

**К ВОПРОСУ СВЕРХРЕЛЕЕВСКОГО РАЗРЕШЕНИЯ СИГНАЛОВ ПО АЗИМУТУ
В РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ КРУГОВОГО ОБЗОРА**

Фитасов Евгений Сергеевич

кандидат технических наук; доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)».

E-mail: fitasoves@mail.ru.

Пархачёв Владимир Владимирович

кандидат физико-математических наук; доцент кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)».

E-mail: vvp@rf.unn.ru.

Односеццев Валерий Александрович

старший преподаватель кафедры радиотехники ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского (ННГУ)».

Адрес: 603950, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23.

Аннотация: Предлагается метод повышения эффективности разрешения радиолокационных сигналов по азимуту в радиолокационных системах кругового обзора, инвариантный по отношению к форме сигналов, дающий возможность «сверхрелеевого» разрешения. Важным преимуществом предложенного алгоритма разрешения, основанного на методе наименьших квадратов, является оценка параметров сигнала групповой цели в азимутальной плоскости, а также возможность его распространения на модель сигнала с произвольным количеством радиолокационных целей. Для решения задачи разрешения по азимуту предлагаемым методом необходимо априорное знание количества целей, при этом предполагается различие в радиальных скоростях отдельных воздушных целей, что обусловлено техническими характеристиками летательных аппаратов и влиянием турбулентности атмосферы, особенно на малых и средних высотах. В статье приведены результаты моделирования, которые показывают зависимость среднеквадратичного отклонения оценки измерения азимута двух целей (нормированной к величине ширины диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости) от отношения сигнал-шум на входе системы обработки. Результаты моделирования показывают, что алгоритмы разрешения на основе метода наименьших квадратов позволяют значительно улучшить разрешение, обеспечиваемое согласованной фильтрацией, так называемое «релеевское» разрешение. При этом обеспечивается оценка параметров целей. Показано, что совместная оценка азимута групповой цели будет ограничена среднеквадратическим отклонением измерения одиночного сигнала, которое составляет 1/10 диаграммы направленности антенны.

Ключевые слова: разрешение сигналов, сверхрелеевское разрешение, разрешающая способность по азимуту, радиолокационные цели, метод наименьших квадратов.

Известно, что при обнаружении, измерении параметров и разрешении сигналов наиболее распространенным методом обработки является согласованная фильтрация [1]. Этот способ является оптимальным при наличии сигнала, отражённого от одиночного воздушного объекта, на фоне гауссовой некоррелированной помехи. Однако в том случае, когда исходная смесь представляет собой сумму нескольких сигналов на фоне шума (или коррелированной помехи), согласованная фильтрация становит-

ся неоптимальной, а обеспечиваемое при этом качество обработки существенно ниже потенциально достижимого. Это выражается в следующем:

- искажение главного пика сигнала на выходе фильтра боковыми лепестками других сигналов (вплоть до необнаружения слабого сигнала);
- ограничение разрешения близко расположенных сигналов шириной главного пика функции неопределённости (так называемый

релеевский предел), что часто оказывается недостаточным на практике. При этом разрешающая способность не может быть улучшена посредством увеличения отношения сигнал/шум [2].

Поэтому обычно задача обеспечения заданной разрешающей способности в активных радиолокационных системах решается за счёт уменьшения ширины главного пика функции неопределённости. Например, за счёт увеличения частоты девиации ЛЧМ-сигнала при увеличении частоты дискретизации для обеспечения разрешения по дальности, и за счёт увеличения линейных размеров антенной решетки для обеспечения разрешения по угловым координатам.

Другим современным и перспективным методом увеличения разрешающей способности является применение технологии сверхкороткоимпульсной радиолокации [3].

Использование цифровых адаптивных многоэлементных антенных решёток и методов спектрального сверхразрешения также позволяют получить более высокое разрешение [4, 5].

Известны различные адаптивные методы спектрального оценивания [6, 7]. Однако приведённые методы, в основном, хорошо разработаны лишь для сигналов синусоидальной формы. При этом, нужно отметить, что в публикациях последних нескольких лет рассматриваются вопросы наиболее сложные и важные с практической точки зрения, а именно сверхразрешение радиолокационных сигналов при воздействии активных шумовых помех [8].

