

Регрессионные методы детализации изображений объектов дистанционного зондирования

Б. А. Лаговский

МИРЭА – Российский технологический университет,
Россия, 119454, г. Москва, пр-т Вернадского, 78

✉ robertlag@yandex.ru

Аннотация

Представлен и обоснован новый метод обработки радиолокационных сигналов, позволяющий превысить критерий Рэлея. Получение углового сверхразрешения основано на использовании нелинейной регрессии. Результаты численных экспериментов на математических моделях показали, что алгоритмы на основе развивающегося метода позволяют адекватно восстанавливать радиоизображения объектов дистанционного зондирования. Метод позволяет получать решения рассматриваемых обратных задач при существенно меньших значениях отношения сигнал/шум, чем известные методы достижения сверхразрешения.

Ключевые слова

сверхразрешение, критерий Рэлея, устойчивость решений, регуляризация обратных задач

Для цитирования

Лаговский Б. А. Регрессионные методы детализации изображений объектов дистанционного зондирования. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):378–384. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Regression methods of detail images in remote sensing

Б. А. Lagovsky

Russian Technological University MIREA,
78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia

✉ robertlag@yandex.ru

Abstract

This paper presents a new method for processing radar signals. The method is theoretically justified and allows exceeding the Rayleigh criterion. We use nonlinear regression to obtain angular superresolution. The results of numerical experiments with mathematical models demonstrate that the algorithms based on the developed method allow us to restore the radio images of remote sensing objects adequately. The method allows obtaining solutions of the considered inverse problems with significantly lower signal-to-noise ratios than the known methods for achieving

superresolution. The obtained analytical results and the results of numerical experiments show that the use of nonlinear regression methods makes it possible to exceed the Rayleigh criterion by 2 to 4 or more times with significantly lower signal-to-noise ratios than many major methods.

Keywords

superresolution, Rayleigh criterion, stability of solutions, regularization of inverse problems

For citation

Lagovsky B. A. Regression methods of detail images in remote sensing. *Ural Radio Engineering Journal*. 2019;3(4):378–384. DOI: 10.15826/urej.2019.3.4.004

Введение

Увеличение эффективной угловой разрешающей способности до значений, превышающих критерий Рэлея, т. е. до сверхразрешения, позволяет раздельно наблюдать отдельные близко расположенные объекты, а также детализировать изображения исследуемых объектов.

Задача получения сверхразрешения относится к классу обратных неустойчивых задач. Предложен ряд методов достижения сверхразрешения [1–4]. Решения, однако, оказываются в достаточной степени устойчивыми и адекватными при отношении сигнал/шум не ниже 20–25 дБ. Еще одним недостатком является то, что методы получения сверхразрешения, в частности, такие как популярные в настоящее время MUSIC и ESPRIT, используют узкополосные сигналы и неэффективны для широкополосных и особенно сверхширокополосных радиолокаторов [5]. Быстродействие многих из упомянутых выше методов недостаточно для работы в режиме реального времени.

1. Постановка задачи и метод решения

Задача состоит в восстановлении углового распределение амплитуды сигнала, отраженного объектами исследования – $I(\varphi, \theta)$ со сверхразрешением на основе анализа принятого сигнала $U(\varphi, \theta)$ и известной ДН антенной системы $f(\varphi, \theta)$ в условиях воздействия шумов и помех.

Поиск углового распределения $I(\varphi, \theta)$ сводится к приближенному решению линейного интегрального уравнения Фредгольма первого рода типа свертки:

$$U(\varphi, \theta) = \int_{\Omega} f(\varphi - \alpha, \theta - \gamma) I(\alpha, \gamma) d\alpha d\gamma, \quad (1)$$

где Ω – угловая область расположения источников излучения.

Известно, что устойчивость решений обратных задач повышается при использовании какой-либо априори известной информа-

мации о решении [6; 7]. Дополнительная информация иногда позволяет провести регуляризацию задачи [5; 7–10]. Рассмотрим одну из задач такого типа.

