

Б.А. Лаговский<sup>1</sup>  
 А.Б. Самохин<sup>2</sup>  
 А.Г. Чикина<sup>3</sup>

B.A. Lagovsky  
 A.B. Samokhin  
 A.G. Chikina

**ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ  
 АНАЛИЗ ДАННЫХ В ЗАДАЧАХ  
 ФОРМИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ  
 СО СВЕРХРАЗРЕШЕНИЕМ**

**DATA MINING  
 IN PROBLEMS OF IMAGING  
 WITH SUPERRESOLUTION**

Обосновано применение методов интеллектуального анализа принимаемых радиолокационных сигналов (data mining) для повышения достигаемой степени сверхразрешения. На основе решений обратных задач с помощью быстродействующих алгоритмов создана методика интеллектуального анализа принимаемых сигналов в целях получения скрытой информации об источнике. Методика основана на итерационном процессе построения решения, в процессе которого последовательно выявляются априори неизвестные, так называемые скрытые характеристики источника сигнала. Использование получаемой дополнительной информации о решении является регуляризирующим фактором и позволяет повысить качество решений обратных задач.

**Ключевые слова:** угловое сверхразрешение, устойчивость обратной задачи, интеллектуальный анализ данных измерений, регуляризирующий фактор.

To improve the quality of the target image identification we need to improve the angular resolution. The numerical solutions became unstable when we try to obtain the angular resolution better than Rayleigh criterion allows. The additional information allows to enter new conditions in the form of the equations and inequalities. The use of received additional information about the solution is the regularizing factor which allows to improve the quality of the solution of the inverse problem

**Keywords:** angular superresolution, stability of inverse problems, data mining, regularizing factor.

**Введение**

В настоящее время начинают на практике применяться методы, алгоритмы и специализированные системы цифровой обработки и анали-

<sup>1</sup> Доктор технических наук, профессор, профессор Московского технологического университета (МИРЭА).

© Лаговский Б.А., 2017.

<sup>2</sup> Доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ, профессор кафедры ПМ Московского технологического университета (МИРЭА).

© Самохин А.Б., 2017.

<sup>3</sup> Доктор технических наук, АО «Научно-производственная корпорация «Системы прецизионного приборостроения», аспирант Московского технологического университета (МИРЭА).

© Чикина А.Г., 2017.

за сигналов на их основе, позволяющие превысить угловую разрешающую способность, определяемую в соответствии с критерием Рэлея:

$$\delta\theta \cong \lambda / D, \quad (1)$$

где  $D$  – линейный размер апертуры системы измерений,  $\lambda$  – длина волны. Выражение (1) совпадает с шириной диаграммы направленности (ДН) антенной системы по половинной мощности  $\theta_{0,5}$ .

Известны методы и системы обработки сигналов, позволяющие получать сверхразрешение:

– MUSIC (множественной классификации сигналов – MUltiple Signal Classification);

– ESPRIT;

– метод максимальной энтропии (ММЭ) Берга;

- метод Кейпона;
- метод «теплового шума»;
- метод Борджотти – Лагунаса – метод обратной свёртки;
- фазовых взвешивающих коэффициентов;
- углового взвешивания и ряд других [1; 2].

Перечисленные методы и алгоритмы решений не являются универсальными и далеко не всегда эффективны. Их эффективность зависит в первую очередь от соотношения сигнал/шум в принимаемом сигнале. В основном, они начинают успешно работать и позволяют в несколько раз повысить эффективное разрешение при отношении сигнал/шум не ниже 20–25 дБ. Для дальнейшего увеличения разрешения в два раза требуется обеспечить увеличение отношения сигнал/шум на порядок. Быстродействие большинства алгоритмов на основе приведенных выше методов оказывается недостаточным для работы в режиме реального времени.

### 1. Постановка задачи

Пусть в секторе обзора РЛС находится исследуемый объект с конечными угловыми размерами. Задана ДН антенной системы  $f(\alpha, \varphi)$ . Принятый сигнал в виде огибающей  $U(\alpha, \varphi)$ , полученный при сканировании сектора обзора по угловой координате  $\alpha$ , представляет собой свёртку:

$$U(\alpha, \varphi) = \int_{\Omega} f(\alpha - \alpha', \varphi - \varphi') I(\alpha', \varphi') d\varphi' d\alpha', \quad (2)$$

где  $\Omega$  – угловая область расположения источника излучения;

$I(\alpha, \varphi)$  – неизвестное угловое распределение амплитуды отраженного (или излучаемого) источником сигнала.

Ставится задача восстановления детализированного изображения источника  $I(\alpha, \varphi)$  с возможно большим разрешением на основе анализа принятого сигнала и известной ДН антенной системы. Математически задача сводится к приближенному решению одно- и двумерного интегрального уравнения (ИУ) Фредгольма первого рода типа свёртки (2).