Приведённые выше методы повышения разрешающей способности приводят к ряду дополнительных (а часто, существенных) технических проблем:

- увеличивается объем и сложность аппаратуры формирования и приёма сигналов;
- увеличивается количество каналов;
- повышаются требования к пропускной способности каналов передачи данных;
- увеличиваются требования к производительности вычислительных машин.

Увеличение линейных размеров антенной решетки для обеспечения разрешения по угловым координатам при ограничениях по массе и габаритным размерам радиоэлектронных средств также недопустимо. Переход в более коротковолновый диапазон также приведёт к существенному усложнению и увеличению объёма аппаратуры.

В работе [9] был предложен метод разрешения сигналов, не требующий априорной информации о параметрах сигналов, а также инвариантный по отношению к их форме. Он основан на известном методе наименьших квадратов [10, 11]. Кроме того, данный метод позволяет оценивать параметры произвольного количества сигналов.

Рассмотрим возможность и эффективность применения метода наименьших квадратов для решения задачи разрешения радиолокационных сигналов по азимуту в радиолокационных системах кругового обзора с механическим сканированием (вращением) антенны в азимутальной плоскости.

Запишем наблюдаемые данные в векторном виде

$$\mathbf{y} = \mathbf{S}\mathbf{a} + \mathbf{w}, \quad (1)$$

где $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_N)^T$ – вектор отсчётов наблюдаемых данных, $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_N)^T$ – вектор отсчётов шума, $\mathbf{a} = (a_1, a_2, \dots, a_N)^T$ – вектор неизвестных амплитуд.

Матрица \mathbf{S} определяется как

$$\mathbf{S} = (\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M), \quad (2)$$

где значения векторов столбцов $\mathbf{S}_1, \mathbf{S}_2, \dots, \mathbf{S}_M$ соответственно

$$\mathbf{S}_k = \begin{bmatrix} f(\beta_k) \exp(j2\pi F_k^d 1T) \\ f(\beta_k) \exp(j2\pi F_k^d 2T) \\ \dots \\ f(\beta_k) \exp(j2\pi F_k^d NT) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$k = 1, 2, \dots, M,$

где $f(\beta)$ – функция ДН антенны в азимутальной плоскости, β – азимут, F_k^d – частота Доплера k -го источника, T – период зондирования, N – длина азимутального пакета.

Оценки амплитуды и азимута в векторной форме имеют вид

$$\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)^T, \quad \hat{\mathbf{B}} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_M). \quad (4)$$

Тогда оценка сигнала $\hat{\mathbf{y}}$ будет равна

$$\hat{\mathbf{y}} = \hat{\mathbf{S}}\mathbf{a}. \quad (5)$$

Оценки амплитуд $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)^T$ и значений азимута цели $\hat{\mathbf{B}} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_M)$ должны обеспечить минимизацию ошибки наблюдаемых данных

$$E = \min \{ \|\mathbf{y} - \hat{\mathbf{y}}\|^2 \} \quad (6)$$

Найдем вектор амплитуд $\hat{\mathbf{a}}$, минимизирующий ошибку E для гипотетических значений азимута цели $\hat{\mathbf{B}} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_M)$ и, следовательно, $\hat{\mathbf{S}}$. Это стандартная линейная задача наименьших квадратов, решение которой для вектора $\hat{\mathbf{a}} = (\hat{a}_1, \hat{a}_2, \dots, \hat{a}_N)^T$ определяется выражением [11]

$$\hat{\mathbf{a}} = (\hat{\mathbf{S}}^H \hat{\mathbf{S}})^{-1} \hat{\mathbf{S}}\mathbf{y}. \quad (7)$$

Для этого вектора минимальное значение E

$$\min(E_1) = \mathbf{y}^H \mathbf{y} - \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{y}}. \quad (8)$$

Теперь следует минимизировать E_1 по всем возможным значениям и, следовательно, по всем возможным значениям $\hat{\mathbf{S}}$. Минимизация E_1 эквивалентна максимизации величины E_2 , равной

$$\max(E_2) = \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{y}} = \mathbf{y}^H \hat{\mathbf{S}} (\hat{\mathbf{S}}^H \hat{\mathbf{S}})^{-1} \hat{\mathbf{S}}^H \mathbf{y}, \quad (9)$$

так как $\mathbf{y}^H \mathbf{y}$ не зависит от $\hat{\mathbf{B}} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_M)$.