Пусть, например, заранее известно, что источник сигнала при сканировании по одному из углов может быть с хорошей точностью представлен в виде N малоразмерных (близких к точечным) объектов. Требуется найти угловые положения этих объектов $\alpha_1 \dots \alpha_N$ и амплитуды отражаемых ими сигналов $I_1 \dots I_N$.

На основании приведенной априорной информации исследуемый объект можно с хорошей точностью описать в виде суперпозиции дельта-функций:

$$I(\alpha) = \sum_{n=1}^N I_n \delta(\alpha - \alpha_n). \quad (2)$$

Тогда принятый сигнал представляет собой сумму вида:

$$U_R(\alpha) = \sum_{n=1}^N I_n f(\alpha - \alpha_n). \quad (3)$$

Таким образом, задача восстановления изображения цели оказывается параметризованной, и сводится к задаче поиска $2N$ неизвестных.

Поиск неизвестных параметров может быть осуществлен как поиск минимума функции $2N$ переменных в виде среднеквадратической ошибки:

$$\delta^2 = \int_{\Theta} (U(\alpha) - U_R(\alpha, \alpha_1 \dots \alpha_N, I_1 \dots I_N))^2 d\alpha. \quad (4)$$

Численный поиск минимума (4) сводится к решению многоэкстремальной задачи и не гарантирует получение глобального минимума. Еще одна особенность задачи состоит в том, что в области глобального минимума ошибка в виде (4) при варьировании углов $\alpha_1 \dots \alpha_2$ изменяется очень плавно, что приводит к значительным ошибкам в определении положения отдельных объектов.

Существенно более эффективным оказывается алгоритм, основанный на методах регрессии, в рассматриваемой задаче нелинейной регрессии.

Введем функцию регрессии в виде (2). Дополним задачу условием, повышающим устойчивость численного решения, в виде равенства принимаемой энергии реального и синтезируемого в виде (3) сигналов:

$$\int_{\Theta} U(\alpha)^2 d\alpha = \int_{\Theta} U_R(\alpha, \alpha_1 \dots \alpha_N, I_1 \dots I_N)^2 d\alpha. \quad (5)$$

Дополнительное условие (5) не вносит каких-либо изменений в задачу, оно автоматически следует из ее постановки.

Численное решение рассматриваемой регрессионной задачи поиска неизвестных параметров функции (2), обеспечивающих выполнение (3, 4), успешно находится с помощью оптимизированного метода Левенберга – Марквардта [10].

2. Численные результаты

На математической модели плоской эквидистантной антенной решетки исследовались решения поставленной обратной задачи для различных объектов в различных условиях.

Вводился сложный объект в виде нескольких точечных источников сигнала с различными амплитудами отражаемых сигналов. Угловые расстояния между соседними источниками выбирались меньше ширины диаграммы направленности $\theta_{0,5}$.

Таким образом, без специальной обработки принятого сигнала отдельные источники не разрешались.

К полученным на модели значениям принимаемого при сканировании сигнала (2) добавлялась случайная составляющая в виде белого шума.

Далее, на основе использования изложенных методов регрессионного анализа решались обратные задачи восстановления изображения сложного объекта (2–5).

Характеристики повышения углового разрешения и его пределы исследовались в ходе численных экспериментов.

На рис. 1 показаны результаты восстановления изображения сложного объекта, состоящего из трех одинаковых малоразмерных объектов. Угловое расстояние между объектами составляло $0,25\theta_{0,5}$. Задача решалась при отношении сигнал/шум 25 дБ.