Поставленная задача является обратной. Из трех условий корректности поставленной задачи по Адамару (существование решения, единственность и устойчивость) в рассматриваемых задачах нарушаются второе и третье. В силу некорректности задачи попытки увеличить разрешение по сравнению с классической величиной приводят в общем случае к появлению неустойчивостей в решениях.

### 2. Алгебраические методы решения

В работах [3–8] обоснованы и исследованы алгебраические методы восстановления изо-

бражений объектов со сверхразрешением. Они основаны на параметризации обратной задачи путем представления решения в виде разложения по последовательностям функций.

**Одномерный случай.** Представим решение  $I(\alpha)$  в виде:

$$I(\alpha) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m g_m(\alpha), \quad (3)$$

где  $g_m(\alpha)$  – ортогональные в области  $\Omega$  функции;  $b_m$  – неизвестные коэффициенты разложения.

Тогда принятый сигнал может быть выражен в виде суперпозиции функций  $G_m(\alpha)$ , являющихся образами  $g_m(\alpha)$ :

$$G_m(\alpha) = \int_{\Omega} f(\alpha - \phi) g_m(\phi) d\phi, \quad U(\alpha) = \sum_{m=1}^{\infty} b_m G_m(\alpha). \quad (4)$$

Таким образом, проведена параметризация поставленной обратной задачи, и ее решение сведено к поиску коэффициентов  $b_m$ .

Коэффициенты разложения, обеспечивающие минимальное среднеквадратичное отклонение сигнала в виде (4) от принятого находятся при решении системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно вектора  $B$  неизвестных коэффициентов  $b_j$ .

$$V = G B \quad (5)$$

$$V_j = \int_{\Theta} U(\alpha) G_j(\alpha) d\alpha$$

$$G_{j,m} = \int_{\Theta} G_j(\alpha) G_m(\alpha) d\alpha. \quad (6)$$

**Двумерный случай.** Большинство известных методов, перечисленных выше, предназначено для получения решения одномерных задач. Их обобщение на двумерные задачи существенно усложняет алгоритмы, повышает степень неустойчивости решений. Кроме того, резко повышается время обработки сигналов.

Обобщение алгебраических методов решения одномерных задач на двумерные не приводит к серьезному усложнению алгоритмов. Время численного решения и, как будет показано, устойчивость решений при этом изменяются незначительно.

Представим искомое двумерное распределение  $I(\alpha, \varphi)$  в виде разложения по конечной системе ортогональных двумерных функций с неизвестными коэффициентами. Удобнее всего использовать разделимые системы, которые представляются в виде произведения одномерных систем  $G_{n,m}(\alpha, \varphi) = g_n(\alpha) g_m(\varphi)$ . Тогда:

$$I(\alpha, \varphi) \cong \sum_{n,m=1}^N b_{n,m} g_n(\alpha) g_m(\varphi), \quad (7)$$

и принятый сигнал получим в виде:

$$U(\alpha, \varphi) \cong \sum_{n,m=1}^N b_{n,m} \psi_{n,m}(\alpha, \varphi),$$

$$\psi_{n,m}(\alpha, \varphi) = \int_{\Omega} f(\alpha - \alpha', \varphi - \varphi') g_n(\alpha') g_m(\varphi') d\alpha' d\varphi'. \quad (8)$$

Коэффициенты  $b_{n,m}$  находятся как решения СЛАУ:

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} U(\alpha, \varphi) \psi_{j,k}(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi &= \\ &= \sum_{n,m} \int_{\Omega} \psi_{j,k}(\alpha, \varphi) \psi_{n,m}(\alpha, \varphi) d\alpha d\varphi, \\ j, k &= 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, алгебраические методы позволяют проводить параметризацию одно- и двумерных обратных задач и сводить решения интегральных уравнений к решению СЛАУ, иногда с дополнительными условиями.

Предложенные алгебраические методы позволяют, последовательно увеличивая число используемых функций, т.е. увеличивая степень сверхразрешения, приближаться к предельному для каждой решаемой задачи угловому разрешению.

### 3. Использование априорной информации об источнике

Хорошо известно, что повышение качества решений обратных задач достигается при использовании предварительно заданной информации о решении. Для дальнейшего повышения степени достигнутого сверхразрешения получения критически важно иметь как можно больше предварительной информации о решении, т.е. об источнике сигналов. Использование такой априорной информации дает возможность повысить устойчивость решений и в конечном счете повысить угловое сверхразрешение.