Поскольку $(\hat{\mathbf{S}}^H \hat{\mathbf{S}})$ положительно определена, $\hat{\mathbf{B}} = (\hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \dots, \hat{\beta}_M)$ предполагаются не равными между собой. Следовательно, можно, применив процедуру Грамма-Шмидта к столбцам $\hat{\mathbf{S}}$,

представить её как произведение двух матриц вида $\mathbf{C}^H \mathbf{C}$, где \mathbf{C} – нижняя треугольная матрица [12].

Однако, как видно из приведённого выражения (3), для решения задачи разрешения по азимуту необходимо априорное знание количества сигналов и их значений F_k^d . То есть, в данном случае решение задачи разрешения по азимуту предполагает различие в радиальных скоростях отдельных воздушных объектов.

Очевидно, что для большинства реальных целей будут существовать различия в радиальных скоростях полёта. Эти отличия обусловлены как техническими характеристиками воздушных объектов, так и влиянием турбулентности атмосферы, особенно на малых и средних высотах [14].

Таким образом, алгоритм разрешения по азимуту и оценки параметров сигнала группового воздушного объекта будет выглядеть следующим образом:

- определение количества целей на выходе порогового устройства межпериодной обработки и определение значений частоты Доплера $F_1^d \dots F_N^d$ [14];
- формирование матрицы S_β , в соответствии с выражением (3);
- оценка параметра $\beta_1 \dots \beta_N$, получаемая при максимизации величины E_2 в выражении (9).

На рис. 1 приведены результаты моделирования приведенного выше алгоритма разрешения по азимуту. По оси ординат отложены значения среднеквадратичного отклонения (СКО) оценки измерения азимута двух целей (значения нормированы к величине ширины диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости, т.е. 1/ДНА). По оси абсцисс отложены значения отношения сигнал-шум на входе системы обработки (с/ш, дБ). Моделирование проводилось для случая обнаружения радиолокационной станцией ($\lambda = 23$ см) суммы двух сигналов с различием в частоте Доплера $\Delta F^d = 3$ м/с, что соответствует ширине доплеровского фильтра одиночного импульса (ко-

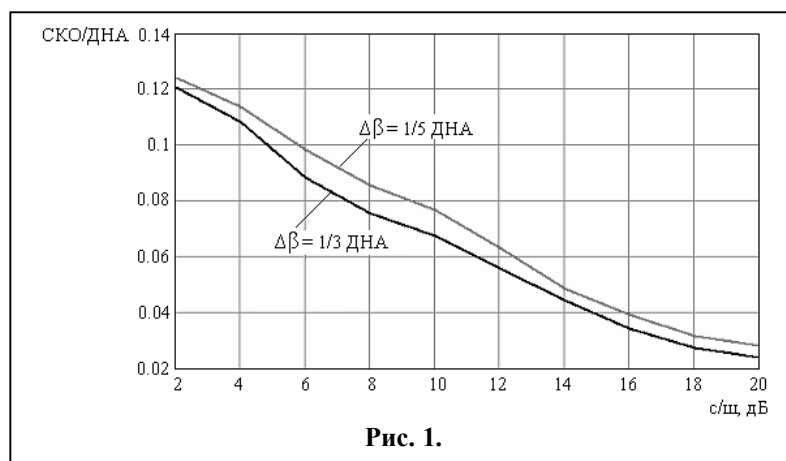


Рис. 1.

герентного накопителя) по уровню 3 дБ; ширина диаграммы направленности антенны в азимутальной плоскости $\Delta\beta = 10^\circ$.

На рис. 1 показаны результаты измерения суммарного СКО при разнесении целей по азимуту на $1/3$ ширины ДНА и на $1/5$ ширины ДНА. Из рис. 1 видно, что совместная оценка азимута групповой цели будет ограничена СКО измерения одиночного сигнала, которое составляет $\sim 1/10$ ДНА.

Таким образом, полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1) Обеспечение разрешающей способности по азимуту за счёт перехода в более коротковолновый частотный диапазон, увеличения размеров антенной решётки или применения цифровых адаптивных многоэлементных антенных решёток, приводит к существенному усложнению и увеличению объёма аппаратуры радиолокационной системы. При условии ограничения по массе и габаритным размерам локатора это является недопустимым. При этом решение задачи разрешения при помощи методов согласованной фильтрации сигналов, отражённых от одиночной цели, не представляется возможным.