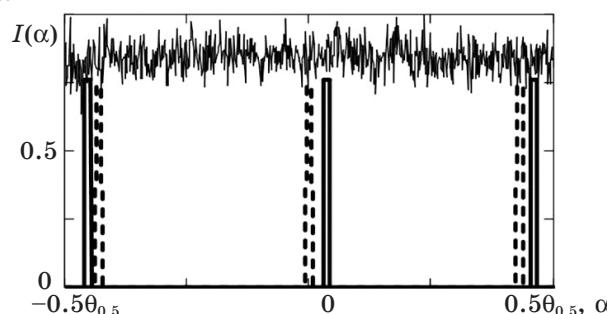


Рис. 1. Восстановленное изображение трехточечного объекта

Fig. 1. Restored image of the three-point object

В виде сплошной жирной линии на рисунке показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии приведен истинный вид объекта. Для иллюстрации задачи показан исследуемый сигнал в виде суммы полезного сигнала и шума – верхняя кривая.

В итоге все три малоразмерных объекта оказались разрешены, критерий Рэлея превышен в 2 раза, найденное положение объектов очень близко к их истинному расположению.

На рис. 2 показаны результаты восстановления изображения объекта, состоящего из двух малоразмерных источников сигналов с различными амплитудами отражаемых сигналов. Угловое расстояние между объектами составляло $0,25\theta_{0.5}$. Значения амплитуд отражаемых сигналов отличались в пять раз.

Задача решалась при отношении сигнал/шум 20 дБ.

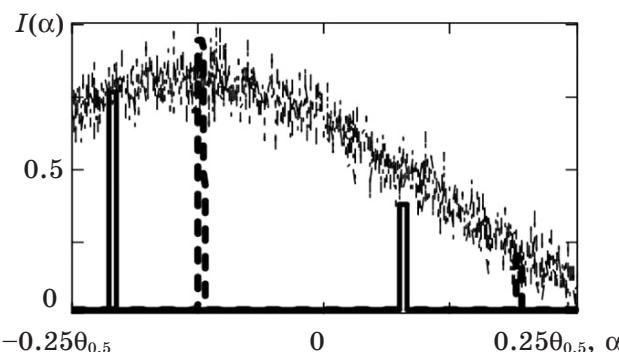


Рис. 2. Изображения малоразмерных источников сигналов с различными амплитудами

Fig. 2. Images of small-size signal sources with different amplitudes

В виде сплошной жирной линии показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии – истинное изображение. Верхняя кривая – исследуемый сигнал.

Два малоразмерных объекта оказались разрешены, найденное положение объектов найдено с некоторой ошибкой.

Ошибка при фиксированном расстоянии между точечными источниками возникает и увеличивается вместе с увеличением уровня шумов и разницей в амплитудах отражаемых сигналов.

На рис. 3 представлены результаты восстановления изображения объекта при очень высоком уровне случайных составляющих сигнала. Отношение сигнал/шум составляло 8 дБ. Объект представлял собой два малоразмерных источника сигналов с равными амплитудами. Угловое расстояние между объектами составляло $0,5\theta_{0.5}$.

В виде сплошной жирной линии показано восстановленное изображение объекта, в виде штриховой линии – истинное изображение. Приведен исследуемый принятый сигнал $U(\alpha)$, обработка которого позволила восстановить изображение сложной радиолокационной цели – верхняя кривая.

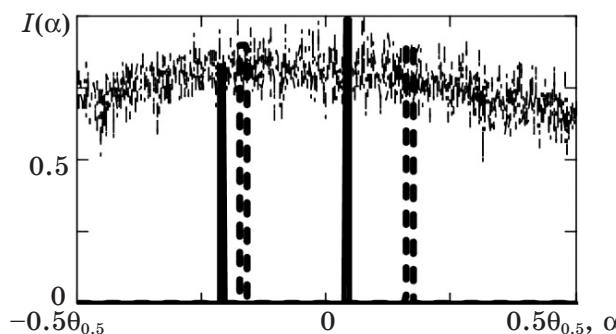


Рис. 3. Восстановленное изображение при высоком уровне шума
Fig. 3. Restored image at high noise level

Найденные угловые положения источников и амплитуды сигналов, отражаемых каждым источником, оказались близки к истинным, несмотря на очень высокий уровень шума. Качество восстановления изображений объектов следует признать вполне приемлемым.