Например, для выбора ортогональной системы функций  $g_m(\alpha)$  из (3) следует задать область расположения источника  $\Omega$ . Без какой-либо априорной информации определение области проводится приближенно, на основе оценки вида кривой  $U(\alpha)$  и, как правило, превышает истинные размеры  $\Omega$ . Если же размеры  $\Omega$  априори известны, то уменьшение размеров области позволяет, используя то же число функций, получить большее угловое разрешение.

В целом, применение алгебраических методов позволяет достаточно полно использовать предварительную информацию о решении. Она реализуется в виде:

- выбора расположения, размера и формы исследуемой области локализации источника сигналов;

- выбираемой для построения решения последовательности ортогональных функций;

- введения дополнительных условий в виде уравнений и неравенств, связывающих коэффициенты разложения по последовательностям функций.

Помимо заданной информации об источнике сигналов возможно выявление их «скрытых» характеристик. Алгебраические методы позволяют получать новые данные об источнике в ходе последовательного поиска приближенного решения задачи с нарастающим разрешением, используя интеллектуальный анализ данных.

Интеллектуальный анализ данных (data mining) является междисциплинарной областью, возникшей и развивающейся на базе распознавания образов, статистики, методов искусственного интеллекта, теории баз данных и др. Для большинства описанных в литературе методов получения углового сверхразрешения не характерно использование информации такого рода.

Для решения рассматриваемых задач предложен метод data mining в виде выявления «скрытых» характеристик источника. Он заключается в создании такого итерационного процесса, когда на каждом его шаге, используя данные, полученные на предыдущем шаге, уточняются, детализируются, а также и выявляются новые характеристики изображения. Это угловые размеры всего объекта и его отдельных составляющих, их относительное расположение, угловое распределение интенсивности отражаемого (излучаемого) сигнала, контуры границ областей с равной интенсивностью и т.д. На следующем шаге поиска решения полученная информация об объекте используется в качестве новой априорной и т.д., что позволяет повысить устойчивость получаемого на этом шаге решения и в конечном счете повысить степень сверхразрешения.

Предложенный новый итерационный метод интеллектуального анализа изображения объектов позволяет выявлять скрытые, не доступные при прямом наблюдении характеристики источников сигналов.

Проводимый в ходе построения решения интеллектуальный анализ получаемых изображений может быть эффективно использован в целях решения задач распознавания объектов. Выявляемые «скрытые» характеристики позволяют проводить классификацию источников сигналов и применять более эффективные специализированные для различных типов источников сигналов алгоритмы для дальнейшего повышения уровня достигнутого сверхразрешения.

К выявляемым «скрытым» характеристикам относятся:

- местоположение объекта наблюдения и его фрагментов;
- угловое распределение амплитуды отраженного (или излучаемого) объектом сигнала с разрешением, несколько превышающим рэлеевское;
- размер и форма области расположения источника;
- монотонность и гладкость функции, описывающей угловое распределение амплитуды отраженного (излучаемого) сигнала;
- наличие и положения областей с дискретным и непрерывным распределением;
- динамического диапазона изменения интенсивности источника;
- ограничений на градиент углового распределения амплитуды источника и т.д.

На основе выявленных новых характеристик источника сигналов последовательно, в ходе итерационного процесса, выбираются и при необходимости изменяются системы ортогональных функций, наилучшим образом описывающих этот источник, задаются дополнительные условия в виде уравнений и неравенств, связывающих коэффициенты разложения. Далее, на основании предварительно полученного решения проводится идентификация исследуемого источника, т.е. отнесение его к определенному типу, и определяется алгоритм дальнейшей обработки полученной информации.

На основе новой полученной информации об искомой функции  $I(\alpha)$ , в частности отбираются ортогональные функции, наиболее удобные для представления решения. Это особенно важно, т.к. размерность матриц СЛАУ (5), (9) ограничена из-за экспоненциального роста неустойчивости решения с увеличением числа уравнений, что позволяет использовать лишь небольшое число функций для любой используемой системы функций.

Описанная методика позволяет существенно увеличить эффективное угловое разрешение.

#### 4. Численные результаты

На математической модели плоской антенной решетки в ходе численных экспериментов исследовались алгебраические методы получения сверхразрешения и его пределы. Исследуемый объект задавался в виде углового распределения амплитуды отраженного сигнала, тождественно равной нулю вне сектора углов  $\Omega > \theta_{0,5}$  и в виде некоторой функции  $I(\alpha)$  в пределах этого сектора.

На рис. 1 приведены результаты восстановления изображений двух одинаковых малораз-

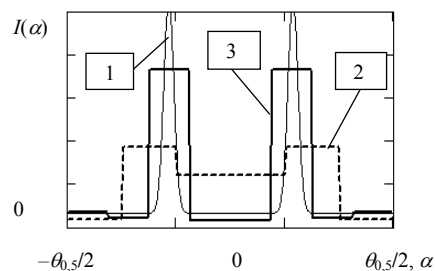


Рис. 1. Восстановление источника сигналов с помощью вейвлетов Хаара при использовании априорной информации:

- 1 – исходный сигнал;
- 2 – источник, восстановленный на основе (3) – (6);
- 3 – источник, восстановленный с помощью метода выявления «скрытых» характеристик

мерных источников сигналов (кривая 1), неразрешаемых при прямом наблюдении.

