

The article was submitted 16.06.2023; approved after reviewing 12.09.2023; accepted for publication 26.10.2023.