2) Для обеспечения разрешения и оценки параметров радиолокационных сигналов, предлагается алгоритм разрешения азимуту на основе метода наименьших квадратов. Результаты моделирования показывают, что алгоритмы разрешения на основе метода наименьших квадратов позволяют значительно улучшить

разрешение, обеспечиваемое согласованной фильтрацией, так называемое «релеевское» разрешение.

3) Предложенный алгоритм разрешения распространяется на модель сигнала с произвольным количеством целей. При этом обеспечивается оценка параметров целей.

Литература

1. Ширман Я.Д. Разрешение и сжатие сигналов. М. : Советское радио, 1974. 360 с.
2. Справочник по радиолокации [под ред. М.И. Сколника]. Пер. с англ. под общей ред. В.С. Вербы. В 2 книгах. Книга 2. М. : Техносфера, 2014. 680 с.
3. Скосырев В.Г., Служкин Г.П., Ильин Е.М. Тенденции и пути внедрения технологии сверхкороткоимпульсной радиолокации // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2009. № 1. С. 40.
4. Монзинго Р.А., Миллер Т.У. Адаптивные антенные решетки: Введение в теорию. М. : Радио и связь, 1986. 448 с.
5. Марпл-мл. С.Л. Цифровой спектральный анализ. М. : Мир, 1990. 547 с.
6. Ермолаев В.Т. [и др.] Эффективность методов адаптивной обработки сигналов в многоэлементных антенных решетках // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2014. Вып. 3. С. 15–19.
7. Чижов А.А. Сверхразрешение. Germany, Saarbrücken: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 216 с.
8. Чижов А.А. Сверхразрешение радиолокационных целей при воздействии активных шумовых помех по основному и ближнему боковым лепесткам диаграммы направленности антенны РЛС // Информационно-управляющие системы. № 1. 2016. С. 88–92.
9. Фитасов Е.С. Метод повышения эффективности разрешения и оценки параметров радиолокационных сигналов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. № 1. 2017. С. 48–52.
10. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. М. : Физматгиз., 1962. 350 с.
11. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и её применение в связи и управлении. М. : Связь, 1976. 496 с.

12. Ширман Я.Д., Манжос В.Н. Теория и техника обработки радиолокационной информации на фоне помех. М. : Радио и связь, 1981. 416 с.

13. Фитасов Е.С. [и др.] Система защиты импульсной радиолокационной системы от дискретных метеорообразований // Датчики и системы. 2017. № 8–9. С. 13–19.

14. Фитасов Е.С., Насонов В.В., Односец В.А., Леговцова Е.В. К вопросу оценки радиальной скорости радиолокационного объекта методом наименьших квадратов для случая неизвестной корреляционной матрицы помех // Вестник ЯВВУ ПВО. 2018. № 1. С. 49–55.

Поступила 18 июля 2018 г.

English

THE SUPERRAYLEIGH RESOLUTION OF SIGNALS IN AZIMUTH IN A RADAR SYSTEM OF THE CIRCULAR MONITORING

Evgeniy Sergeyeovich Fitasov – Candidate of Technical Sciences; Associate Professor, Radio Engineering Department, Lobachevsky National Research State University of Nizhni Novgorod (SUNN). *E-mail:* fitasoves@mail.ru.

Vladimir Vladimirovich Parhachyov – Candidate of Physical and Mathematical Sciences; Associate Professor, Radio Engineering Department, Lobachevsky National Research State University of Nizhni Novgorod (SUNN). *E-mail:* vvp@rf.unn.ru.

Valery Aleksandrovich Odnosevtsev – Senior Lecturer, Radio Engineering Department, Lobachevsky National Research State University of Nizhni Novgorod (SUNN).

Address: 603950, Nizhny Novgorod, Gagarin Ave., 23.