Алгоритм, основанный на использовании (3) – (6), т.е. без предложенного метода выявления «скрытых» характеристик, позволил разрешить источники сигналов и восстановить их изображения с некоторой ошибкой (кривая 2). Разрешение в три раза превысило критерий Рэля.

Полученное приближение показало, что источник излучения представляет собой два источника с малыми угловыми размерами. В ходе построения решения с использованием метода выявления «скрытых» характеристик на каждом шаге итерационного процесса уточнялась область расположения источников, что позволяло модернизировать систему используемых функций. В итоге полученное устойчивое решение (кривая 3) практически без ошибок локализовало положение источников с разрешением, в пять раз превосходящим критерий Рэля.

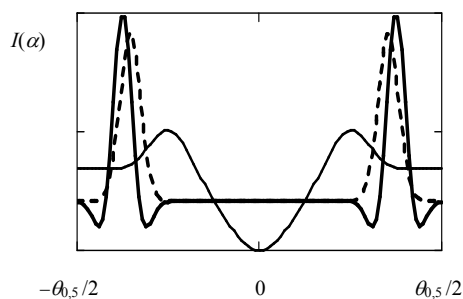


Рис. 2. Восстановленное изображение источника с помощью МНАТ-вейвлетов

- Пунктирная кривая – действительное распределение интенсивности,
- сплошная тонкая кривая – восстановленное изображение без использования методов интеллектуального анализа данных,
- сплошная жирная кривая – изображение с использованием итерационного процесса выявления «скрытых» характеристик решения

Особенно наглядно преимущества предложенного метода проявляются при высоком уровне шумов и помех.

На рис. 2 приведены результаты восстановления изображения источника на основе использования МНАТ-вейвлетов при высоком уровне шума, сравнимом с полезным сигналом и составившим 30% от полезного сигнала.

Полученное решение на основе интеллектуального анализа данных обеспечило точность локализации источника  $\theta_{0,5}/4 - \theta_{0,5}/8$ , повышение разрешения в 3–5 раз и высокую помехоустойчивость.

#### **Заключение**

Предложенные алгебраические методы обработки сигналов с использованием методов интеллектуального анализа данных обеспечивают повышение устойчивости и качества восстановления изображений объектов со сверхразрешением. Результаты численных исследований показали, что получение углового сверхразрешения возможно при отношении сигнал/шум, начиная с 12–15 дБ, т.е. при существенно меньших значениях, чем у известных методов и алгоритмов. Быстродействующие алгоритмы позволяют использовать метод в режиме реального времени.

#### **Литература**

1. Bajwa, W.U., Gedalyahu, K., Eldar, Y.C. Identification of Parametric Underspread Linear Systems and Super-Resolution Radar // IEEE Transactions on Signal Processing. – 2011. – V. 52. – No. 5. – P. 2548–2561.

2. Herman, M.A., Strohmer, T. High-resolution radar via compressed sensing // IEEE Trans. Signal

Processing. – 2009. – Vol. – 57. – No. 6. – P. 2275–2284.

3. Lagovsky, B.A., Samokhin, A.B. Image Restoration of Two-dimensional Signal Sources with Superresolution // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Proceedings. – Sweden. – 2013. – P. 315–319.

4. Lagovsky, B., Samokhin, A., Shestopalov, Y. Superresolution Based on the Methods of Extrapolation // Progress In Electromagnetics Research Symposium, Proceedings. – Prague. – 2015. – P. 1548–1551.

5. Lagovsky, B.A., Samokhin, A.B., Shestopalov, Y.V. Increasing accuracy of angular measurements using UWB signals // 11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). – Paris, 2017. – P. 1083–1086.

6. Lagovsky, B.A., Samokhin, A.B. Superresolution in signal processing using a priori information // International Conference Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). – Verona, Italy, 2017. – P. 779–783.

7. Lagovsky, B., Samokhin, A., Shestopalov, Y. Increasing Effective Angular Resolution Measuring Systems Based on Antenna Arrays // Proceedings of the 2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS), Espoo, Finland, 2016. – P. 432–434.

8. Лаговский Б.А., Самохин А.Б. Повышение информативности систем радиолокации на основе решения вариационных задач // Вестник Российского нового университета. Серия «Сложные системы: модели, анализ и управление». – 2015. – Выпуск 1. – С. 5–11.