Заключение

Предложен новый метод достижения углового сверхразрешения, основанный на методах нелинейной регрессии. Полученные аналитические результаты и результаты численных экспериментов показывают, что использование методов нелинейной регрессии позволяет превысить критерий Рэлея в 2–4 и более раз при существенно меньших отношениях сигнал/шум, чем многие известные методы. С хорошей точностью определяются угловые координаты отдельных целей и амплитуды отражаемых каждым объектом сигналов.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-07-00185.

Acknowledgment

This research is supported by grant No. 17-07-00185 from the Russian Foundation for basic research.

Список литературы / References

1. Park S. C., Park M. K., Kang M. G. Super-resolution image reconstruction: a technical overview. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2003;20(3):21–36. DOI: 10.1109/MSP.2003.1203207
2. Zhang Y., Jakobsson A., Yang J. Range-Recursive IAA for Scanning Radar Angular Super-Resolution. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2017;14(10):1675–1679. DOI: 10.1109/LGRS.2017.2728038

3. Lagovsky B. Superresolution by Extrapolation for Solving Remote Sensing Problems. In: *Proceedings of the 25th International Crimean Conference Microwave & Telecommunication Technology (CriMiCo'2015), Sevastopol, September 6–12, 2015*. Sevastopol; 2015. Vol. 1, pp. 1144–1146.
4. Lagovsky B., Samokhin A. Shestopalov Y. Superresolution Based on the Methods of Extrapolation. In: *36th Progress In Electromagnetics Research Symposium – PIERS 2015, Prague, Czech Republic, January, 2015*. 2015, pp. 1548–1551.
5. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Increasing accuracy of angular measurements using UWB signals. In: *11th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP). IEEE Conference Publications*. Paris; 2017, pp. 1083–1086.
6. Lagovsky B. A., Chikina A. G. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *2017 Progress In Electromagnetics Research Symposium – Spring (PIERS), St. Petersburg, May 22–25, 2017*, pp. 944–947. DOI: 10.1109/PIERS.2017.8261879
7. Lagovsky B. A., Samokhin A. B. Superresolution in signal processing using a priori information. In: *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA). Verona, Italy, September 11–15, 2017*, pp. 779–783. DOI: 10.1109/ICEAA.2017.8065365
8. Lagovsky B., Samokhin A., Shestopalov Y. Increasing Effective Angular Resolution Measuring Systems Based on Antenna Arrays. In: *2016 URSI International Symposium on Electromagnetic Theory (EMTS). Espoo, Finland, August 14–18, 2016*, pp. 432–434. DOI: 10.1109/ursi-emts.2016.7571418
9. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Creating Two-Dimensional Images of Objects with High Angular Resolution. In: *2018 IEEE Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP), Auckland, New Zealand, August 5–8, 2018*, pp. 114–115. DOI: 10.1109/APCAP.2018.8538220
10. Lagovsky B. A., Samokhin A. B., Shestopalov Y. V. Regression Methods of Obtaining Angular Superresolution. In: *2019 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (AP-RASC), New Delhi, India, March 9–15, 2019*. DOI: 10.23919/URSIAP-RASC.2019.8738539

Информация об авторе

Лаговский Борис Андреевич, доктор технических наук, профессор, МИРЭА – Российский технологический университет – РТУ МИРЭА, Россия, 119454, Москва, пр-т Вернадского, 78.

Information about the author

Boris A. Lagovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, MIREA – Russian Technological University – RTU MIREA, 78, Vernadskogo Ave., Moscow, 119454, Russia.

Поступила / Received: 21.10.2019

Принята в печать / Accepted: 15.11.2019