Abstract: When detecting, measuring parameters and resolving signals, the most common processing method is matched filtering. This method is optimal involving the signal reflected from a single airborne object amid the Gaussian uncorrelated noise. However, when the base mixture is the sum of several signals amid the noise (or correlated noise), the matched filtering becomes non-optimal and the provided processing quality is significantly lower than potentially achievable. This is often expressed in limiting the resolution of closely spaced signals by the main peak width of the uncertainty function (so-called Rayleigh limit). That said, the resolution capability cannot be improved by enhancing the signal-to-noise ratio. Therefore, usually the problem of providing the preset resolution capability in active radar systems is solved by reducing the main peak width of the uncertainty function. For example, by increasing the LFM signal frequency deviation when increasing the sampling frequency to ensure range resolution and by increasing the antenna array linear dimensions to ensure angular resolution. Another current and promising method to enhance the resolution involves application of the ultrashort pulse radar technology. Using digital adaptive multi-element antenna arrays and spectral superresolution methods also provides higher resolution. The article offers the radar signal resolution method via azimuth signals with no need for a prior information about the signal parameters, as well as it is invariant with respect to their shape. The method is based on the known least-squares method. Solving the problem of azimuth resolution requires the prior knowledge of the number of signals and their values. In this case, solving the azimuth resolution problem involves a difference in the radial velocities of individual airborne objects, which is due to the technical characteristics of airborne objects and the atmospheric turbulence influence, especially at low and medium altitudes. The article presents the simulation results that show the dependence of the value normalized antenna pattern in the azimuthal plane of the estimate root-mean-square deviation in the measurement (total) the two targets' azimuth on the signal-to-noise ratio in the processing system input. The simulation results demonstrate that the least-squares based resolution algorithms can significantly improve the resolution provided by the matched filtering, so-called "Rayleigh" resolution. The proposed resolution algorithm applies to the signal model with any number of targets. That said, the target parameter estimation is ensured. The joint estimate of the multiple target azimuth will be constrained by the root-mean-square deviation in the measurement of the single signal, which is 1/10 of the antenna beam pattern.

Keywords: signal resolution, ultra-Rayleigh resolution, azimuth resolution, radar target, least-squares method.

References

1. Shirman Ya.D. Resolution and compression of signals. Moscow : Sovetskoe radio, 1974. 360 p.
2. Skolnik M. Radar Handbook. Book 2. Ed.by M. Skolnik. 3rd ed. Translated from English under the general editorship by V.S. Verba. In 2 books. Moscow: Tekhnosfera, 2014. 680 p.

3. Skosyrev V.G., Slukin G.P., Ilyin E.M. Trends and ways of implementing the technology of the ultra-narrow pulse radar detection. Bulletin of Moscow State Technical University. n.a. N.E. Bauman. Series: Priborostroyeniye. 2009. No. 1. P. 40.
4. Monzingo R.A., Miller T.W. Introduction to Adaptive Arrays. Moscow : Radio i svyaz. 1986. 448 p.
5. Marple jr. S. L. Digital Spectral Analysis. Moscow : Mir, 1990. 547 p.
6. Ermolaev V.T. [and other colleagues] Efficiency of signal adaptive processing methods in multi-element antenna arrays // Izv. University of Russia. Radionics. 2014. Iss. 3. Pp. 15–19.
7. Chizhov A.A. The Superresolution. Germany, Saarbrücken : LAMBERT Academic Publishing, 2012. 216 p.
8. Chizhov A.A. Superresolution of radar targets with active noise interference in the antenna lobe and near side lobes of the Radar antenna pattern // Informatsionno-upravlyayushchiye sistemy. 2016. No. 1. Pp. 88–92.
9. Fitasov E.S. Enhancement method of resolution efficiency and assessment of radar signal parameters. Radiotekhnicheskiye i telekommunikatsionnye sistemy. No. 1. 2017. Pp. 48–52.
10. Linnik Yu.V. Least squares method and fundamentals of math-and-stats theory of observation analysis. Moscow : Fizmatgiz. 1962. 350 p.
11. Sage A., Melsa J. Estimation Theory with Applications to Communications and Control. Moscow : Svyaz, 1976. 496 p.
12. Shirman Ya.D., Manzhos V. N. Theory and processing techniques of radar information amid noise interference. Moscow : Radio i svyaz, 1981. 416 p.
13. Fetisov E.S. [and other colleagues]. Pulsed Radar protection system from discrete moisture targets // Sensors and systems. 2017. No. 8–9. Pp. 13–19.
14. Fetisov E.S., Nasonov V.V., Odnosevtsev V.A., Legovtsova E.V. On estimation of the radar object radial velocity by the least-squares method in case of unknown noise correlation // Vestnik YAVVU PVO. 2018. No. 1. Pp. 49–55.